

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Серія: ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ,
БУДІВНИЦТВО

Випуск 2 (41)

Полтава 2014 р.

Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

Редколегія: С.Ф. Пічугін (головний редактор) та ін. – Вип. 2 (41). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – 393. с.

Видається з 1999 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ 8974 від 15.07.2004 р.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних технологій машинобудування, інструментального забезпечення виробництва, використання 3D моделювання для конструювання інструментальних та робочих поверхонь, транспортного машинобудування, експлуатації автомобілів, підйомно-транспортних, будівельних машин та обладнання.

Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Збірник наукових праць рекомендовано до опублікування вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, протокол № 6 від 26.11.2014 р.

Збірник включений до переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт (Наказ МОН України № 1279 від 6.11.2014 року).

Редакційна колегія:

- С.Ф. Пічугін* – **головний редактор**, д.т.н., проф., зав. каф. конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- Ю.Л. Винников* – **заступник головного редактора**, д.т.н., проф., проф. каф. видобування нафти і газу та геотехніки Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- В.В. Ільченко* – **відповідальний секретар**, к.т.н., доц., доц. каф. автомобільних доріг, геодезії та архітектури сільських будівель Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- А.Ж. Жусупбеков* – д.т.н., проф., зав. каф. проектування будівель і споруд, директор геотехнічного інституту, Євразійського національного університету ім. Л.М. Гумільова, м. Астана, Казахстан;
- М.Л. Зоценко* – д.т.н., проф., зав. каф. видобування нафти і газу та геотехніки Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- С.Ф. Клованич* – д.т.н., проф., проф. Вармінсько-Мазурського університету, м. Ольштин, Польща;
- О.Г. Маслов* – д.т.н., проф., зав. каф. основ конструювання машин і технологічного обладнання Кременчуцького національного університету;
- І.І. Назаренко* – д.т.н., проф., зав. каф. механізації технологічних процесів Київського національного університету будівництва та архітектури;
- А.Я. Найчук* – д.т.н., проф., директор НТС РУП «Інститут БелНИИС», м. Брест, Республіка Беларусь;
- М.П. Нестеренко* – д.т.н., доц., доц. каф. будівельних машин та обладнання ім. О.Г. Онищенка Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- А.М. Павліков* – д.т.н., проф., зав. каф. залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- О.О. Петраков* – д.т.н., проф., зав. каф. основ, фундаментів і підземних споруд Донбаської національної академії будівництва та архітектури, м. Макіївка;
- А.Б. Пономарьов* – д.т.н., проф., зав. каф. будівельного виробництва і геотехніки Пермського національного дослідницького політехнічного університету, Росія;
- О. Прентковський* – д.т.н., проф., проф. кафедри технологічного транспортного обладнання Вільнюського технічного університету ім. Гедімінаса, Литва;
- В.Л. Седін* – д.т.н., проф., зав. каф. основ і фундаментів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, м. Дніпропетровськ;
- О.В. Семко* – д.т.н., проф., зав. каф. архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- Л.І. Стороженко* – д.т.н., проф., проф. каф. конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- Л.А. Хмара* – д.т.н., проф., зав. каф. будівельних і дорожніх машин Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, Дніпропетровськ;
- В.Г. Шаповал* – д.т.н., проф., проф. каф. будівництва та геомеханіки Національного гірничого університету, м. Дніпропетровськ.

*Е.А. Фролов, д.т.н., проф., С.И. Кравченко, к.т.н., доц., О.Г. Носенко, асп.
Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка*

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Приведены решения повышения технического и технологического уровней производства, существенного повышения надежности и долговечности деталей машин и оборудования, снижения металлоемкости и трудоемкости изготовления технологического оснащения.

Ключевые слова: *высокие технологии, качество поверхности, нанесение и получение покрытий, надежность, долговечность, быстрое прототипирование, технология размерной обработки, технологическое оснащение.*

Введение. Современное передовое производство характеризуется как гибкое рыночно ориентированное. Это означает, что рынок определяет требования не только к конечному продукту, но и к его производству практически на всех этапах разработки и освоения.

Высокие технологии в машиностроении и их рабочие процессы следует рассматривать на общем фоне развития машиностроения и тех тенденций, которые возможно окажутся решающими при выпуске конкурентно-способной продукции.

При этом необходимо учитывать партионность, большое разнообразие типов и вариантов, а также специфичные для каждого потребителя исходные данные, повышающие требования к продукции, управлению производством, широте и глубине проектирования.

Формируется новое понимание производства: целостное рассмотрение и оптимизация потоков материалов, исключение расточительных затрат ресурсов любого вида, непрерывная оптимизация производства, применение передовых технологий и ориентация на человека, минимизация расходов при эксплуатации готовой продукции.

В связи с этим все большее внимание специалистов привлекают нетрадиционные технологии, которые в отличие от традиционных называют «наукоемкими»: интегрированные, прецизионные, нанотехнологии и др.

Анализ последних исследований и публикаций. Высокими следует считать такие технологии, которые обладают совокупностью основных признаков — наукоемкость, системность, физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации, высокоэффективный рабочий процесс размерной обработки, компьютерная технологическая среда, автоматизация всех этапов разработки и реализации при соответствующем технологическом (оснастка, оборудование, инструмент) и кадровом обеспечении, устойчивость, надежность, экологическая чистота и ресурсосбережение [1].

Столь же очевидно, что необходимо создавать новые производства «высокой технологии» особенно по тем направлениям и видам продукции, где мы занимаем передовые позиции. По этим направлениям нам не надо покупать лицензии, дорогостоящее оборудование и инструмент. А это экономит очень значительные средства, не говоря уже о престиже государства.

Цели работы. Среди вопросов, требующих исследования, разработки и интенсивного решения опережающими темпами, первоочередными являются следующие:

– создание быстро перестраиваемых комплексов различной технологической значимости, оснащенных автоматизированной и механизированной технологической оснасткой второго поколения;

- широкое применение систем автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и интегральных систем управления производством;
- применение принципиально новых видов материалов, обладающих по сравнению с традиционными материалами высокими физико-механическими свойствами, устойчивостью к износу и изменению геометрической формы;
- создание и совершенствование промышленной технологии и оборудования для получения широкой номенклатуры высокопрочных, коррозионноустойчивых, жаростойких композиционных покрытий на основе вакуумно-плазменного и детонационно-газового и других высокоэффективных методов;
- широкое применение при конструировании и применении технологической оснастки композиционных материалов и пластических масс, способных заменить черные и цветные металлы и сплавы, и существенно улучшить эксплуатационные свойства, качество и долговечность оснастки;
- разработка технологии и оборудования с применением высоких давлений и вакуума для формирования и калибровки изделий сложной формы, синтеза инструмента.

Резльтирующая задача — совершенствование и дальнейшее развитие автоматизированной системы технологической подготовки и контроля производства в области управления предприятием, экономного использования материалов и решения производственных заданий.

Основными компонентами данной системы являются: 1) гибкие системы проектирования, изготовления и сборки управляемые ЭВМ; 2) высокоэффективные рабочие процессы; 3) широкая кооперация и поставка деталей строго по графику; 4) системы снабжения и обеспечения производственных процессов; 5) компьютерные автоматизированные системы (проектирование, планирование, производство, обеспечение качества, сборка).

Изложение основного материала исследований. Наиболее перспективным путем повышения производительности труда на стадии технологической подготовки производства является автоматизация на базе широкого использования средств вычислительной техники. При этом необходимо работать над разработкой единого математического и программного обеспечения, автоматизированных систем проектирования, технологической подготовки, планирования и организации производства. Говоря об экономической стороне автоматизации, необходимо подчеркнуть, что только комплексная автоматизация дает возможность создания структуры промышленного предприятия, отвечающую требованиям эффективного использования прогрессивного оборудования.

Надежность работы машин непосредственно связана с качеством поверхностного слоя деталей, который характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами.

От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства — сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная и жаростойкость, сопротивление контактной усталости и др. Оптимальная поверхность должна быть достаточно твердой, иметь остаточные сжимающие напряжения, мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью опорной поверхности.

Физико-механические параметры поверхности достигаются нанесением на них соответствующих покрытий вакуумно-плазменным, детонационно-газовым, лазерным методами, пластическим деформированием, ионным азотированием, электроискровым легированием и другими методами.

В зависимости от назначения изделия, условий его работы, материала и теплостойкости должен быть решен комплекс задач по выбору состава и конструкции покрытия, оптимизации параметров его нанесения. Так при упрочнении режущего инструмента наибольшее распространение получили покрытия на основе соединений титана — нитрид титана (TiN), карбида титана (TiC), карбонитрида титана (TiCN). Такие покрытия хотя и повышают стойкость режущих инструментов, однако, позволяют решить задачу увеличения работоспособности частично, так как эффективны при обработке легированных конструк-

ционных сталей. При резании высокопрочных сталей и сплавов инструментом с покрытием на основе титана существенного увеличения стойкости не наблюдается.

Пластические деформации в зонах стружкообразования сильно зависят от сопротивления сдвигу на участке пластического контакта.

Именно на этом участке наиболее активно реализуются диффузионные процессы между инструментальными и обрабатываемыми материалами, которые и влияют на сопротивляемость срезанного слоя пластическому сдвигу. В частности, при насыщении локальных, объемов обрабатываемого материала в зоне пластического контакта легирующими элементами из инструментального материала сопротивление сдвигу будет возрастать, это обязательно приведет к росту коэффициента деформации и сил резания. Если покрытие, наряду с высокой теплостойкостью, химически инертно к обрабатываемому материалу, то оно выполняет роль активного барьера, сдерживающего диффузию атомов инструментального материала в обрабатываемый (сходящую стружку). В этом случае сопротивление пластическому сдвигу на участке пластического контакта снижается. Это приводит к уменьшению коэффициентов деформации и сил резания.

В связи с этим, для эффективной обработки трудно обрабатываемых материалов разработан ряд покрытий для режущих инструментов, применительно к определенным группам жаропрочных и высоколегированных сталей и сплавов.

Эффективные покрытия:

– для жаропрочных деформируемых сплавов и высоколегированных сталей — композиционное покрытие нитридов титан–хром (Ti/CrN), состоящее из 30 % хрома и 70 % титана (по массе);

– для хромистых нержавеющей и хромоникелевых сталей и сплавов — композиционное покрытие нитридов цирконий–гафний (Zr/Hf·N), состоящее из 80 % циркония и 20 % гафния (по массе);

– для титановых сплавов — нитрид циркония (ZrN).

Нанесение этих покрытий на рекомендуемый справочной литературой режущий инструмент позволяет увеличить его стойкость в 1,6–2 раза [2].

Технологический процесс нанесения вакуумно-плазменных покрытий является многопараметрическим. Каждый из параметров или их сочетание оказывает влияние на фазовый состав, структуру и свойства покрытия. Изменение только одного параметра — давление в вакуумной камере — позволяет получить многослойную конструкцию покрытия с чередующимися по твердости слоями ($\alpha\text{-Me} + \alpha\text{-Me} \rightarrow \gamma\text{-Me} + \gamma\text{-Me}$).

Режущий инструмент с 4–6 такими слоями обладает достаточной пластичностью и эффективен при работе с ударными нагрузками и при прерывистом резании.

Получение покрытий с различными свойствами позволяет разрабатывать улучшенные конструкции деталей машин, при этом работоспособность узлов, в которые они входят, значительно повышается. Так, предложенная технология нанесения покрытия нитрида молибдена на кулак шарнира, а на сопрягаемый упор — нитрида титана, позволила снизить трение в 3 раза, увеличить чувствительность механизма в 3–4 раза и повысить общую долговечность работы механизма парораспределения турбины с 10 месяцев до 4 лет при работе в среде с температурой 260 °С.

Вакуумная технология способна также решать задачи, которые не под силу другим процессам. Для производства головок наведения управляемых аппаратов требуется коэффициент отражения сферической поверхности магнита из сплава ЮНДК-24 не менее 0,9 при работе с термоударами от +60 °С до –180 °С. Разработанный технологический процесс нанесения многослойного покрытия Zr + ZrN общей толщиной 0,4 мкм обеспечивает стабильное получение коэффициента отражения 0,92.

Свойства бомбардировки ионами низких энергий (до 2 кэВ) очищать поверхность от окисных пленок, вскрывать структурные дефекты в поверхностном слое, а также осуществлять интенсивный нагрев поверхности, могут быть использованы для создания эколо-

гически чистых технологий взамен химико-термических процессов (цианирование, азотирование) и нанесения гальванических покрытий, применяемых для улучшения эксплуатационных характеристик деталей из низкоуглеродистых сталей типа 08кп, 10, 20.

Все большее распространение получает использование вакуумно-плазменных технологий при нанесении защитно-декоративных покрытий на товары народного потребления из нержавеющей стали, нейзильбера, стекла, керамики, фосфора. Изделия при этом приобретают желаемую цветовую гамму, которая зависит как от состава реактивного газа, так и от толщины покрытия.

Повышение надежности и работоспособности наиболее ответственных и тяжело нагруженных деталей машин, работающих в условиях длительного трения, эрозионного воздействия, значительных механических и тепловых нагрузок, определяющих в связи с этим ресурс изделия, достигается методом детонационно-газового упрочнения путем нанесения на рабочие поверхности деталей упрочняющих и защитных покрытий импульсным высокоэнергетическим напылением порошкообразного материала с заданными технологическими характеристиками.

В настоящее время разработана и широко внедрена технология получения на рабочих поверхностях деталей эксплуатационного слоя с физико-механическими характеристиками, обеспечивающими оптимальные условия промышленной эксплуатации изделий.

Основными преимуществами метода детонационно-газового напыления в сравнении с другими методами газотермического высокотемпературного напыления (электродуговая металлизация, газопламенное и плазменное напыление) являются:

- возможность нанесения покрытий на холодную деталь (без необходимости предварительного, сопутствующего либо последующего ее нагрева);
- высокая прочность сцепления (адгезия) покрытия с материалом детали (до 250 МПа);
- высокая плотность покрытий (до 99 %);
- незначительный нагрев детали при напылении (до 200 °С), что позволяет наносить покрытия на окончательно обработанные детали;
- возможность нанесения чрезвычайно широкого круга материалов (металлов и сплавов, различных видов керамики — оксидов, карбидов и т. д., металлокерамики, а также их смесей).

Эффективность применения детонационных покрытий связана, прежде всего, с повышением срока службы упрочненных деталей. Причем, увеличение затрат на их изготовление значительно ниже по сравнению с экономией от увеличения срока их службы. Кроме того, детонационное напыление в целом ряде случаев позволяет заменить дорогостоящие стали и цветные металлы на более дешевые недефицитные материалы за счет придания необходимых эксплуатационных свойств только рабочим поверхностям, непосредственно подверженным влиянию неблагоприятных факторов, вместо упрочнения детали в целом. Все вместе это обуславливает получение значительной экономии материальных и энергетических ресурсов, а также улучшение экологической ситуации.

С помощью широко применяемых технологий окончательной обработки (шлифование, хонингование, доводка) создается необходимая форма поверхности с заданной точностью. Однако в ряде случаев традиционные технологии не обеспечивают оптимальное качество и точность рабочих поверхностей.

В этих случаях целесообразно использовать технологии поверхностного пластического деформирования (обкатывание и раскатывание шаровым и роликовым инструментом, алмазное выглаживание, ударная обработка специальным инструментом).

В результате упрочняется поверхностный слой, повышается износостойкость, стойкость к коррозионным воздействиям и др. Во многих случаях удается повысить запас прочности деталей, работающих при переменных нагрузках в 1,5–2 раза.

Другим перспективным направлением при изготовлении и ремонте деталей является отделочно-зачистная обработка и одна из ее разновидностей — виброобработка. Широкие

технологические возможности этого метода в сочетании с высокой производительностью на очистных, доделочных, шлифовально-полировальных и упрочняющих операциях поставили его в число наиболее приемлемых и перспективных способов обработки деталей.

Работа виброустановок основана на принципе неуравновешенного момента, создаваемого при помощи грузов, закрепленных на концах вала вибратора. Механические колебания рабочей среды и обрабатываемых деталей при этом составляют 20–50 Гц с амплитудой от 1 до 10 мм.

В зависимости от назначения технологической операции, материала детали и способа ведения процесса состав рабочей среды может быть: твердых абразивов, неабразивных материалов, жидких наполнителей в виде водных растворов с различного рода добавками (моющие, разделяющие, травящие, пассивирующие и др.). На виброустановках обрабатывается широкая номенклатура деталей (крепезж, корпуса, соединительная арматура, валики, лопатки и др.).

Особый интерес представляет дальнейшее развитие и широкое применение технологии быстрого изготовления заготовок деталей, получаемых точным литьем в оболочковые формы на базе систем быстрого прототипирования [3].

Система быстрого прототипирования позволяет получать физическую копию трехмерной компьютерной модели детали любой сложности, запроецированной с помощью различных систем САПР.

В основе этой технологии лежит процесс выращивания физической копии компьютерной модели последовательно отверждением полимерной жидкости (метод стериолитографии) или из слоев ламинированной бумаги, фольги путем ее послойного раскроя лучом лазера с последующим термопрессованием слоев (метод тонких пленок).

При использовании традиционной технологии нужны две металлические пресс-формы: модельная и стержневая, очень дорогостоящие и трудоемкие.

Применение же систем быстрого прототипирования позволяют сократить до 70 % время и трудоемкость создания прототипа изделия; создается полная индивидуализация прототипа, а сам технологический процесс является экологически чистым и безотходным.

Технологическая ниша данных технологий — изготовление опытных образцов и первых комплектов деталей, отработка конструктивных вариантов изделий сложной формы.

Размерная обработка является определяющей в цепочке технологических переделов, так как она в основном обеспечивает реализацию замысла конструктора по созданию деталей с заданными служебными свойствами. Кроме этого совершенствование технологии размерной обработки, на долю которой приходится не менее 40 % общей трудоемкости изготовления машин (около 80 % их деталей подвергаются размерной обработке), определяет технический прогресс в машиностроении.

Основные направления развития технологии размерной обработки, учитывающие как организационные технические факторы, так и рабочие процессы размерной обработки:

- разработка новых принципов организации технологии, дающих возможность управлять ее параметрами и структурой в цикле проектирования и изготовления;
- интенсификация и повышение качества за счет новейших и синтеза существующих рабочих процессов;
- создание новых прогрессивных средств технологического оснащения (оборудование, оснастка, инструмент), в том числе гибких модулей.

Основные направления развития обработки резанием связаны с ее интенсификацией за счет новейших и синтеза существующих методов обработки. Основная тенденция — смещение технологических показателей в размерной обработке в направлении более высокой степени точности и качества в результате изменения соотношения отдельных видов обработки. Уменьшается объем токарной обработки за счет внедрения абразивной обработки, увеличивается доля прецизионного шлифования и, напротив, внедрение лезвийной обработки сверхтвердыми материалами может вытеснить абразивную обработку.

В то же время, лезвийная обработка будет использовать методы сверхскоростного резания, позволяющего повысить скорости и подачи в несколько раз по сравнению с существующими на сегодняшний день. Так, например, для фрезерования до 100 м/с и 14000 мм/мин.

Соответственно, новый уровень финишной обработки может быть достигнут на основе развития триботехнологии. Триботехнология финишной обработки обеспечивает создание практически безизносных пар трения за счет комбинированного воздействия алмазно-абразивного, деформирующего и антифрикционного инструмента, обеспечивающего управление как геометрическими, так и физико-химическими параметрами поверхности. При этом обеспечивается повышение ресурса пар трения в 3–10 раз.

В области электрохимической обработки (ЭХО) и электрофизической обработки (ЭФО), и комбинированных методов обработки можно отметить следующие основные тенденции развития:

- более широкое использование комбинированных методов шлифования на основе использования традиционных методов, электроэрозионных (ЭЭ) и электрохимических (ЭХ) методов обработки, эрозионно-химической обработки, совмещение ультразвуковой и ЭЭ обработки;

- применение плазменно-механической обработки, обеспечивающей повышение производительности в 1,2–10 раз, и стойкости режущего инструмента в 2–5 раз [4].

При обработке ювенильных, (сверхгладких и сверхчистых) поверхностей деталей с субмикронной точностью применяются методы нанотехнологии, базирующейся на принципиально новых физико-химических процессах размерной обработки, обеспечивающих шероховатость в тысячных долях мкм.

В области технологической оснащенности перспективы технического совершенствования автоматизированных производств требуют создания гибких средств технологического оснащения. Материальной базой в данном случае является система переналаживаемой технологической оснастки (ПТО).

Рассматривая перспективы теории и практики размерной обработки, следует считать, что их теоретическими основами являются последние достижения фундаментальных наук, которые дают возможность применять для изготовления машин все многообразие возможных физико-химических явлений; особо эффективны разработки по созданию комбинированных методов обработки, использующих последовательное или одновременное воздействие ряда механических, электрических, магнитных процессов.

В ряде изделий предприятий отрасли применяются сложно рельефные детали из высокопрочных и трудно деформируемых материалов и сплавов, изготавливаемые методами глубокой вытяжки и рельефной формовки в несколько переходов с последующим выполнением различных разделительных операций: вырубки, пробивки, обрезки по контуру и т. д. Изготовление комплектов крупногабаритных штампов для производства этих деталей связано с большими техническими трудностями, а в ряде случаев экономически нецелесообразно. Время их изготовления может составлять от 8 месяцев до 1 года, что совершенно не соответствует быстрой сменяемости объектов производства.

В настоящее время при производстве сложно профильных деталей все шире применяются высокоэнергетические методы штамповки, наиболее перспективным из которых является метод ударной импульсной штамповки, осуществляемый с энергией до 63 кДж. Отличительной особенностью метода является осуществление деформирования материала импульсом высокого давления. Дальнейшее развитие и широкое внедрение данного метода сдерживается из-за отсутствия технологического оборудования большой мощности.

Наиболее перспективными направлениями в области технологии и оборудования для ударной импульсной штамповки являются:

- разработка гидроударного и пневмоударного оборудования с энергией импульса 75–100 кДж, работающего в автоматическом и полуавтоматическом режиме (габаритные размеры штампуемых деталей — 750×1000 мм);

– разработка технологии получения сложно профильных деталей за один переход в одной матрице с доведением толщины штампуемого металла для трудно деформируемых малопластичных материалов до 3,0 мм, а легированных — до 6,0 мм;

– интенсификация процессов ударной импульсной штамповки за счет использования пластифицирующих покрытий на основе меди и цинка;

– расширение номенклатуры деталей, штампуемых полиуретаном на ударном оборудовании.

Применение метода ударной импульсной штамповки позволит сократить сроки, технологической подготовки производства за счет простоты и дешевизны штамповой оснастки в 2–3 раза, уменьшить стоимость и количество необходимых штампов в 3–5 раз, снизить их металлоемкость на 50–80 %.

Выводы. Путем реализации предложенных решений предусматривается радикально повысить технический и технологический уровень производства, существенно повысить надежность и долговечность деталей машин и оборудования, снизить металлоемкость и трудоемкость изготовления технологической оснастки, обеспечить экономию конструкционных, быстрорежущих и инструментальных сталей, сократить сроки технологической подготовки производства, создать технологические заделы для разработки техники нового поколения.

Литература

1. Мовшиович А.Я. Основные тенденции развития высоких технологий в машиностроении [Текст] / А.Я. Мовшиович // Сб. науч. тр. НТУ «ХПИ». – 2001. – Вып. 11. – С. 8–11.

2. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент [Текст] / Ю.Н. Внуков, А.А. Марков и др. – К.: Техника, 1992. – 143 с.

3. Товажнянский Л.Л. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления [Текст]: моногр. / Л.Л. Товажнянский, А.И. Грабченко, С.И. Чернышови др.: под. ред. Товажнянского Л.Л., Грабченко А.И. – 2-е изд., перераб. и доп. – Х.: Модель Вселенной, 2005. – 224 с.

4. Фролов С.А. Технологічні аспекти керування якістю виробів машинобудування [Текст]: моногр. / С.А. Фролов, В.В. Муравльов, О.В. Нижник та ін.: під ред. С.А. Фролова. – Х.: ТОВ «Щедра садиба плюс», 2014. – 240 с.: іл.

© Е.А. Фролов, С.И. Кравченко, О.Г. Носенко

*С.А. Фролов, д.т.н., проф., С.И. Кравченко, к.т.н., доц., О.Г. Носенко, асп.
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка*

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МАШИНОБУДУВАННІ

Приведені рішення підвищення технічного і технологічного рівнів виробництва, суттєвого підвищення надійності і довговічності деталей машин та обладнання, зниження металоємкості та трудомісткості виготовлення технологічного оснащення.

Ключові слова: високі технології, якість поверхні, нанесення й отримання покриттів, надійність, довговічність, швидке прототипування, технологія розмірної обробки, технологічне оснащення.

*Ye.A. Frolov, Doctor of Technical Sciences, Professor, S.I. Kravchenko, Ph.D., Associate Professor, O.G. Nosenko, Post-graduate student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

THE MAIN TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF HIGH TECHNOLOGY IN ENGINEERING

Decisions of increasing technical and technological levels of production, substantial increasing of reliability and longevity of details of machines and equipment, reduction of metal intensiveness and labour intensiveness of making the technological equipment were brought.

Keywords: high technologies, quality of surface, causing and receipt of coverages, reliability, longevity, rapid prototyping, technology of size treatment, technological equipment.

*Е.А. Фролов, д.т.н., проф., С.Г. Ясько, асп., А.М. Пирнат, ассист.
Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка*

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ (ГПС)

Рассмотрено состояние применяемой переналаживаемой оснастки для гибких производственных систем (ГПС), на основании чего предложена концепция и перспектива ее развития в условиях многономенклатурного механообрабатывающего автоматизированного производства. Определены области применения различных типов технологического оснащения многократного применения с более высоким уровнем унифицирования и степенью гибкой автоматизации.

Ключевые слова: *гибкая производственная система (ГПС), обратимая переналаживаемая оснастка, наладка, сборка, механообработка.*

Введение. Независимо от принципа построения и уровня осуществления эффективность использования гибких систем механообрабатывающего производства в значительной степени зависит от технического уровня и возможностей применяемой оснастки. К приспособлениям, применяемым для оснащения гибкого производства, предъявляются требования, обусловленные его спецификой. Как правило, такое производство используется для обработки широкой номенклатуры деталей (Германия — 50...250, Япония — 7...130, США — 4...10, остальные страны Западной Европы — 4...15) небольшими партиями, что характерно для мелко- и среднесерийного производства. Следовательно, элементы, входящие в систему, должны обладать высокой гибкостью. Все это привело к определенному прогрессу в развитии конструкций переналаживаемой технологической оснастки для многооперационных станков и ГПС, изыскания путей повышения их работоспособности и долговечности, переходу от неразборных специальных приспособлений к более прогрессивным приспособлениям многократного применения, совершенствованию форм и методов их эксплуатации.

Этим требованиям в наибольшей степени отвечают агрегатированные модульные быстропереналаживаемые приспособления, komponуемые из унифицированных базовых, опорных, зажимных, установочных и других устройств. Такие компоновки приспособлений, в отличие от специальных необратимых, обеспечивают возможность базирования и закрепления изделий различной формы и размеров.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ функционирующих в настоящее время ГПС, изучение информационных материалов, опыта разработки и эксплуатации ГПС в Украине и за рубежом показывает, что для технологического оснащения ГПС могут применяться с той или иной степенью эффективности разновидности приспособлений, которые целесообразно объединить под общим понятием «обратимые приспособления для ГПС» [1–4].

Цель исследований — разработка концепции развития ГПС для многономенклатурных автоматизированных производств.

Основной материал статьи. Обратимые приспособления для ГПС подразделяются на два класса: 1) обратимые приспособления, предназначенные для ГПС со спутниковой системой оснащения; 2) обратимые приспособления, предназначенные для ГПС с беспутниковой системой оснащения.

В спутниковую систему оснащения входят наладочные (НП), сборные (СП) и унифицированные (УП) приспособления; в беспутниковую систему оснащения входят автоматически переналаживаемые приспособления с ЧПУ. В свою очередь наладочные приспособления подразделяются на универсальные наладочные (УНП) и специализированные

наладочные (СНП) приспособления, а сборные приспособления — на универсально-сборные и сборно-разборные приспособления.

Кроме вышеуказанных четырех видов приспособлений, для оснащения ГПС широкое распространение получили или получают еще два вида обратимой оснастки: унифицированные приспособления (УП) и автоматически переналаживаемые приспособления с ЧПУ. Унифицированные приспособления входят в спутниковую систему оснащения, автоматически переналаживаемые приспособления с ЧПУ образуют беспутниковую систему оснащения.

УНП наибольшее применение получили в условиях мелко- и среднесерийного производства. Они представляют собой разборные станочные приспособления многократного применения и предназначены для обработки не только однотипных или близких по форме деталей, но и деталей, входящих в разные классы. Компоновка УНП состоит из базовой части, универсальной по схемам базирования и конструктивным формам устанавливаемых заготовок, и специальной сменной наладки. Благодаря наличию специальных сменных наладок, воспринимающих особенности формы конкретной заготовки, номенклатура деталей, устанавливаемых в УНП, может быть значительно расширена по сравнению с номенклатурой деталей, обрабатываемых в необратимых специальных и универсально-безналадочных приспособлениях, входящих в системы технологической оснастки. К УНП относятся: базисные части УНП для обработки различных групп деталей; универсальные патроны со сменными кулачками; универсальные тиски со сменными губками; скальчатые кондукторы и т. п. В ряде случаев для оснащения функционирующих в настоящее время ГПС УНП находят самое широкое применение.

СНП наиболее эффективны в условиях среднесерийного и крупносерийного производства. Представляют собой разборные станочные приспособления многократного применения для закрепления заготовок, близких по конструктивно-технологическим признакам, объединенных общностью базовых поверхностей и характером обработки. Компоновка СНП состоит из базовой части, специализированной по схемам базирования типовых групп обрабатываемых заготовок, и сменной наладки. Кроме того, СНП могут иметь и регулировочные элементы, то есть могут быть комбинированными. От УНП они отличаются, как правило, более высокой степенью механизации. При групповом методе обработки СНП находят самое широкое применение для оснащения ГПС.

Главные достоинства УНП и СНП в следующем: 1) приближение по точности, габаритам, весу и удобству в работе к необратимой специальной оснастке, что обеспечивает их конкурентоспособность; 2) жесткость конструкций, создаваемых из неразборных узлов и минимального количества элементов; 3) применение методов фиксации деталей и сборочных единиц посредством отверстий и пальцев, что гарантирует стабильность получения размеров при обработке крупных партий деталей; 4) возможность широкой механизации приспособлений за счет применения быстродействующих съемных зажимных устройств, устанавливаемых на базисную часть приспособления методом агрегатирования.

Область применения наладочных приспособлений охватывает все типы производства. По состоянию готовности к использованию они близки к лучшим образцам специальной станочной неразборной оснастки. Сочетание этих положительных качеств при правильной организации внедрения обеспечивает высокую эффективность их применения, особенно при оснащении ГПС. К недостаткам наладочных приспособлений следует отнести необходимость проектирования и изготовления специальных сменных наладок или наладочных регулируемых элементов. В качестве силового органа, обеспечивающего механизированное закрепление обрабатываемых деталей, в конструкциях наладочных приспособлений технологически и экономически более целесообразно применять агрегатные средства механизации, изготавливаемые серийно. В систему СП входят универсально-сборные и сборно-разборные приспособления (УСП и СПП).

УСП — наиболее распространенная система станочных приспособлений многократного применения на машиностроительных предприятиях, являются общемашинострои-

тельным видом оснастки. УСП применяются в основном в единичном и мелкосерийном производстве. Представляют собой разборные станочные приспособления многократного применения. Компоновка УСП собирается из заранее изготовленных стандартных деталей и сборочных единиц высокой точности и прочности для выполнения одной (иногда нескольких) деталиеоперации и не требует дополнительной механической обработки.

В основу конструкций всех элементов УСП заложены принципы универсальности, взаимособираемости без пригонки, долговечности и многократности применения при эксплуатации и различных компоновках станочных приспособлений. Поэтому к материалам, точности и шероховатости обработанных поверхностей предъявляются повышенные требования.

Для изготовления наиболее ответственных деталей УСП применяют высококачественные стали с высокими механическими свойствами. Это позволяет увеличить срок службы основных дорогостоящих элементов до 12...15 лет. Для обеспечения полной взаимозаменяемости, собираемости и длительного срока эксплуатации большое значение имеют точность и шероховатость поверхности элементов УСП. Системы УСП в ряде случаев довольно успешно применяются для оснащения ГПС.

СРП являются разновидностью оснастки многократного применения, предназначенной для крупносерийного и массового производства. Представляют собой станочные приспособления, собираемые для выполнения одной (иногда нескольких) деталиеопераций из заранее изготовленных стандартных деталей и сборочных единиц нормальной точности и прочности. При необходимости получения на обрабатываемых деталях размеров повышенной точности производится доработка поверхностей, контактирующих с обрабатываемой деталью. Такими поверхностями, как правило, являются опорные поверхности специальной сменной наладки. СРП наиболее эффективны в условиях производства изделий, находящихся в стадии непрерывного совершенствования, или изделий с периодом изготовления до полутора лет в тех случаях, когда станок постоянно загружен выполнением одной или нескольких деталиеопераций и не требует переналадки.

В компоновках СРП в отличие от УСП количество сборочных единиц преобладает над деталями, что позволяет уменьшить количество стыков при сборке приспособления. В результате этого повышается жесткость конструкций приспособлений. Переналадка приспособлений из элементов СРП осуществляется посредством перекомпоновки, регулирования положения базирующих зажимных элементов и замены сменных наладок.

Компоновки СРП могут применяться для технологического оснащения ГПС.

Для оснащения ГПС широкое распространение получили системы унифицированных приспособлений, объединяющих характерные особенности наладочных и сборных приспособлений. Как и наладочные приспособления, такая система включает в свой состав базовые конструкции, устанавливаемые на сменных палетах станка, и наладки, устанавливаемые на базовых конструкциях. Однако, в отличие от НП, сменные наладки которых воспринимают особенности формы каждой заготовки, наладки такой системы выполняются универсальными; либо с сетками высокоточных установочных и крепежных отверстий, либо с сеткой Т-образных установочных и крепежных пазов. Благодаря универсальности наладки появляется возможность повторной применяемости ее для установки других заготовок, что является характерным для СП. Кроме того, как и в СП, системы унифицированных приспособлений включает в свой состав универсальные позиционирующие и зажимные элементы.

Базовые приспособления выполняются, как правило, горизонтального и вертикального исполнения в виде плиты или угольника, на которых установлены позиционирующие и зажимные устройства для базирования и закрепления универсальных наладок. Габаритные размеры базовых приспособлений увязаны с габаритными размерами сменных палет и техническими возможностями станков.

В зависимости от степени гибкой автоматизации, способа транспортирования и установки на станках обрабатываемых деталей оснащенность ГПС унифицированными приспособлениями может осуществляться двумя направлениями. В случае реализации перво-

го направления оснащённость ГПС осуществляется следующим образом. Базовые приспособления с постоянно закрепленными на них универсальными наладками, образуя приспособление-спутник, устанавливаются и жестко закрепляются на сменных палетах станка. Необходимое количество палет и приспособлений-спутников для работы одного станка в автоматизированном режиме, в зависимости от времени обработки, составляет от 4 до 12 шт. Обрабатываемые детали на станции загрузки устанавливаются на приспособления-спутники. Транспортирование палеты с приспособлением-спутником и закрепленной на нем обрабатываемой деталью осуществляется автоматически с помощью транспортера, самоходных тележек или промышленных роботов. Замена палет производится устройствами автоматической смены палет, устанавливаемых возле каждого станка, встроенного в ГПС. Хранение палет осуществляется либо в специальном автоматизированном складе, либо в специальных накопителях, расположенных рядом со станком.

ГПС, построенные по такому принципу оснащения, в настоящее время получили наибольшее распространение, так как могут осуществлять обработку деталей различных конфигураций и размеров. В то же время существенным недостатком их является то, что при оснащении унифицированными приспособлениями такого типа, как и при оснащении указанных ранее видов переналаживаемой оснастки для ГПС, требуется большое количество трудоемких в изготовлении и материалоемких сменных палет и приспособлений-спутников. В результате этого существенно увеличиваются сроки и стоимость оснащения, требуются большие площади складов-накопителей и большая грузоподъемность транспортных средств.

При реализации второго направления развития унифицированных приспособлений для ГПС указанные недостатки устраняются. В этом случае оснащение ГПС осуществляется следующим образом. Базовые приспособления устанавливаются и постоянно закрепляются на двух сменных палетах станка. Однако, в отличие от базовых приспособлений 1-го направления, конструкция приспособления 2-го направления позволяет автоматически базировать и закреплять универсальные сменные наладки (плиты-спутники) с обрабатываемыми деталями. Обрабатываемые детали на станции загрузки устанавливаются на универсальные сменные наладки, которые посредством промышленного робота или другого транспортного средства транспортируются к станку и устанавливаются на базовом приспособлении в позиции загрузки станка. В ГПС, построенных по такому принципу оснащения, возможна обработка деталей, различных по конфигурации и размерам. В то же время данный вариант оснащения позволяет уменьшить количество сменных палет и базовых приспособлений на один станок до двух штук. За счет этого уменьшаются сроки и стоимость оснащения, площади складов-накопителей и грузоподъемность транспортных средств. Значительные капитальные и текущие затраты при применении приспособлений-спутников вызвали необходимость создания таких транспортных систем, в которых транспортирование и установка заготовок осуществляется без спутников (беспутниковая система оснащения).

Применение приспособлений, устанавливаемых на сменных палетах станка, имеет следующие недостатки: 1) большие затраты на оснащение ГПС, вызванные необходимостью иметь в наличии большое количество палет и приспособлений-спутников; 2) ограниченной инструментальной доступностью, так как базирующие, установочные и зажимные элементы препятствуют доступу инструмента ко всем обрабатываемым поверхностям. Это вызывает необходимость увеличения количества переустановок заготовок в приспособлениях-спутниках, а обработку заготовок производить за два-три цикла; 3) использование приспособлений-спутников не обеспечивает высокой гибкости комплексно-автоматизированных участков из-за невозможности свободного изменения последовательности обработки заготовок; 4) наличие значительного количества рабочих, занятых сборкой-разборкой приспособлений-спутников, при обработке заготовок в мелкосерийном производстве и последовательной обработке различных заготовок минимальными партиями, а также большого количества слесарно-сборочных мест; 5) большие затраты времени и необходимость наличия рабочих, занятых загрузкой приспособлений-спутников, так как опыт использования ГПС показывает,

что закрепление заготовок в приспособлениях-спутниках осуществляется в подавляющем большинстве случаев с применением ручных зажимов.

Все это привело к поиску и разработке таких систем автоматически переналаживаемых приспособлений с ЧПУ, переналадка установочных и зажимных элементов которых (регулирование их положения по трем осям координат при смене объекта обработки) осуществляется без участия человека в любой последовательности по заданной программе, в которую вводят данные о типе и необходимости положения заготовки.

Выводы. Автоматически переналаживаемые приспособления являются универсальными и обеспечивают высокую гибкость производства. По мнению отечественных и зарубежных специалистов, они по мере своего развития могут вытеснить приспособления-спутники. В результате их применения будут созданы новые гибкие автоматизированные технологические системы с высокой степенью загрузки в автоматизированных производствах.

Литература

1. Жолткевич Н.Д. Обратимая технологическая оснастка для ГПС [Текст] / Н.Д. Жолткевич и др. – К.: Техника, 1992. – 216 с.
2. Жолткевич Н.Д. Конструктивно-технологические требования к переналаживаемой технологической оснастке (ПТО) [Текст] / Н.Д. Жолткевич // Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 63. – С. 5-12.
3. Ряховский А.В. Научные основы конструирования технологической оснастки для автоматизированных производств [Текст] / А.В. Ряховский // Высокие технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Вып. 1. – Х., 2005. – С. 3-6.
4. Капустин Н.М. Комплексная автоматизация в машиностроении [Текст] / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, Н.П. Дьяконова. – М.: изд. центр «Академия», 2005. – 368 с.

© Е.А. Фролов, С.Г. Ясько, А.М. Пирнат

Є.А. Фролов, д.т.н., проф., С.Г. Ясько, асп., А.М. Пирнат, асист.
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНОВОГО ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ (ГВС)

Розглянуто стан переналагоджуваного оснащення, що застосовується для гнучких виробничих систем (ГВС), на підставі чого запропоновано концепцію і перспективу його розвитку в умовах багатонаменклатурного механообробного автоматизованого виробництва. Визначено галузі застосування різних типів технологічного оснащення багаторазового застосування з більш високим рівнем уніфікації і ступенем гнучкої автоматизації.

Ключові слова: гнучка виробнича система (ГВС), оборотне переналагоджуване оснащення, налагодження, складання, механообробка.

*Ye.A. Frolov, Doctor of Technical Sciences, Professor, S.G. Yasko, Post-graduate student,
A.M. Pirnat, Assistant*

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

STATUS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF RECONFIGURABLE TOOLING FOR FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS (FMS)

The state of the applied reconfigurable tooling for flexible manufacturing systems (FMS), which is proposed on the basis of the concept and the prospect of its development in the context of automated machining multiproduct production was reviewed. Defined the scope of the various types of technological equipment for multiple applications with a high degree of alignment and flexible automation.

Keywords: flexible manufacturing system (FMS), reversible reconfigurable tooling, setup, assembly, machining.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СБОРОЧНО-СВАРОЧНОЙ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

На основании опыта внедрения и эксплуатации определены и классифицированы основные факторы, влияющие на работоспособность и долговечность универсальных переналаживаемых сборочно-сварочных приспособлений. Полученные результаты позволяют разработать методологию определения оптимального состава покрытия с учетом критериев надежности и основных технологических факторов сборочно-сварочной оснастки.

Ключевые слова: сборочно-сварочная переналаживаемая оснастка, долговечность, защитное покрытие, отказ, факторы влияния.

Введение. Производство сварных конструкций, как и изделий в целом, требует применения значительного количества технологической оснастки. Анализ показал, что при оснащении технологических процессов производства сварных конструкций основных изделий отрасли проектируется и изготавливается от 2 до 7 тыс. единиц оснастки по каждому изделию. Длительность цикла оснащения занимает от 1,5 до 4 лет, что влияет на освоение и подготовку производства изделий.

Анализ последних исследований и публикаций. Опыт передовых предприятий показывает, что одним из эффективных путей резкого сокращения затрат и сроков на подготовку и освоение производства сварных конструкций изделий является широкое применение переналаживаемой технологической оснастки.

В условиях единичного и мелкосерийного производства — это универсально-сборные приспособления из стандартных элементов для сборочно-сварочных работ (УСПС) с диаметром крепежного элемента 8, 12, 16 мм, применяемых в зависимости от габаритов сварных конструкций [1–4].

Для серийного производства — переналаживаемая оснастка (УСРП-С), обладающая универсальностью и возможностью переналадки приспособлений, что и УСПС, и в то же время отвечающая требованиям, предъявляемым к специальной технологической оснастке.

С инженерной точки зрения УСПС и УСРП-С представляют собой набор (комплект) стандартных и заранее изготовленных с необходимой точностью деталей и сборочных единиц, из которых многократно собираются компоновки приспособлений для изготовления сварных конструкций различных классов: плоских, трубчатых, рамных, балочных, деталей машин (кронштейнов, рычагов, стоек) и др.

Особенностью эксплуатации сборочно-сварочной оснастки является то, что поверхности деталей и сборочных единиц приспособлений в течении определенного времени подвергаются технологическому износу при сборке самих приспособлений, установке и закреплению элементов сварной конструкции, а также воздействию сварочных брызг при выполнении сварочных операций [5, 6].

Долговечность сборочно-сварочной переналаживаемой оснастки в случае многократного применения в серийном производстве зависит от многообразия факторов, возникающих в процессе ее эксплуатации. В настоящее время вопросы надежности и долговечности оснастки не получили широкого освещения в литературе.

Целью данного исследования было определение и классифицирование основных факторов, влияющих на долговечность эксплуатации сборочно-сварочной оснастки.

Основной материал статьи. В таблице 1 приведены основные факторы, влияющие на долговечность сборочно-сварочных приспособлений.

Таблица 1. Факторы, влияющие на долговечность сборочно-сварочных приспособлений

Наименование фактора	Вид фактора		Характер действия	Степень влияния
	Конструктивный	Технологический		
<i>Механическое воздействие</i>				
Материал, из которого изготовлены приспособления	+		Систематический	Существенная
Термическая обработка поверхностей оснастки		+	Систематический	Существенная
Величина заусенцев на торцах элементов сварных конструкций	+		Случайный	Малая
Масса собираемых конструкций	+		Систематический	Существенная
Величина перемещения элементов при сборке приспособления и установке сварных деталей		+	Систематический	Малая
<i>Воздействие сварочных брызг</i>				
Пространственное расположение поверхностей оснастки относительно сварочной дуги (вертикальное, горизонтальное, под углом)	+		Систематический	Доминирующая
Расстояние поверхности элементов оснастки от сварочной дуги	+		Систематический	Доминирующая
Вид, способ, тип защиты поверхностей		+	Систематический	Доминирующая
Повторяемость защитных операций		+	Случайный	Существенная
Вид сварки		+	Систематический	Существенная
Марка сварочных электродов или проволоки		+	Систематический	Существенная
Режимы сварки		+	Случайный	Малая
Время воздействия брызг металла на поверхность приспособлений		+	Систематический	Доминирующая
Материал, на который наносится покрытие	+		Систематический	Доминирующая
Толщина наносимой пленки защитного покрытия		+	Систематический	Доминирующая

Из табл. 1 следует, что разрушение поверхностей сборочно-сварочных приспособлений при трении (сборке приспособлений, установке и закреплении элементов металлокон-

струкций) происходит в виде отдельных элементарных процессов. Эти элементарные разрушения представляют собой микрорезание, царапание, глубинное вырывание.

При эксплуатации сборочно-сварочной оснастки наиболее распространенным видом повреждения рабочих поверхностей является микрорезание и царапание. Известно, что стальные поверхности при трении проявляют тем меньшую склонность к задиру, чем больше разница в их термической обработке и твердости.

Разрушение поверхностей при тепловом износе (воздействие сварочных брызг) происходит в виде сваривания (сплавления) брызг металла с рабочей поверхностью и зависит от разбрызгивания металла, одного из наиболее существенных недостатков электродуговой сварки.

Мерой долговечности поверхностей сборочно-сварочной оснастки является интенсивность отказов. При этом под отказом, в нашем случае, подразумевается явление, состоящее в полном износе защитной пленки. Все отказы, возникающие при эксплуатации приспособлений, можно разделить на три характерных типа (исключая повреждения, причиненные неправильной эксплуатацией или небрежным хранением). К первому типу отнесены отказы, которые происходят в начальный период эксплуатации оснастки (прирабочные отказы). Они исключаются так называемым пусковым периодом эксплуатации приспособления. Ко второму типу отказов отнесены так называемые внезапные отказы, которые возникают вследствие внезапной концентрации нагрузок и ударов, и не возникают при правильной эксплуатации приспособлений.

К наиболее существенным относится третий тип отказов — износный (табл. 2). Данные виды отказов вызываются износом поверхностей деталей и сборочных единиц обрабатываемых приспособлений при тепловом воздействии сварочных брызг и многократном перемещении элементов, элементов и изделий относительно друг друга. Они возникают постепенно и в большей степени зависят от правильного соблюдения условий эксплуатации и влияния ряда технологических факторов, исследование которых дает возможность реально оценить надежность и долговечность рабочих поверхностей сборочно-сварочной оснастки, а следовательно и оснастки в целом.

Таблица 2. Классификация износных отказов поверхности деталей и сборочных единиц сборочно-сварочной оснастки

Вид отказа	Характер проявления отказа	Характер изменения рабочих параметров оснастки
Износ защитной пленки поверхности элементов	Изменение толщины защитной пленки, потеря точности сборки приспособления, забоины, задиры. Изменение состояния поверхности элементов	Постоянный
Прогар защитной пленки поверхности элементов	Изменение толщины защитной пленки, сплавление сварочных брызг с поверхностью оснастки, контакт сварочного электрода (проволоки) с поверхностью оснастки, потеря точности сборки приспособления, отсутствие сборки сопрягаемых элементов	Постепенный
Прогар защитной пленки, сплавление сварочной капли с поверхностью элементов	Неплотное прилегание элементов оснастки друг к другу, отсутствие собираемости, отсутствие токопровода к изделию, сплавление между поверхностями элементов приспособления и изделия, между самими элементами приспособлений	Постепенный, внезапный

Следует отметить, что вопросы надежности и долговечности сборочно-сварочной оснастки, в том числе и их поверхностей, не получили широкого освещения в литературе. Отсутствуют данные, касающиеся методики исследования надежности и долговечности поверхностей оснастки, не найден состав защитного покрытия, удовлетворяющий требованиям надежности и долговечности защиты поверхностей, не установлены основные критерии, определяющие срок службы защитных покрытий.

Вывод. Полученные результаты позволяют разработать методологию исследования надежности и долговечности защитных средств по определению оптимального состава покрытия на основе изучения и учета критериев надежности и основных технологических факторов, возникающих в процессе эксплуатации сборочно-сварочной оснастки и влияющих на ее работоспособность.

Литература

1. Гитлевич А.Д. *Механизация и автоматизация сварочного производства* [Текст] / А.Д. Гитлевич, Л.А. Этингер. – М.: Машиностроение, 1979. – 280 с.
2. Крампит Н.Ю. *Сварочные приспособления: учеб. пособ.* [Текст] / Н.Ю. Крампит, А.Г. Крампит. – ЮТИ ТПУ – 2008 – 95 с.
3. Рымов Е.В. *Новые сварочные приспособления* [Текст] / Е.В. Рымов. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 125 с.: ил.
4. *Универсально-сборные приспособления с пазами 8, 12, 16 мм для сборно-сварочных работ* [Текст] / Н.Д. Жолткевич, Л.С. Филатов, В.И. Глуценко и др. – М.: ЦНИИ информ., 1982. – 116 с.
5. *Конструкции универсальных сборно-разборных приспособлений для сборочно-сварочных работ (УСРП-С)* [Текст] / А.Я. Мовшиович, К.А. Изотова, Ю.А. Черная, О.В. Бондарь // *Машиностроение: сб. науч. трудов УИПА.* – Вып. 9, 2012. – С. 148-161.
6. Жолткевич Н.Д. *Конструктивно-технологические требования к переналаживаемой технологической оснастке (ПТО)* [Текст] / Н.Д. Жолткевич // *Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та.* – 1999. – Вып. 63. – С. 5-12.

© О.В. Бондарь

О.В. Бондар, асп.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗБІРНО-ЗВАРНОГО ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ

На основі досвіду впровадження й експлуатації визначено та класифіковано основні фактори, що впливають на працездатність і довговічність універсальних переналагоджуваних збірно-зварних пристосувань. Отримані результати дозволяють розробити методологію визначення оптимального складу покриття з урахуванням критеріїв надійності та основних технологічних факторів збірно-зварного оснащення.

Ключові слова: збірно-зварне переналагоджуване оснащення, довговічність, захисне покриття, відмова, фактори впливу.

O.V. Bondar, Post-graduate student

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

IDENTIFICATION OF FACTORS THAT AFFECT THE LONGEVITY OF THE FRAME-CLAMPING-WELDING RECONFIGURABLE TOOLING

Based on the experience of implementation and operation are defined and classified the main factors affecting the performance and longevity of universal re-adjustable frame-clamping-welding fixtures. The obtained results allow us to develop a methodology to determine the optimal composition of the coating according to the criteria of reliability and the main technological factors of frame-clamping-welding equipment.

Keywords: frame-clamping-welding reconfigurable tooling, longevity, protective coating failure, factors of influence.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗОВЫХ ПЛИТ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований методом статической тензометрии напряженно-деформированного состояния базовых плит штамповых блоков из композиционного материала на основе стеклоткани марки КТ-П и пластмассы АС-4.

Ключевые слова: эксперимент, базовая плита, штамповый блок, композит, тензометрия.

Введение. Успешное решение экономических и социальных задач непрерывно связано с использованием достижений научно-технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства и прежде всего в машиностроении, приборостроении и других металлообрабатывающих отраслях промышленности. При этом, как показывает мировая практика, приоритетным направлением становится внедрение прогрессивных технологических процессов. Технология является центральным связующим звеном цепочки «наука–производство». Классические принципы получения деталей путем последовательной обработки заготовки режущим инструментом все больше заменяются методами пластического деформирования и, в частности, методами обработки давлением. Технический уровень листоштамповочного производства на металлообрабатывающих предприятиях определяет такую структуру технологической подготовки выпуска новых изделий, при которой затраты на изготовление штамповой оснастки составляют 35 %, что лишь немногим уступает затратам на технологическую оснастку для металлообработки и сборки. Поэтому задача создания конструкции оснастки, обеспечивающей необходимую прочность, жесткость, стойкость и позволяющую производить быструю переналадку при изменении номенклатуры штампуемых деталей, является первостепенной.

Условия универсальности, компактности, мобильности, прочности штампов, а также требований снижения металлоемкости являются исходными при разработке новых конструкций и предполагают проведение необходимых теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния основных конструктивных элементов.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время во всех существующих типах и разновидностях штампов для холодной листовой штамповки базовые плиты являются основными элементами, на которые монтируются узлы и детали конструктивного и технологического назначения. В основном базовые плиты представляют собой прямоугольные пластины постоянной толщины, вес которых составляет примерно 60 % от веса всего штампа. Традиционно плиты штампов изготавливают из инструментальных сталей, однако применение новых материалов, обладающих наряду с высокой прочностью и жесткостью малым удельным весом и низкой стоимостью, позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели при меньшей стоимости и позволяет облегчить механообработку. Материалами, позволяющими выполнить все перечисленные выше требования, являются композиционные материалы.

Современный композиционный материал состоит из сплошной среды — матрицы, как правило, обладающей пластическими свойствами и размещенных в ней прочных волокон, нитей, кристаллов, выполняющих роль арматуры. В качестве матриц чаще всего применяют полимерные смолы, термопласты, алюминий и другие пластические материалы [1]. Одним из наиболее распространенных в настоящее время композитов является

стеклопластик. Некоторые стеклопластики превосходят по прочности конструкционные стали и легче их в три раза.

Для определения возможности использования композиционных материалов при изготовлении базовых плит штампов были проведены специальные теоретические и экспериментальные исследования. Исследовались плиты штамповых блоков, изготовленные из композиционного материала, основой которого явилась стеклоткань марки КП-Т (ТУ-6-11-59-67), а в качестве связывающего использовалась фенолформальдегидная смола АС-4 (ГОСТ 901-70).

Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния композиционных плит штамповых блоков [2-3] проводились методом конечных элементов. Полученные в процессе исследований значения перемещений и напряжений позволили получить зависимость максимальных прогибов W и эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{э}}$ от относительной (отношение толщины h к ширине A) толщины плиты при различных значениях условия штамповки. Проведенные исследования позволяют по значениям допускаемых напряжений или прогибов определять значение толщины композиционной плиты.

Цель работы — подтверждение правильности полученных теоретических зависимостей путем проведения экспериментальных исследований композиционной плиты методом статической тензометрии.

Изложение основного материала исследований. Исследования прочности и жесткости плит проводились как на моделях для наиболее тяжелого варианта напряжения, а именно для центрального приложения нагрузки, так и на натуральных образцах штампов.

Натурные испытания плит из композиционных материалов проводились на реальных штампах, предназначенных для вырубki деталей на провал. Для конкретно штампуемой детали «Петля» с максимальными размерами в плане 92×69 мм и толщиной металлической плиты 2,5 мм, штамп в сборе с пакетом устанавливался на механический пресс простого действия усилием 630 кН. При проведении эксперимента проводилась вырубка детали. Перемещение плиты фиксировалось индикаторами часового типа.

Полученные экспериментальные результаты показали хорошую сходимость с теоретическими в 12...15 % [3], подтвердили необходимую прочность и жесткость композиционных плит штампов (рис. 1).

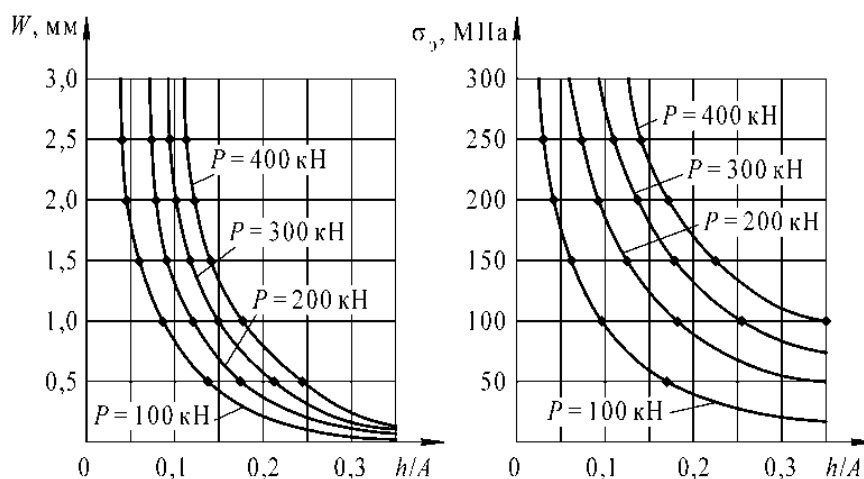


Рис. 1. Зависимости максимальных прогибов и эквивалентных напряжений от относительной толщины плиты h к ширине A

Вывод. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность применения композиционного материала на основе стеклоткани марки КП-Т и фенолформальдегидной смолы АС-4 в элементах штамповой оснастки, и в частности для базовых плит штампов.

Литература

1. Композиционные материалы [Текст]: справ.: под общ. ред. В. В. Васильевой, Ю. М. Тернопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
2. Мовшиович А.Я. Прочность и жесткость плит штампованных блоков из композиционных материалов [Текст] / А. Я. Мовшиович, Л. Г. Кузнецова, А. Я. Горницкий, О. П. Семенова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 12. – С. 2-3.
3. Агарков В. В. Исследование прочности и жесткости переналаживаемых штампов из композиционных материалов [Текст] / В. В. Агарков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 59. – X., 2013. – С. 204-219.

© В.Н. Павленко

В.М. Павленко, д.т.н., доц.

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БАЗОВИХ ПЛИТ ШТАМПУВАЛЬНОГО ОСНАЩЕННЯ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі представлені результати експериментальних досліджень методом статичної тензометрії напружено-деформованого стану базових плит штампувальних блоків із композиційного матеріалу на основі склотканини марки КТ-П і пластмаси АС-4.

Ключові слова: експеримент, базова плита, штампувальний блок, композит, тензометрія.

*V.N. Pavlenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
National Aerospace University N.E. Zhukovsky «KHAИ»*

EXPERIMENTAL RESEARCH OF DIE TOOLING COMPOSITE MOUNTING PLATES

The paper contains the results of experimental static strain measurement of stress-strain state of die blocks composite mounting plates. The material is based on KT-P glass fibre and AS-4 plastic.

Keywords: experiment, mounting plate, die block, composite, strain measurement.

Н.С. Равська, д.т.н., професор,

О.А. Охріменко, к.т.н., доцент,

І.В. Оконченко, магістрант

Національний технічний університет України «КПІ»

УМОВИ НЕПІДРІЗАННЯ ПРОФІЛЮ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ УТВОРЕНОЮ ДИСКОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ ПРЯМОЛІНІЙНОЇ ФОРМИ

В роботі досліджено умови не підрізання профілю гвинтових канавок свердел утворених дисковим інструментом прямолінійної форми. Визначені раціональні установочні параметри круга при яких гвинтова поверхня стружкороздільної канавки свердла утворюється без підрізання.

Ключові слова: *різальний інструмент, свердло, заточування, гвинтові поверхні.*

Вступ. В сучасному машинобудуванні одним найбільш вживаним інструментом при обробці отворів залишаються спіральні свердла.

В даний час багато свердел суцільної конструкції виготовляються на спеціалізованих верстатах з ЧПК, одними із таких є верстати моделі Schutte 305, Rollomatic GrindSmart@528XS та інші. Особливістю виготовлення свердел на таких верстатах є те, що гвинтова канавка виготовляється дисковим інструментом прямолінійної форми - кругом плоскої форми ПП (ГОСТ 2424-83), 1А1 (ГОСТ 17123-79). Розробники такого обладнання [1, 2] надають користувачеві кінцевий набір значень параметрів для виготовлення канавок такого інструменту, що визначають форму стружкороздільної канавки від, якої в свою чергу залежить форма різальної кромки свердла.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. В роботах [3, 4] досліджено визначення форми канавки такого інструменту при її виготовленні кругами(інструментом) прямолінійної форми. Було встановлено, що форма стружкороздільної гвинтової поверхні свердла при такому формоутворенні буде складатись з двох ділянок, які утворюється торцевою кромкою шліфувального круга і його циліндричною поверхнею при їх гвинтовому русі відносно осі свердла. Також було встановлено, що на профілі стружкороздільної канавки свердла може виникати явище підрізання, а саме дві ділянки, які сформовані на профілі стружкороздільної канавки не мають плавного спряження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Тому виникає питання знаходження таких параметрів установки шліфувального круга при яких буде відсутнє, явище підрізання, що відповідає виконанню другої умови формоутворення. Що призводить до відсутності створення концентратора напружень на стружкороздільній канавці, а це особливо важливо при експлуатації свердел малих діаметрів або свердел, що виготовленні з твердого сплаву, які чутливі до таких концентраторів напружень.

Постановка завдання. Мета роботи полягає в підвищенні якості проектування технології виготовлення гвинтової канавки свердла дисковим кругом прямолінійної форми і визначення таких установочних дискового інструменту при яких буде виконуватись друга умова формоутворення при обробці гвинтової канавки свердла.

В роботі [4] запропонована наступна схема розташування дискового інструменту при формоутворенні гвинтової канавки свердла (рис.1а). і вирішена задача формоутворення стружкороздільної гвинтової канавки спіральних свердел дисковим інструментом прямолінійної форми. При такій установці стружкороздільної канавка утворюється периферійною частиною круга, при чому та частина канавки, яка лежить на різальній кромці

утворюється точками круга, що знаходяться на торцевій його частині, а не робоча частина канавки «затилоч» – утворюється циліндричною поверхнею круга при їх гвинтовому русі відносно осі свердла. Підрізання на профілю деталі виникає при наявності особливих точок на профілю – точок повернення (рис. 1б).

Визначення умов формоутворення стружкороздільної канавки свердел. Розглядаються наступні системи координат (рис.1): $S(X, Y, Z)$ – нерухома система зв'язана з деталлю – свердло, вісь X співпадає з віссю свердла; $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$ – рухома система зв'язана із шліфувальним інструментом, який обробляє стружкороздільну канавку свердла, вісь Y_2 співпадає з віссю шліфувального круга і вісь Z_2 перетинається з віссю Z на радіусі серцевини свердла; $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$ – рухома допоміжна система координат.

При вибраних системах координат установочними параметрами будуть: D_d – діаметр шліфувального круга; R_d – радіус шліфувального круга; D – зовнішній діаметр свердла; d_0 – діаметр серцевини свердла; r_0 – радіус серцевини свердла; β – кут розвороту шліфувального круга; δ – кут нахилу шліфувального круга; A_0 – радіус вектор, що з'єднує початок систем координат $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$ і перпендикулярний до осі X ;

Рис.1. Схема формоутворення: а) установочні параметри, б) профіль отриманої поверхні з підрізанням профілю.

Рівняння зв'язку координат між системами $S(X, Y, Z)$ та $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$:

$$\begin{cases} X = p\phi + \sin \beta (\sin \delta (R_d + Z_2) - Y_2 \cos \delta) + X_2 \cos \beta \\ Y = (r_0 + \cos \delta (R_d + Z_2) + Y_2 \sin \delta) \sin \phi + \\ (\cos \beta (Y_2 \cos \delta - (R_d + Z_2) \sin \delta) + X_2 \sin \beta) \cos \phi \\ Z = (r_0 + \cos \delta (R_d + Z_2) + Y_2 \sin \delta) \cos \phi - \\ (\cos \beta (Y_2 \cos \delta - (R_d + Z_2) \sin \delta) + X_2 \sin \beta) \sin \phi \end{cases}, \quad (1)$$

де, ϕ – параметр, що відповідає за гвинтовий рух шліфувального круга відносно осі свердла (вісь X);

p – гвинтовий параметр стружкороздільної канавки свердла, розраховується за залежністю:

$$p = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \omega}, \quad (2)$$

Рівняння контакту роботи [4], буде наступне:

$$\begin{aligned} \bar{N}\bar{V} &= \cos t(p \cos \beta + \sin \beta(r_0 + R_d \cos \delta + u \sin \delta)) + \\ \sin t(\cos \beta(r_0 \sin \delta + u) - p \sin \beta \sin \delta) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Дана задача зводиться до визначення точок повернення на профілі, що формуються циліндричною частиною круга. Для цього необхідно використовуючи рівняння торцевої поверхні, яке утворюється при огинанні циліндричною поверхнею круга (3) вирішити наступну систему рівнянь відносно параметру u - параметр, що відповідає за положення точки вздовж осі шліфувального круга. При чому робоча поверхня круга описується зміною цього параметру $u[0, u_{max}]$.

$$\begin{cases} Y_{TRd1} = f_1(r_0, \beta, \delta, u); \frac{\partial Y_{TRd1}}{\partial u} = 0 \\ Z_{TRd1} = f_2(r_0, \beta, \delta, u); \frac{\partial Z_{TRd1}}{\partial u} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

де, Y_{TRD1} , Z_{TRD1} – координати точок торцевого перерізу отриманої гвинтової поверхні [4]
 r_0 – радіус серцевини свердла; β - кут розвороту шліфувального круга; δ - кут нахилу шліфувального круга – установочні параметри шліфувального круга.

Для перевірки отриманих результатів (4) використаємо метод запропонований [5]. Якщо точка повернення на є профілі, який є огинаючою сімейства поверхонь то вона визначається системою рівнянь:

$$\begin{aligned} NV &= 0 \\ g_{f01} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

де

$$g_{f01} = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial t} NV & \frac{\partial}{\partial u} NV & \frac{\partial}{\partial \phi} NV \\ \frac{\partial}{\partial t} R_{1X} & \frac{\partial}{\partial u} R_{1X} & V_X \\ \frac{\partial}{\partial t} R_{1Y} & \frac{\partial}{\partial u} R_{1Y} & V_Y \end{vmatrix}, \quad (6)$$

- рівняння швидкості [4]:

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} p \cos \beta + \sin \beta(r_0 + R_d \cos \delta(1 + \sin t) + u \sin \delta) \\ \cos \beta(r_0 \cos \delta + R_d(1 + \sin t)) - \sin \beta(p \cos \delta + R_d \sin \delta \cos t) \\ - \cos \beta(r_0 \sin \delta + u) + \sin \beta(p \sin \delta - R_d \cos \delta \cos t) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

- рівняння циліндричної поверхні круга шліфувального круга в системі $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$ [4]:

$$(R_{1X} = R_d \cos t; R_{1Y} = R_d \sin t; R_{1Z} = R_d \sin t), \quad (8)$$

Підставивши (3), (7), (8) в (6) отримуємо наступну залежність:

$$\begin{aligned} g_{01} &= R_d (R_d \sin t (\sin t \cos \beta - \sin \delta \cos t \sin \beta) (\cos \beta(r_0 \cos \delta + R_d \sin t) - \\ &\sin \beta (p \cos \delta + R_d \sin \delta \cos t) - (\sin \beta (\sin t(R_d \cos \delta + u \sin \delta + r_0) - \\ &p \sin \delta \cos t) + \cos \beta) (\cos t (r_0 \sin \delta + u) + p \sin t)) \sin \beta (R_d \cos \delta \cdot (\sin t + 1) + \\ &u \sin \delta + r_0) + p \cos \beta)) \end{aligned} \quad (9)$$

Підставляючи (3) і (9) в систему рівнянь (5) визначаємо такі установочні параметри шліфувального круга при яких значення параметру u буде лежати за межами $u[0, u_{max}]$, що описують робочу ділянку шліфувального круга. Так як підрізання виникає в зоні де сти-

каються дві ділянки профілю, для якої із них $u=0$. Тому необхідно визначити граничні значення зміни установочних параметрів для яких точка повернення формувалась відповідною точкою поверхні круга з параметром $u=0$. Це буде обмеження у виборі установочних параметрів круга.

За допомогою системи автоматизації математичних розрахунків *Matlab* було розраховано граничні криві(обмеження) установочних параметрів шліфувального круга β та δ за залежностями (4), або (5) при яких буде відсутня точка на поверхні круга, яка буде формувати особливу точку на огинаючому профілі гвинтової поверхні свердла (рис.2, 3) в залежності від діаметру круга. Робоча область в якій лежать значення установочних параметрів кругів знаходиться ліворуч від граничної кривої.

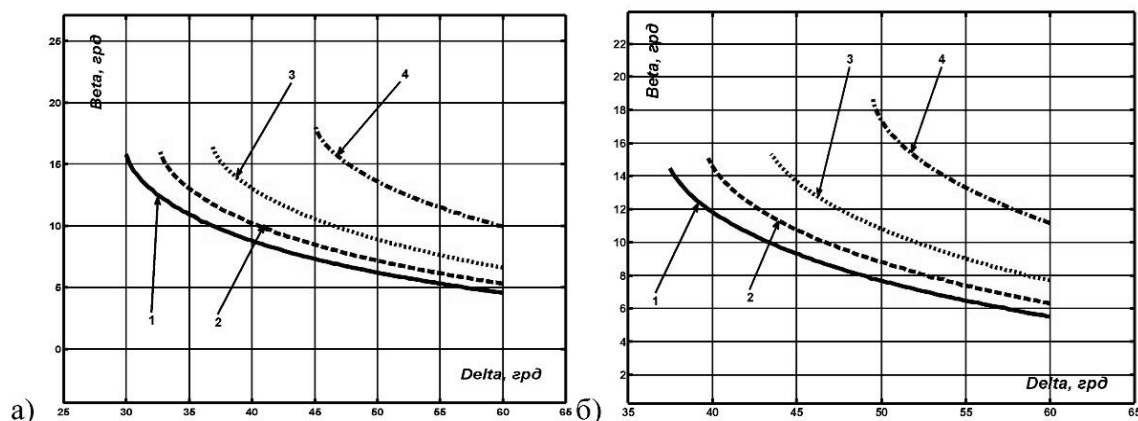


Рис.2. Граничні умови вибору установочних параметрів круга при формоутворенні профілю стружкороздільної канавки свердла $D=1\text{мм}$, $d_0=0.3D$, а) $\omega=30^\circ$, б) $\omega=35^\circ$. Діаметр шліфувального круга 1-100мм, 2-75мм, 3-5мм, 4-25мм.

Рис.3. Граничні умови вибору установочних параметрів круга при формоутворенні профілю стружкороздільної канавки свердла $D=10\text{мм}$, $d_0=0.15D$, а) $\omega=30^\circ$, б) $\omega=35^\circ$. Діаметр шліфувального круга 1-50мм, 2-75мм, 3-100мм, 4-125мм, 5-150мм.

За результатами розрахунків (рис. 2, 3) визначено установочні параметри шліфувального круга прямолінійного профілю β (*Beta*) та δ (*Delta*), що дозволяють обробити гвинтову канавку свердла без підрізання профілю. Встановлено, що діапазон змін кутів β (*Beta*) та δ (*Delta*) за значеннями більше для свердел з більшим діаметром (рис.3) – 10мм ніж для свердел з меншими значеннями діаметру (рис.2) – 1мм.

Висновок. В роботі розглянуто визначення умов відсутності підрізання на профілю гвинтової поверхні утвореною дисковим інструментом прямолінійної форми. На прикладі свердел діаметром 1мм та 10мм показані граничні умови для визначення установочних

параметрів круга при яких буде виконуватись друга умова формоутворення при обробці таких свердел. Встановлено, що за своїми значеннями діапазон зміни установочних параметрів інструменту прямолінійної ширше для свердел більшого діаметру.

Список літератури:

1. <http://www.rollomatic.ch/nc/ru/produkcija/zatochnyestanki>. [Електронний ресурс]
2. <http://www.schuetteuk.co.uk/grinding.htm>. [Електронний ресурс]
3. Домнин П.В. Разработка процесса формообразования фасонных винтовых поверхностей инструментов на основе применения стандартных концевых и торцевых фрез. [Текст] Автореферат дисс. на соискание к.т.н. Москва, ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН» 2012-26с.
4. Равська Н.С./ Особливості формоутворення гвинтової канавки спіральних свердел дисковим інструментом прямолінійної форми. [Текст] // Равська Н.С., Охріменко О.А., Плівак О.А. Вісник Національного технічного університету України «КПІ» «Машинобудування». №64. 2012. Київ. С.136-145.
5. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. [Текст] / Литвин Ф.Л. - М.: Наука, 1968. – 586 с.

© Н.С. Равская, А.А. Охрименко, И.В. Оконченко

УДК 623.451:519.6

Н.С. Равская, д.т.н., профессор,

А.А. Охрименко, к.т.н., доцент,

И.В. Оконченко, магистрант

Национальный технический университет Украины «КПИ»

УСЛОВИЯ НЕПОДРЕЗАНИЯ ПРОФИЛЯ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗОВАННОЙ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ

В работе исследованы условия подрезания профиля винтовых канавок сверл образованных дисковым инструментом прямолинейной формы. Определены рациональные установочные параметры круга, при которых винтовая поверхность стружкоразделительной канавки сверла образуется без подрезания профиля.

Ключевые слова: *режущий инструмент, сверло, заточка, винтовые поверхности.*

UDC 623.451:519.6

N. Ravskaja, Professor,

A. Ohrimenko, Ph.D,

I. Okonchenko, Graduate

National Technical University of Ukraine «KPI»

CONDITIONS UNDERCUTTING PROFILE SCREW SURFACE IS FORMED BY THE DISK TOOL RECTILINEAR FORMS

We studied the conditions undercutting Profile helical grooves formed drills disk tool rectilinear form. The rational range of settings in which the helical surface drill grooves formed without undercutting profile.

Keywords: *cutting tools, drill, grinding, screw surface.*

Э.Р. Ваниев, ст. преп.

Ч.Ф. Якубов, к.т.н, доцент

А.И. Алиев, к.т.н, доцент

Крымский инженерно-педагогический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРИРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

В статье представлены результаты по определению критерия приработки инструмента, обеспечивающей в автоматизированном производстве управление образованием вторичных упрочненных структур на контактных поверхностях в процессе резания с использованием различных СОТС для достижения максимальной степени упрочнения.

Ключевые слова: критерий приработки, вторичные упрочненные структуры, СОТС, приработочный износ, составляющая усилия резания.

Введение. Интенсификация процесса резания является одной из важнейших проблем машиностроения, решение которой связано с повышением работоспособности инструмента, в частности его стойкости.

Острота проблемы интенсификации процесса резания усиливается при обработке труднообрабатываемых материалов, к которым относятся стали аустенитного класса. Одним из эффективных и наиболее доступных способов повышения работоспособности инструмента является применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

Исследованиями школы проф. Якубова Ф.Я. установлено, что использование СОТС в условиях непрерывного резания значительно усиливает эффект упрочнения резанием контактных с обрабатываемым материалом поверхностей быстрорежущего инструмента.

Особую роль этот способ повышения интенсивности процесса резания приобретает в автоматизированном производстве, когда упрочнение инструмента резанием при приработке на менее жестких режимах в сравнении с нормативными представляет собой одно целое.

Вместе с тем для совмещения процесса упрочняющей приработки и дальнейшей эксплуатации инструмента необходимо знать критерии завершения упрочнения контактных слоев на поверхностях инструмента для обеспечения его дальнейшей работы.

Целью работы является определение критерия приработки инструмента, обеспечивающей в автоматизированном производстве управление образованием вторичных упрочненных структур на контактных поверхностях в процессе резания с использованием различных СОТС для достижения максимальной степени упрочнения.

Предыдущие исследования. Вопросам интенсификации процесса резания за счет использования СОТС посвящены работы многих исследователей Н.Н. Зорева, В.Н. Латышева, М.И. Клушина, В.Н. Подураева, Л.В. Худобина, Р.Н. Ошера, Е.Г. Бердичевского, С.Г. Энтелиса, М.Б. Гордона, В.В. Подгоркова, Ф.П. Боудена, Д. Тейбора и др.

Из теории резания [1-4] известно, что вначале при любом виде обработки (точение, сверление, фрезерование и др.) наблюдается интенсивный износ до определенного значения фаски износа по задней поверхности, а затем кривая износа меняет свой наклон.

Значение фаски износа по задней поверхности, при котором изменяется наклон кривой износа и принимается за критерий приработки. Обычно этот критерий принимают значение фаски износа $h_{зпр} = 0,1$ мм и приработка в этом случае осуществляется в режиме эксплуатации инструмента.

Данных о величине прирабочного износа в среде различных СОТС не достаточно. Согласно исследованиям [5] использование СОТС ведет к уменьшению площади контакта, следовательно, повышается уровень контактных давлений, что может в зависимости от используемой среды привести к изменению значения прирабочного износа. В связи с этим при совмещении упрочняющей приработки и эксплуатационными режимами работы инструмента в условиях автоматизированного производства возникает задача определения значения прирабочного износа $h_{зпр}$, обеспечивающего упрочнение контактных слое инструмента в среде различных СОТС.

Методика исследований. Определение критерия приработки проводилось на основании экспериментальных испытаний в присутствии отдельно каждой из технологических сред.

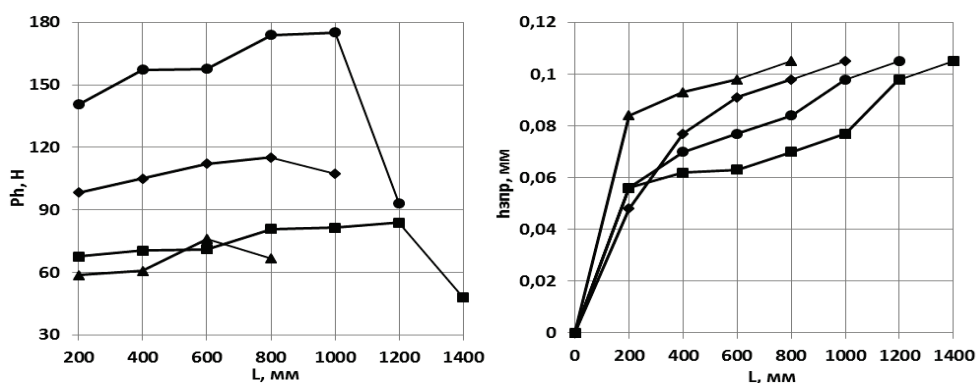
По каждому из экспериментов инструмент считался приработанным, когда кривая $h_{зпр} = f(L_{пр})$ изменила свой наклон ($h_{зпр}$ – фаска затупления на задней поверхности приработанного инструмента). В процессе приработки наряду с изменением наклона этой кривой измерялись значения составляющих усилий резания (P_h , P_v и P_y). В эксперименте участвовали двузубые дисковые фрезы Ø100 мм. На заготовках из стали 12Х18Н10Т было выполнено по семь уступов длиной 200 мм каждый, что соответствует количеству проходов. В конце каждого прохода соответственно измерялось значение фаски износа по задней поверхности и составляющие усилия резания.

В среде каждой из СОТС было проведено по четыре эксперимента с различными режимами упрочняющей приработки. По результатам экспериментов построены графики изменений горизонтальной составляющей силы резания P_h и фаски износа по задней поверхности $h_{зпр}$ в процессе приработки в зависимости от пройденного пути инструмента после приработки.

Анализ экспериментальных исследований. На рис. 1, 2, 3, 4 и 5 показано изменение горизонтальной составляющей силы резания и фаски прирабочного износа в зависимости от пути резания при приработке соответственно при сухой обработке, в среде И-20А, МР-99, рапсового и касторового масел.

Анализ изменения наклона фаски прирабочного износа после каждого прохода (измерения) и соответствующих значений, составляющих сил резания показали, что они коррелируют между собой.

Установлено, что во всех случаях, кроме приработки зубьев фрез в среде касторового масла, увеличение фаски износа приработанного инструмента на задней поверхности происходит постепенно и сопровождается ростом силы резания, в частности ее составляющей P_h , до определенного значения, а затем снижения, которое показывает завершение



образования вторичных упрочненных структур контактных слоев инструмента.

Рис. 1. Изменение силы P_h и $h_{зпр}$ прирабатываемого инструмента при сухой обработке:

- $V_{пр} = 19,45$ м/мин, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 1,6$ мм; —■— $V_{пр} = 27,9$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм; —▲— $V_{пр} = 27,9$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм;
- $V_{пр} = 15,5$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм.

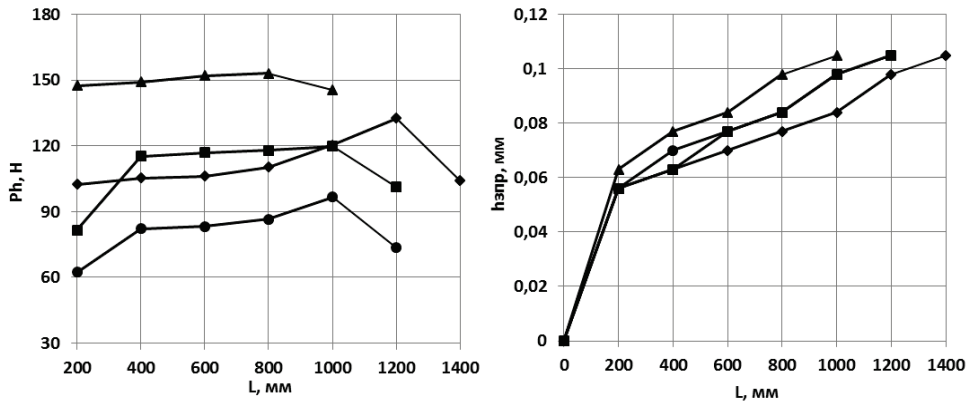


Рис. 2. Изменение силы P_h и $h_{зпр}$ прирабатываемого инструмента в среде И-20А:

—■— $V_{пр} = 12,2$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм; —◆— $V_{пр} = 27,53$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм; —▲— $V_{пр} = 19,25$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 1,6$ мм; —●— $V_{пр} = 24,45$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм.

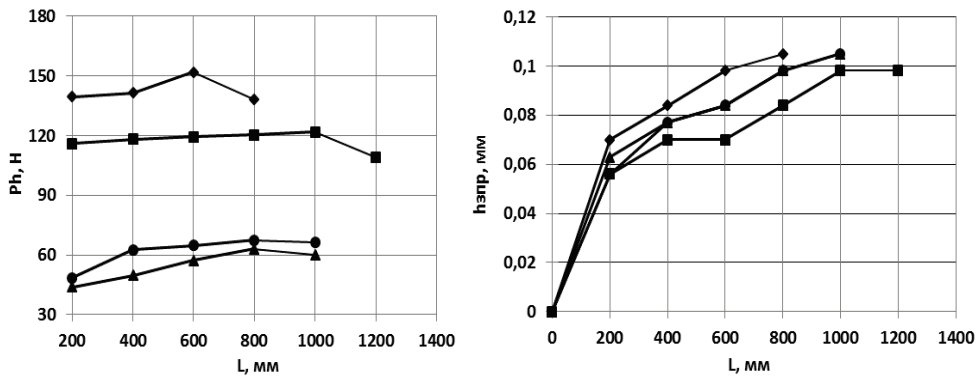


Рис. 3. Изменение силы P_h и $h_{зпр}$ прирабатываемого инструмента в среде МР-99: —■—

$V_{пр} = 27,7$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 2,0$ мм; —◆— $V_{пр} = 19,29$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм; —▲— $V_{пр} = 15,3$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм; —●— $V_{пр} = 24,6$ м/мин, $S_z = 0,25$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм.

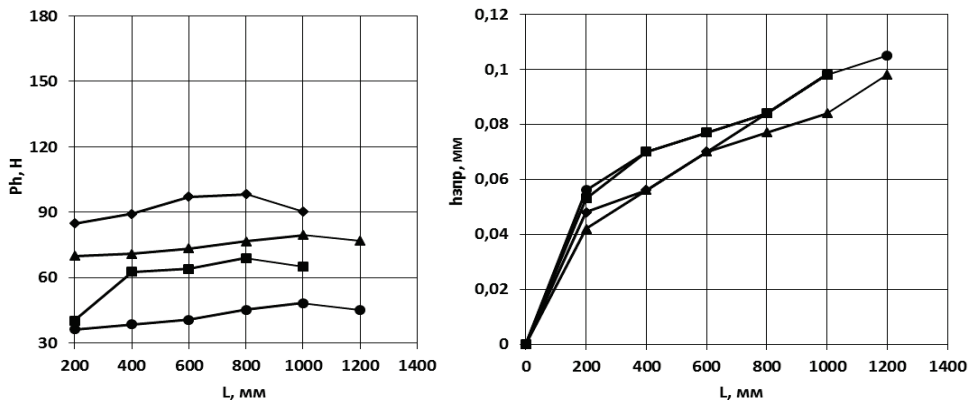


Рис. 4. Изменение силы P_h и $h_{зпр}$ прирабатываемого инструмента в среде рапсового масла: —■— $V_{пр} = 15,33$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм; —◆— $V_{пр} = 15,5$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм; —▲— $V_{пр} = 24,45$ м/мин, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 1,2$ мм;

—●— $V_{пр} = 12,27$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм.

Такое изменение составляющей силы резания P_h может объясняться тем, что одновременно происходит упрочнение контактных слоев инструмента и срезаемого слоя пластического материала, каковым является сталь 12Х18Н10Т. Поэтому при резании пластического материала в начале наблюдается его пластическое разрушение с постепенным

упрочнением. При достижении определенной величины упрочнения срезаемый слой становится хрупким, происходит хрупкое разрушение, при котором сила резания снижается.

В этом случае, за критерий приработки, при котором образуются упрочненные контактные слои инструмента, следует принимать значение фаски износа по задней поверхности, после которого наблюдается снижение составляющей силы резания P_h .

Анализ количества измерений приработочного износа и составляющих силы резания во время приработки показывает, что время приработки зависит от режимов резания.

Установлено также, что в присутствии касторового масла приработка осуществляется быстрее (Рис. 5).

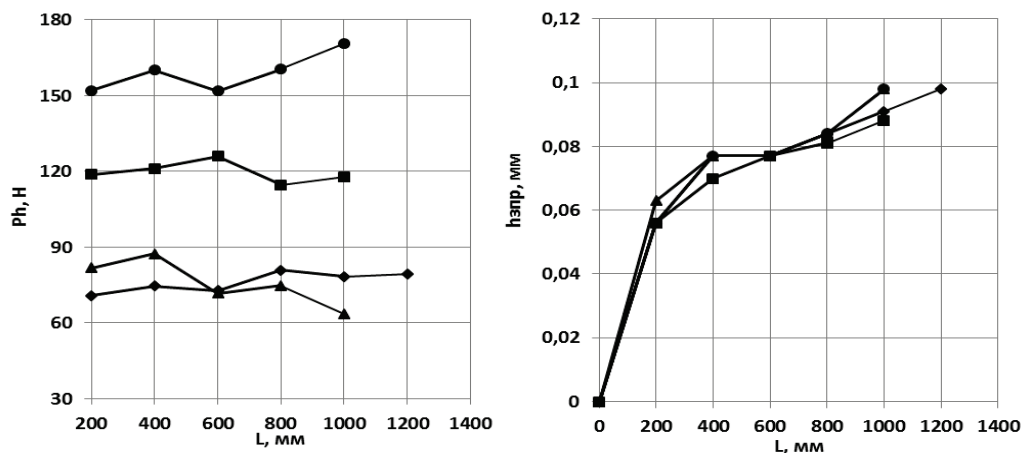


Рис. 5. Изменение силы P_h и h_{zpr} приработываемого инструмента в среде касторового масла: \blacksquare – $V_{пр} = 24,75$ м/мин, $S_z = 0,3$ мм/зуб, $t = 1,2$ мм; \bullet – $V_{пр} = 19,35$ м/мин, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм; \blacklozenge – $V_{пр} = 15,47$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм; \blacktriangle – $V_{пр} = 24,65$ м/мин, $S_z = 0,25$ мм/зуб, $t = 1,6$ мм.

В среде касторового масла наблюдается периодическое снижение и возрастание усилий резания, в то время как у остальных после снижения составляющая сила резания P_h постоянно увеличивается. Такая особенность упрочняющей приработки в среде касторового масла позволяет утверждать, что механизм образования вторичных упрочненных структур отличается от механизма приработки в среде других СОТС. При этом следует отметить, что первое наибольшее значение составляющей силы резания при последующем снижении соответствует изменению наклона кривой износа.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что изменение кривой износа не зависит от режимов приработки и определяется только технологической средой в котором происходит процесс приработки.

В тоже время для каждой из исследуемых СОТС усилия резания определяются режимами приработки, которые определяют степень упрочнения контактных слоев.

Определив рекомендуемые режимы приработки, обеспечивающие необходимую стойкость инструмента по снижению составляющей силы резания можно управлять процессом упрочняющей приработки, что особое значение приобретает в условиях автоматизированного производства в частности на станках с ЧПУ.

Таким образом, инструмент считался приработанным (на режимах $V_{пр} = 15,5$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 0,8$ мм) при обработке всухую и в присутствии МР-99, И-20А – $h_{zpr} = 0,098 \div 0,1$ мм и в среде рапсового масла – $h_{zpr} = 0,084$ мм. Значение h_{zpr} в среде касторового масла принято равным $0,07 \div 0,077$ мм, что соответствует первой ступени изменения наклона кривой.

Выводы. В результате исследований установлена корреляция между изменением приработочной кривой износа и усилием резания.

Виявлено, що завершення образования упрочнених вторичних структур на контактних поверхностях інструмента супроводжується зниженням составляючих сили реза- ння і зміненням нахилу кривої износа.

Определены критерии предварительной приработки для каждой из исследуемых сред.

Показано, что механизм образования упрочненных слоев на поверхностях инстру- мента в среде касторового масла отличается от других рассматриваемых СОТС.

Литература

1. Яцерицын П.И. Теория резания: учебник [Текст] / П.И. Яцерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е издание, исправлено и дополнено – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.

2. Мазур Н.П. Основы теории резания материалов [Текст] : учебник [для высш. учебн. заве- дений] / Н.П. Мазур [и др.]; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и до- полн. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

4. Внуков Ю.М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів: навчальний посіб- ник [Текст] / Ю.М. Внуков, В.О. Залоза. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 243 с.

5. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. [Текст] – Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография» (СГТ), 2008. – 156 с.

© Э.Р. Ваниев, Ч.Ф. Якубов, А.И. Алиев

УДК 621.914

*Е.Р. Ванієв, ст. преп.; Ч.Ф. Якубов, к.т.н, доцент; А.І. Алієв, к.т.н, доцент
Кримський інженерно-педагогічний університет*

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЮ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПРИРОБІТКИ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ СТАЛЕЙ АУСТЕНІТНОГО КЛАСУ

У статті представлені результати по визначенню критерію підробітки інструме- нту, що забезпечує в автоматизованому виробництві управління освітою вторинних змі- цнених структур на контактних поверхнях в процесі різання з використанням різних МОТС для досягнення максимального ступеня зміцнення.

Ключові слова: критерій приробітки, вторинні зміцнені структури, МОТС, прира- боточний знос, складова зусилля різання.

UDC 621.914

*E.R. Vaniyev, Senior lecturer; Ch.Ph. Yakubov, Ph.D.; A.I. Aliyev, Ph.D.
Crimean Engineering and Pedagogical University*

DETERMINATION OF CRITERIA PRE-BURNISHING TOOL DURING MILLING OF AUSTENITIC STEELS

The article presents the results of determination criterion burnishing tool that provides au- tomated manufacturing control the formation of secondary structures reinforced on the contact surfaces of the cutting process using a variety of cutting fluids to achieve the maximum degree of hardening.

Keywords: criterion of the running, the secondary structure of hardened, LCTE, the run- ning-in wear, component of the cutting force

В.Г. Загорянский, к. т. н., доцент,

А.А. Шаповал, к. т. н., доцент,

Д.В. Мосьпан, к. т. н., доцент

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ЛИСТОВ ПЛАКИРУЮЩИМ СЛОЕМ ВНУТРЬ

В статье, на основе анализа напряженного состояния двухслойных листов при пластическом изгибе лакирующим слоем внутрь, разработана математическая модель, по которой можно определить распределение напряжений по толщине листа. На основе этих зависимостей определяется радиус кривизны нейтральной поверхности напряжений, необходимый для определения изгибающего момента и предельных и допустимых радиусов гибки двухслойных листов. Полученные зависимости позволяют определять положение нейтральной поверхности в двухслойных листах, изготовленных из любых металлов.

Ключевые слова: *пластический изгиб, двухслойный лист, гибка лакирующим слоем внутрь, распределение напряжений, радиус кривизны нейтрального слоя.*

Введение. При гибке двухслойного листа или широкой полосы (случай пластического изгиба моментом) распределение по поперечному сечению изгибаемого листа растягивающих и сжимающих напряжений будет влиять, по аналогии со случаем изгиба листа монометалла, на положение нейтрального слоя напряжений, и, соответственно, на радиус кривизны нейтрального слоя изогнутого листа, что определяет изгибающий момент, величину упругого пружинения, а также значения предельных и допустимых радиусов гибки двухслойного листа.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Отметим, что традиционно освещались вопросы анализа напряженно-деформированного состояния (с учетом упрочнения при пластической деформации и без его учета) для процесса гибки монометаллов [1, 2, 3].

Следует отметить, что теоретической разработке проблемы определения параметров процесса пластической деформации при гибке листов двухслойных сталей и других биметаллов и соответствующим расчетным зависимостям уделялось недостаточное внимание. Освещались отдельные аспекты данной проблемы (например, [4]).

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Таким образом, представляется актуальным анализ напряженного состояния для случая пластического изгиба двухслойного листа (широкой полосы) лакирующим слоем внутрь (имеющего место, в частности, при получении обечаек из двухслойных сталей и других биметаллов для изготовления сосудов и аппаратов в химическом и других отраслях машиностроения), на основе которого будут получены зависимости для распределения напряжений по толщине изгибаемого листа (полосы) и соответствующие эпюры напряжений.

Постановка задачи. Таким образом, целью работы является анализ напряженного состояния при изгибе моментом двухслойного листа (полосы) для случая гибки лакирующим слоем внутрь.

Основной материал и результаты. Принимаются допущения: пластический изгиб двухслойного листа (широкой полосы) лакирующим слоем внутрь при чистом изгибе моментом без учета упрочнения и влияния анизотропии механических свойств изгибаемого листа (полосы).

В радиальном направлении положительным будем считать направление от центра кривизны (для определения знака радиальных напряжений σ_r). Тангенциальные напряжения σ_θ при $\rho_\sigma < \rho \leq R$, R – радиус наружной поверхности изгибаемого листа, будут положительными (растягивающими) и при $r \leq \rho < \rho_\sigma$, r – радиус внутренней поверхности, отрицательными (сжимающими).

Распределение напряжений по толщине изгибаемого двухслойного листа находим из совместного решения уравнений равновесия элементарных объемов и энергетических условий пластичности.

Рассмотрим систему нагружения элементарного объема изгибаемого листа (гибки двухслойного листа или полосы плакирующим слоем внутри – плоский лист (полоса) изогнут на внутренний радиус r (рис. 1)).

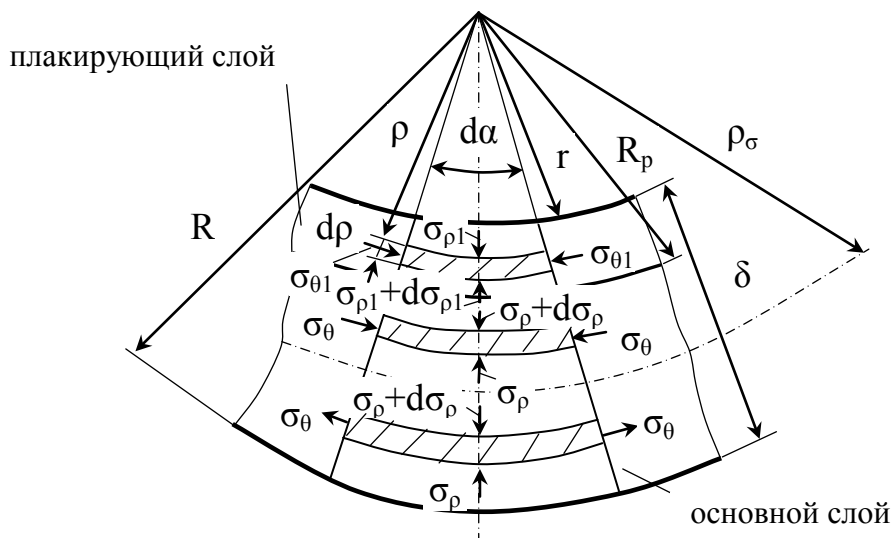


Рис. 1. Схема напряженного состояния при изгибе биметаллического листа (полосы) – гибка плакирующим слоем внутрь:

R – радиус наружной поверхности; r – радиус внутренней поверхности; ρ – текущий радиус; ρ_σ – радиус нейтрального слоя напряжений; R_p – радиус поверхности раздела слоев (межслойной границы); σ_θ – тангенциальное напряжение; σ_ρ – радиальное напряжение; δ – толщина листа (полосы)

Запишем, в соответствии с обозначениями рис. 1, уравнение равновесия элементарного объема, расположенного в основном слое в зоне растяжения (элементарные объемы рассматриваем в направлении от наружной поверхности к внутренней):

$$(\sigma_\rho + d\sigma_\rho)\rho d\alpha - \sigma_\rho(\rho + d\rho)d\alpha + 2\sigma_\theta d\rho \sin \frac{d\alpha}{2} = 0 \quad (1)$$

Так как синус малого угла приблизительно равен радианной мере соответствующей дуги, то для малого значения угла $d\alpha$

$$\sin \frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2} \quad (2)$$

Тогда, после раскрытия скобок, зависимость (1) примет вид:

$$\sigma_\rho \rho d\alpha + d\sigma_\rho \rho d\alpha - \sigma_\rho \rho d\alpha - \sigma_\rho d\rho d\alpha = 2\sigma_\theta d\rho \frac{d\alpha}{2}. \quad (3)$$

Сокращая и вынося $d\alpha$ за скобки, получим

$$(d\sigma_\rho \rho - \sigma_\rho d\rho) d\alpha = \sigma_\theta d\rho d\alpha, \quad (4)$$

откуда

$$d\sigma_\rho = (\sigma_\rho - \sigma_\theta) \frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

Уравнение пластичности для основного слоя, находящегося в наружной (растянутой) зоне, в соответствии с [1]:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = 1,15\sigma_s, \quad (6)$$

Подставляем выражение для σ_θ из (6) в уравнение (5):

$$d\sigma_\rho = \frac{d\rho(\sigma_\rho - 1,15\sigma_s - \sigma_\rho)}{\rho} = -1,15\sigma_s \frac{d\rho}{\rho} \quad (7)$$

Интегрируем уравнение (7). Здесь имеет место простейший неопределенный интеграл [5]

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C, \quad x \neq 0 \quad (8)$$

Для отыскания постоянной интегрирования C будем использовать граничное условие, по которому для растянутой зоны напряжение σ_ρ будет равно нулю на наружной поверхности изгибаемого листа (при $\rho = R$) [1].

Таким образом, $\sigma_\rho = 0$ при $\rho = R$, где R – наружный радиусгиба.

Постоянная интегрирования C будет равна

$$C = -\ln R, \quad (9)$$

тогда

$$\sigma_\rho = -1,15\sigma_s (\ln R - \ln \rho) \quad (10)$$

Таким образом:

$$\sigma_\rho = -1,15\sigma_s \ln \frac{R}{\rho} \quad (11)$$

Подставляя в уравнение пластичности (6) значение σ_ρ из (11), получаем выражение для σ_θ :

$$\sigma_\theta = 1,15\sigma_s - 1,15\sigma_s \ln \frac{R}{\rho} = 1,15\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho}\right), \quad (12)$$

Примем, что уширение листа при изгибе равно нулю, тогда аксиальные напряжения

$$\sigma_z = \frac{\sigma_\theta + \sigma_\rho}{2} \quad (13)$$

Подставляем выражения для напряжений из (11) и (12). Аксиальное напряжение будет равно:

$$\sigma_z = \frac{1,15\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho}\right) - 1,15\sigma_s \ln \frac{R}{\rho}}{2} = \frac{1,15\sigma_s}{2} \left(1 - 2 \ln \frac{R}{\rho}\right), \quad (14)$$

Рассмотрим теперь элементарные объемы, расположенные в сжатой зонегиба (движемся от наружной поверхностигиба к внутренней).

Запишем уравнение равновесия элементарного объема, расположенного в основном слое в зоне сжатия

$$\sigma_\rho \rho d\alpha - (\sigma_\rho + d\sigma_\rho)(\rho + d\rho) d\alpha - 2\sigma_\theta d\rho \sin \frac{d\alpha}{2} = 0 \quad (15)$$

Из (15), по аналогии с выводом зависимости (11), получаем:

$$d\sigma_\rho = \frac{d\rho(-\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} \quad (16)$$

Уравнение пластичности для основного слоя, находящегося во внутренней (сжатой) зоне:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = -1,15\sigma_s, \quad (17)$$

В (16) подставляем выражение для σ_θ из (17):

$$d\sigma_\rho = \frac{d\rho(-\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} = \frac{d\rho(1,15\sigma_s)}{\rho} \quad (18)$$

После интегрирования и определения постоянной интегрирования из условия $\sigma_\rho = \sigma_{\rho 1}$ при $\rho = R_p$, где R_p – радиус межслойной границы между основным и плакирующим слоями, получаем:

$$\sigma_\rho = 1,15\sigma_s \ln \frac{\rho}{R_p} - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho}{r} \quad (19)$$

Подставляя в уравнение пластичности (17) абсолютное значение σ_ρ из (19), получаем выражение для σ_θ :

$$\sigma_\theta = 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho}{r} - 1,15\sigma_s \left(1 - \ln \frac{\rho}{R_p} \right), \quad (20)$$

Аксиальное напряжение, по аналогии с (14):

$$\sigma_z = \frac{1,15\sigma_s}{2} \left(1 - 2 \ln \frac{\rho}{r} \right) - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho}{R_p}, \quad (21)$$

Запишем уравнение равновесия элементарного объема, расположенного в зоне сжатия в плакирующем слое (напряжения, относящиеся к плакирующему слою, будем отмечать индексом 1):

$$\sigma_{\rho 1} \rho d\alpha - (\sigma_{\rho 1} + d\sigma_{\rho 1})(\rho + d\rho) d\alpha - 2\sigma_{\theta 1} d\rho \sin \frac{d\alpha}{2} = 0 \quad (22)$$

Так как синус малого угла приблизительно равен радианной мере соответствующей дуги, то для малого значения угла $d\alpha$

$$\sin \frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2} \quad (23)$$

Тогда, после раскрытия скобок, зависимость (22) примет вид:

$$\sigma_{\rho 1} \rho d\alpha - \sigma_{\rho 1} \rho d\alpha - d\sigma_{\rho 1} \rho d\alpha - \sigma_{\rho 1} d\rho d\alpha - d\sigma_{\rho 1} d\rho d\alpha = \sigma_{\theta 1} d\rho d\alpha, \quad (24)$$

откуда

$$d\sigma_{\rho 1} = (-\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\theta 1}) \frac{d\rho}{\rho} \quad (25)$$

Уравнение пластичности для плакирующего слоя, находящегося во внутренней (сжатой) зоне:

$$\sigma_{\theta 1} - \sigma_{\rho 1} = 1,15\sigma_{s1}, \quad (26)$$

Подставляем выражение для $\sigma_{\theta 1}$ из (26) в уравнение (25):

$$d\sigma_{\rho 1} = \frac{d\rho(-\sigma_{\rho 1} + 1,15\sigma_{s1} + \sigma_{\rho 1})}{\rho} = 1,15\sigma_{s1} \frac{d\rho}{\rho} \quad (27)$$

Интегрируем уравнение (27). Для отыскания постоянной интегрирования C используем граничные условия, согласно которым для сжатой зоны напряжение σ_r будет равно нулю на внутренней поверхности изгибаемого листа (при $\rho = r$) [1].

Таким образом, $\sigma_{r1} = 0$ при $\rho = r$, где r – внутренний радиусгиба.

Тогда

$$\sigma_{r1} = -1,15\sigma_{s1}(\ln \rho - \ln r) \quad (28)$$

Таким образом:

$$\sigma_{r1} = 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho}{r} \quad (29)$$

Подставляя в уравнение пластичности (26) абсолютное значение σ_{r1} из (29), получаем выражение для $\sigma_{\theta1}$:

$$\sigma_{\theta1} = 1,15\sigma_{s1} = |\sigma_{r1}| = 1,15\sigma_{s1} = 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho}{r} = 1,15\sigma_{s1} \left(1 - \ln \frac{\rho}{r}\right), \quad (30)$$

Подставляем выражения для напряжений из (29) и (30). Аксиальное напряжение будет равно:

$$\sigma_{z1} = \frac{1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho}{r} - 1,15\sigma_{s1} \left(1 - \ln \frac{\rho}{r}\right)}{2} = \frac{1,15\sigma_{s1}}{2} \left(2 \ln \frac{\rho}{r} - 1\right), \quad (31)$$

Зависимость для определения радиуса кривизны ρ_σ определяется из условия равенства радиальных напряжений σ_r для границы зон растяжения и сжатия (когда текущий радиус ρ равен радиусу кривизны нейтрального слоя напряжений ρ_σ), то есть равенства зависимостей (11) и (19):

$$-1,15\sigma_s \ln \frac{R}{\rho} = 1,15\sigma_s \ln \frac{\rho}{R_p} - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho}{r}, \quad (32)$$

откуда

$$\rho_\sigma = \frac{\sigma_s}{\sigma_{s1}} \frac{Rr}{R_p} \quad (33)$$

Если нейтральный слой проходит по межслойной границе, то есть $\rho_\sigma = R_p$, и отношение $\sigma_s/\sigma_{s1} = 1$, то уравнение (33) превращается в зависимость для пластического изгиба обычного монометаллического листа с прямоугольным поперечным сечением [1]:

$$\rho = \sqrt{Rr} \quad (34)$$

При гибке двухслойного листа его объемное напряженное состояние характеризуется тремя напряжениями в трех взаимно перпендикулярных направлениях: тангенциальном – σ_θ , радиальном – σ_r и аксиальном – σ_z , направления которых показаны на рис. 2.

Отметим, что схемы напряженного состояния, приведенные на рис. 2, соответствуют схемам, характеризующим объемное напряженное состояние при чистом изгибе широкой полосы монометалла [1].

Проиллюстрируем полученные зависимости для определения радиальных и тангенциальных напряжений.

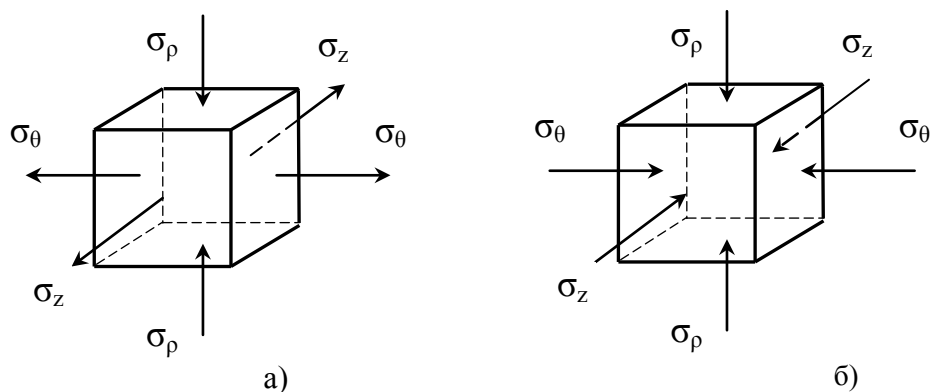


Рис. 2. Схемы объемного напряженного состояния изгибаемого двухслойного листа:
а) зона растяжения, б) зона сжатия

В табл. 1 и 2 приведены значения, которые принимают полученные зависимости в характерных точках (на наружной и внутренней поверхностях изгибаемого листа, на межслойной границе и на нейтральной поверхности напряжений).

Таблица 1. Значения радиальных напряжений в точках эпюры

Точка	Зависимость	Условие	Значение в точке
A	(11)	$\rho=R$	0
B	(11)	$\rho=\rho_\sigma$	$\sigma_\rho = -1,15\sigma_s \ln \frac{R}{\rho_\sigma}$
C	(19)	$\rho=R_p$	$\sigma_\rho = \pm 1,15\sigma_s \ln \frac{R_p}{R_p}$ $1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R_p}{r}$
D	(29)	$\rho=r$	0

Таблица 2. Значения тангенциальных напряжений в точках эпюры

Точка	Зависимость	Условие	Значение в точке
A	(12)	$\rho=R$	$1,15\sigma_s$
B	(12)	$\rho=\rho_\sigma$	$\sigma_\theta = 1,15\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho_\sigma} \right)$
C	(20)	$\rho=\rho_\sigma$	$\sigma_\theta = 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{\rho_\sigma}{r}$ $\pm 1,15\sigma_s \left(1 - \ln \frac{\rho_\sigma}{R_p} \right)$
D	(20)	$\rho=R_p$	$\sigma_\theta = 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R_p}{r}$ $1,15\sigma_s$
E	(30)	$\rho=R_p$	$-1,15\sigma_{s1} \left(1 - \ln \frac{R_p}{r} \right)$
F	(30)	$\rho=r$	$-1,15\sigma_{s1}$

В соответствии с табл. 1 и 2 построены эпюры распределения напряжений по толщине изгибаемого двухслойного листа (рис. 3) для следующих исходных данных и допущений: отношение предела текучести металла плакирующего слоя к пределу текучести металла основного слоя (σ_{s1}/σ_s) составляет 1,4; плакирующий слой составляет 0,3 толщины двухслойного листа (такое соотношение толщин характерно для листов двухслойной коррозионно-стойкой стали по ГОСТ 10885-85); нейтральная поверхность напряжений находится посередине толщины листа.

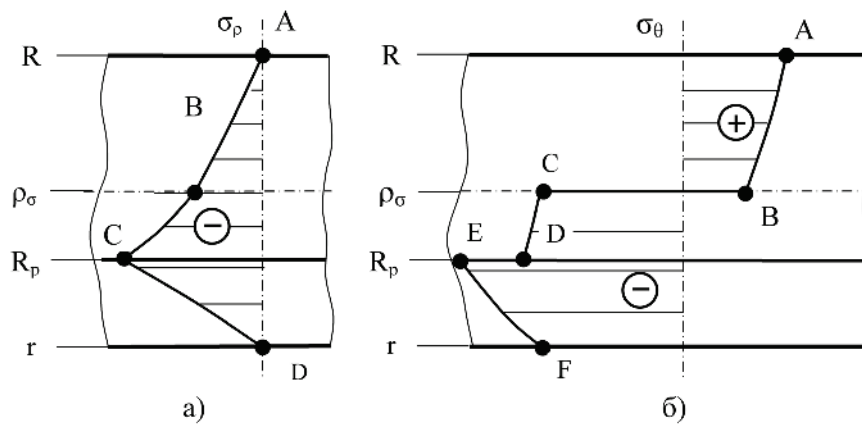


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений по толщине при гибке моментом двухслойного листа: а) радиальных, б) тангенциальных

Выводы. Установлено, что положение нейтральной поверхности напряжений для случая изгиба двухслойного листа (полосы) плакирующим слоем внутрь зависит от доли толщины плакирующего слоя в двухслойном листе, а также от соотношения пределов текучести металлов слоев листа.

Распределение радиальных и тангенциальных напряжений в зоне растяжения и сжатия соответствуют соответствующему распределению монометалла (радиальные напряжения – основной слой, зона растяжения, плакирующий слой, зона сжатия), (тангенциальные напряжения – основной слой, зона растяжения и плакирующий слой, зона сжатия).

Расслоение двухслойного листа при изгибе возможно, когда положение нейтрального слоя напряжений совпадает с межслойной границей и радиальные напряжения у межслойной границы достигают величины, близкой к пределу текучести менее прочного из металлов листа, а прочность соединения слоев двухслойного листа недостаточна.

Литература

1. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Лысов, М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки [Текст] / М.И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
3. Зубцов, М.Е. Листовая штамповка [Текст] / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
4. Загорянский, В.Г. Расчетная методика оценки деформационной способности биметаллических полос по их предельному изгибу [Текст] / В.Г. Загорянский // Вісник Національного технічного університету "ХП". Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - Х.: НТУ „ХП”. - 2012 р. - № 46 (952) - 240 с. – С. 45-49.
5. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов) [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.

© В.Г. Загорянский, О.О. Шаповал, Д.В. Мосьпан

В.Г. Загорянський, к. т. н., доцент,

О.О. Шаповал, к. т. н., доцент,

Д.В. Мос'пан, к. т. н., доцент

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРИ ПЛАСТИЧНОМУ ВИГІНІ ДВОШАРОВИХ ЛИСТІВ ПЛАКИРУЮЩИМ ШАРОМ ДО СЕРЕДИНИ

У статті, на основі аналізу напруженого стану двошарових листів при пластичному вигині плакуючим шаром до середини, розроблена математична модель, по якій можна визначити розподіл напружень по товщині листа. На основі цих залежностей визначається радіус кривизни нейтральної поверхні напружень, необхідний для визначення моменту, що вигинає, і граничних і допустимих радіусів гнуття двошарових листів. Отримані залежності дозволяють визначати положення нейтральної поверхні в двошарових листах, виготовлених з будь-яких металів.

Ключові слова: *пластичний згин, двошаровий лист, гнуття плакуючим шаром до середини, розподіл напружень, радіус кривизни нейтральної поверхні.*

UDC 621.981:669.14

V.G. Zagoryanskiy, Ph.D.,

A.A. Shapoval, Ph.D.,

D.V. Mos'pan, Ph.D.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ANALYSIS OF THE TENSE STATE AT PLASTIC BENDING OF DOUBLE-LAYER SHEETS BY PLATING LAYER INSIDE

In the article, on the basis of analysis of the tense state of double-layer sheets at a plastic bending a plating layer inside, a mathematical model is working out that it is possible to define distribution of tensions on the thickness of sheet. On the basis of these relations the radius of curvature of neutral surface of tensions, necessary for determination of flexion moment and maximum and possible radiuses flexible double-layer sheets, is determined. The relations allow to determine position of neutral surface in the double-layer sheets made from any metals.

Keywords: *plastic bending, two-layer sheet, bending a cladding layer inside, stress distribution, radius of curvature of neutral surface.*

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ В СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР – БАК-АККУМУЛЯТОР

Выполнен анализ принципиальных схем солнечного теплоснабжения, рекомендованных к применению в ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010, с целью определить требования к одному из возможных способов (устройств) теплопередачи от солнечного коллектора к баку-аккумулятору, обеспечивающего существенное повышение КПД солнечных систем при существующих характеристиках солнечных коллекторов.

Ключевые слова: солнечное теплоснабжение, теплопередающее устройство, бак-аккумулятор, солнечный коллектор.

Введение. В условиях географического расположения Украины среднегодовой поток дневной солнечной энергии, поступающей за 1 день на 1 м^2 поверхности Земли, составляет $E = 14 \text{ МДж/м}^2$ [1]. При круглогодичном использовании эта величина составит $E = 5110 \text{ МДж/м}^2$, столько же тепла можно получить при сжигании 150 м^3 природного газа с низшей теплотворной способностью $34,17 \text{ МДж/м}^3$. Вопрос использовать или нет данный вид энергии для теплоснабжения и подготовки горячей воды бытовых и промышленных объектов Украины на сегодняшний день не стоит. Стоит вопрос рационального использования основных элементов данных систем, как с точки зрения экономической эффективности, так и применяемых технических решений и методик расчета на этапе проектирования.

Анализ последних исследований и публикаций. Основным нормативным документом для проектных организаций является национальный стандарт ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010 [2]. Данный нормативный документ (приложение Б) содержит принципиальные схемы и особенности работы отдельных схемных решений.

Во всех схемных решениях можно выделить два основных элемента: солнечный коллектор и бак-аккумулятор. Если солнечный коллектор является преобразователем солнечной энергии в тепловую, расходуемую на нагрев теплоносителя в системе, то наличие бака-аккумулятора обусловлено несовпадением графиков нагрузки систем солнечного теплоснабжения с суточным или годовым поступлением солнечной энергии [1].

В работе [3] рассмотрена эффективность работы аккумуляторов теплоты в системах солнечного теплоснабжения. При этом к числу влияющих параметров на КПД бака-аккумулятора относят перепад температуры между солнечным коллектором и баком-аккумулятором. Однако в работе нет рекомендаций о возможных способах повышения КПД солнечных систем теплоснабжения.

Цель работы, постановка задач. Целью настоящей работы является определение требований к одному из возможных способов (устройств) теплопередачи от солнечного коллектора к баку-аккумулятору, обеспечивающего существенное повышение КПД гелиосистем при существующих характеристиках солнечных коллекторов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть и проанализировать схемы солнечного теплоснабжения и приготовления горячей воды, представленные в ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010;
- определить факторы, которые оказывают существенное влияние на КПД гелиосистем в системе солнечный коллектор – бак-аккумулятор.

Материалы исследования. Рассмотрим и проанализируем схемы солнечного теплоснабжения и приготовления горячей воды.

При рассмотрении схем не будем учитывать конструкцию и принцип работы солнечного коллектора. Считаем, что солнечный коллектор обеспечивает нагрев подаваемого в него теплоносителя на градиент температуры, величина которого зависит от метеорологических условий.

Наиболее просты в устройстве проточные термосифонные одноконтурные системы естественной циркуляции (рис. 1, а [1, 2]), где в качестве теплоносителя используется непосредственно вода, применяемая в бытовых или промышленных целях. Однако все их преимущества сводятся к нулю из-за низкой тепловой эффективности ввиду малых скоростей движения теплоносителя и невозможности работы при отрицательных температурах окружающего воздуха.

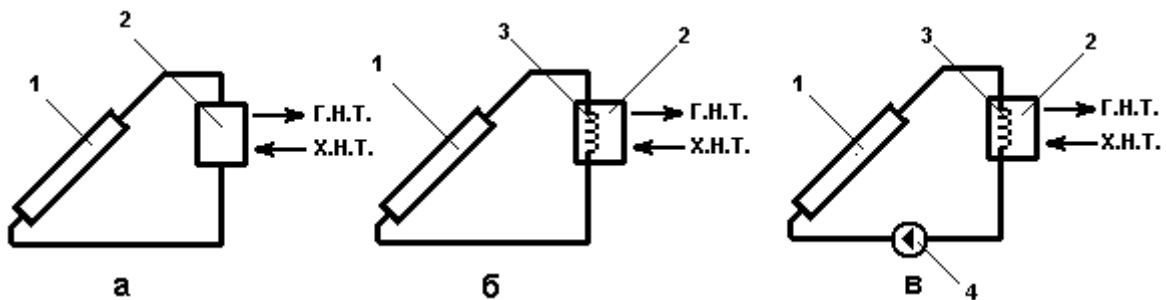


Рис. 1. Одноконтурные системы солнечного теплоснабжения:

1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – теплообменник; 4 – циркуляционный насос

Для обеспечения возможности работы при отрицательных температурах в качестве теплоносителя применяют незамерзающие жидкости (антифризы) (рис. 1, б), а для интенсификации теплообмена естественную циркуляцию заменяют принудительной, применяя циркуляционный насос (рис. 1, в [1, 2]). Для исключения контакта нагреваемой воды с антифризом в схеме нагрева используется разделяющий теплообменник [1].

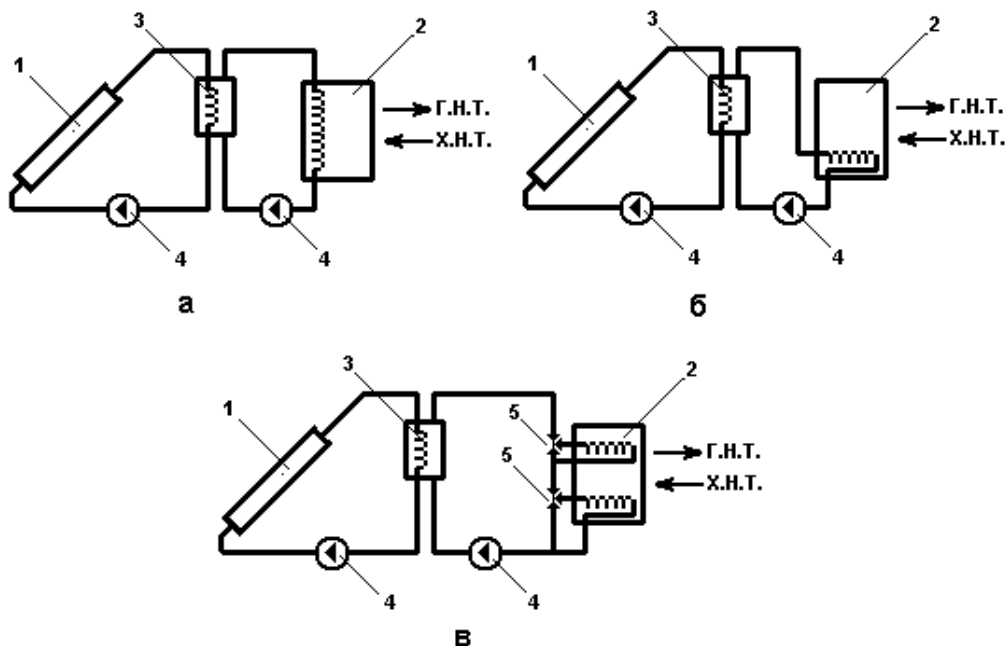


Рис. 2. Многоконтурные системы солнечного теплоснабжения:

1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – высокоскоростной теплообменник; 4 – циркуляционный насос; 5 – двухходовой переключающий клапан.

Анализ данных схем позволяет сделать вывод о том, что эффективность использования солнечной энергии уменьшается прямо пропорционально увеличению температуры в баке-аккумуляторе. Это связано с тем, что температура, подаваемого в солнечный коллектор теплоносителя, растет с температурой воды в баке аккумулятора, а это в свою очередь приводит к уменьшению КПД солнечного коллектора и, как следствие, всей системы в целом.

Одним из путей решения данной проблемы является применение в схеме высокоскоростного теплообменника, который позволяет снизить температуру теплоносителя (рис. 2, а).

Однако, как и в вышерассмотренных схемах, КПД солнечного коллектора уменьшается с ростом температуры в баке аккумулятора.

Схема, приведенная на рис. 2, б, позволяет уменьшить взаимосвязь между температурой в баке-аккумуляторе и КПД солнечного коллектора, за счет расположения теплообменника в нижней части бака аккумулятора и тем самым обеспечивая наименьшую температуру теплоносителя путем естественного расслоения воды (стратификацию) – горячая вода сверху, холодная вода внизу. По данным работы [3] стратифицирование воды в баке-аккумуляторе приводит к увеличению КПД систем солнечного теплоснабжения на 15 %. Недостатком данной схемы является жесткая привязка к геометрическим размерам бака-аккумулятора. Чтобы обеспечить интенсивную естественную стратификацию воды высота бака аккумулятора должна быть в 3–5 раз больше его диаметра.

Схема, представленная на рис. 2, в, позволяет осуществлять принудительную стратификацию воды в баке-аккумуляторе за счет установки нескольких теплообменников. Недостатком данной схемы является увеличение стоимости системы за счет применения нескольких теплообменников и использования двухходовых переключающих клапанов.

Общим недостатком рассмотренных многоконтурных схем являются дополнительные потери на теплообменных процессах в высокоскоростном теплообменнике.

Выводы. Для существенного повышения КПД гелиосистем при существующих характеристиках солнечных коллекторов необходима разработка принципиально нового способа передачи тепла от солнечного коллектора к баку-аккумулятору. Основными требованиями, которыми необходимо руководствоваться при разработке такого способа или устройства являются:

- теплопередача от солнечного коллектора к баку-аккумулятору должна происходить при минимально возможных температурах теплоносителя;
- количество теплопередающих устройств (теплообменников) от солнечного коллектора к баку-аккумулятору должно быть сведено к минимуму;
- теплопередающее устройство должно обеспечивать интенсивную температурную стратификацию воды в баке-аккумуляторе.

Литература

1. Харченко Н.В. *Индивидуальные солнечные установки [Текст] / Н.В. Харченко.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
2. ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010. *Настанова з улаштування систем сонячного теплопостачання в будинках житлового і громадського призначення.* – На заміну ВСН 52-86; чинний з 01.09.2010. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 45 с.
3. Денисова А.Е. *Оценка эффективности работы аккумуляторов теплоты в системах солнечного теплоснабжения [Текст] А.Е. Денисова, А.С. Мазуренко, А.И. Пономарь // Тр. Одес. политехн. ун-та.* – 2000. – Вып. 3. – С. 73-77.

© А.И. Сердюк

О.І. Сердюк, к.т.н., доц.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

ВИМОГИ ДО ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМІ СОНЯЧНИЙ КОЛЕКТОР – БАК-АКУМУЛЯТОР

Виконано аналіз принципових схем сонячного теплопостачання, рекомендованих до застосування в ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010, з метою визначити вимоги до одного з можливих способів (пристроїв) теплопередачі від сонячного колектора до бака-аккумулятора, що забезпечить істотне підвищення ККД геліосистем при існуючих характеристиках сонячних колекторів.

Ключові слова: *сонячне теплопостачання, теплопередавальний пристрій, бак-аккумулятор, сонячний колектор.*

O.I. Serdyuk, Ph.D., Associate Professor

SHEI «Pryazovskyi State Technical University», Mariupol

REQUIREMENTS TO HEAT-TRANSMITTING DEVICES IN SYSTEM THE SOLAR COLLECTOR – THE TANK ACCUMULATOR

The analysis of the concepts of solar heating systems are recommended for use in DSTU-N B V.2.5-43:2010 (Ukrainian State Standart) in order to determine the requirements for one of the possible ways (devices) heat transfer from the solar collector to the storage tank provides a significant increase in the efficiency of solar systems in the existing characteristics of the solar collectors.

Keywords: *solar heating, heat transfer device, storage tank, solar collector.*

В.Д. Рудь, д.т.н., професор

В.В. Шиберко, аспірант

В.В. Сергеев, інженер

Луцький Національний Технічний Університет

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ ПОРОШКІВ

У статті проаналізовано та розроблено алгоритм роботи процесу засипки порошків із застосуванням вібраційних коливань, а також досліджено зміну пористості при накладанні вібрацій, побудовано графіки отриманих залежностей.

Ключові слова: процес засипки, неоднорідність структури, алгоритм, вібраційні коливання, пористість.

Постановка проблеми. Одним з основних напрямків розвитку технології машинобудування на сьогодні є вдосконалення відомих і розроблення нових матеріалів. Визначне місце в цьому процесі займають технології порошкової металургії. При отриманні таких матеріалів з гарантованими властивостями доцільно контролювати параметри їх структури в процесі виготовлення, до яких відносяться: щільність пресовки, якість контактів, розміри зерен, вміст компонентів, і т.д.

Аналіз структур та результати їх комп'ютерного моделювання показують, що отримані за традиційною технологією порошкової металургії заготовки мають суттєві недоліки. Особливо це стосується процесу засипки порошків, який супроводжується утворенням додаткових пустот – «арочний ефект». Поява «арочного ефекту», призводить до неоднорідності властивостей всередині матеріалів, і не дає можливість отримувати структурні характеристики на якісному рівні. Таким чином, прогнозування структурних характеристик матеріалів які отримуються в результаті сукупності технологічних операцій з відомими характеристиками є актуальним завданням матеріалознавства.

Аналіз останніх публікацій. Аналіз структури різноманітних матеріалів, дослідження процесів спікання, екструзії й дифузії, а також моделювання структури пористих систем висвітлені у роботах: А.П. Карнаухова, А.Ю. Неймарка, Л.И. Хейфеца, Ю.Н. Крючкова [2, 5]. Особливість цих робіт полягає в тому, що розглядається процес заповнення прес-форм частинками регулярної форми, тобто набори однакових елементів, які закономірно розміщені в просторі та розподілені статистично. У свою чергу, частинки великого масштабу в правильній упорядкованій будові можуть містити більш дрібні дефекти, внаслідок чого спостерігається велика локальна неоднорідність реальних матеріалів, яку необхідно знати і вміти контролювати. Відомо, що для покращення якості кінцевого виробу застосовуються вібраційні коливання [2].

Мета роботи: створити комп'ютерно-імітаційну модель засипки порошків із застосуванням вібраційних коливань та провести аналіз отриманих структур.

Основні результати дослідження. Для кращого заповнення прес-форми порошком, підвищення фізико-механічних властивостей отриманих виробів, а також отримання порошкових пористих матеріалів з якісними структурними властивостями можливо за допомогою «вібраційних коливань», які необхідні для додаткового ущільнення заготовки. Ефект ущільнення полягає в руйнуванні початкових зв'язків між частками та їх переміщенням одна відносно одної (рис.1).

На рис.1. наведено вікно розробленої нами імітаційної програми для дослідження впливу вібраційних коливань на структурні зміни полідисперсної засипки.

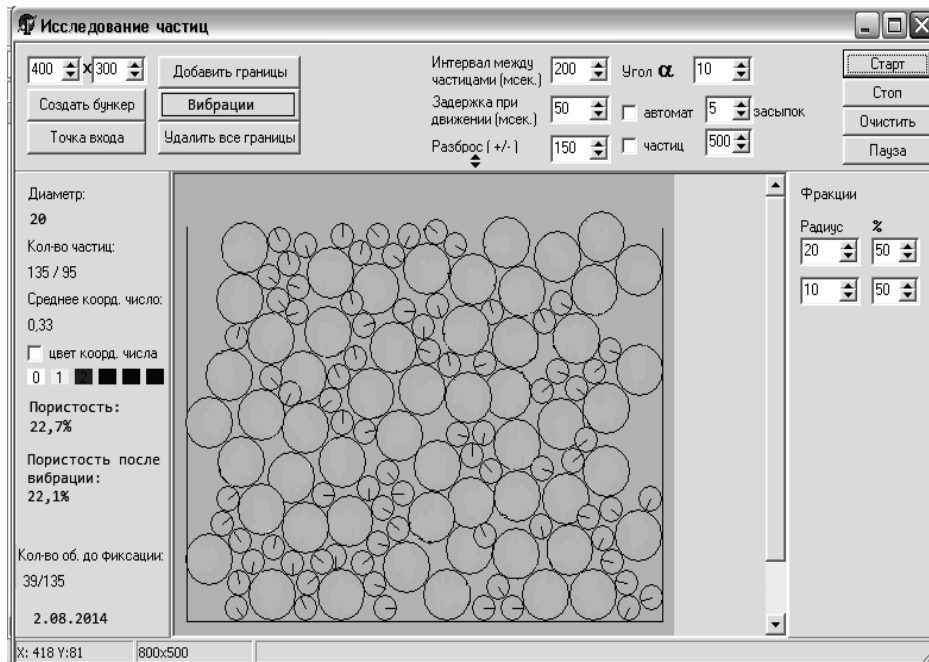


Рис.1. Дослідження частинок із застосуванням вібрацій

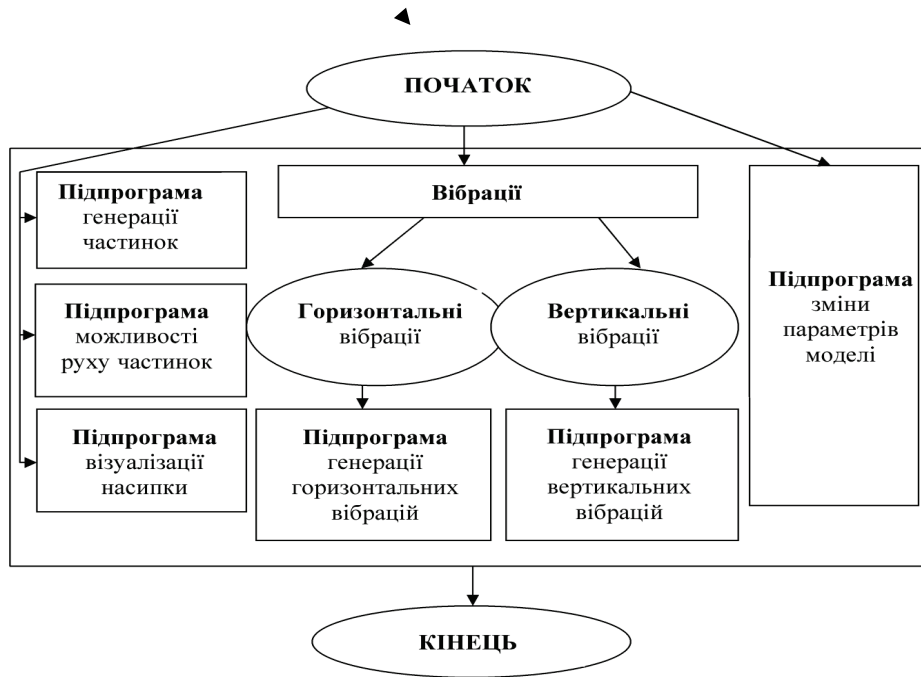


Рис.2. Схема алгоритму роботи

Алгоритм заповнення частинками прес-форми реалізує вертикальні та горизонтальні вібрації. Вони можуть бути незалежно ввімкненими або ж вимкненими у будь-який момент роботи програми. Величинами, що характеризують віброколивання в алгоритмі є: амплітуда та частота коливань. Структурні характеристики засипок визначаються: величиною амплітуди коливань A , частотою коливань W , розмірами часток та їх процентним співвідношенням в шихті. Змінним параметром виступає також період накладання вібрацій. Розміри часток задаються в пікселях і не залежать від роздільної здатності монітора. Параметри віброколивання можуть бути змінені за допомогою панелі керування вібраціями. Алгоритм моделі (рис.2) передбачає, що процедури накладання горизонтальних та вертикальних віброколивання аналогічні. Відмінність між ними полягає в тому, що основою для реалізації горизонтальних коливань є X -координата, а для вертикальних –

У-координата. Модель передбачає можливість одночасної реалізації горизонтальних та вертикальних коливань. Співвідношення горизонтальних та вертикальних коливань, які накладаються на процес одночасно, дає можливість дослідити вплив історії процесу засипки.

Схема алгоритму роботи з використанням вібрацій, зображена на (рис.2.).

Для прикладу роботи моделі наведено засипку порошоків при застосуванні вібраційних коливань. Засипку проводили у квадратному бункері розміром 400 на 300 піксел. Значення кута α складало 10^0 , що характеризує коефіцієнт внутрішнього тертя часток. Вібраційні коливання застосовували на протязі 5-10 хвилин. Частота коливань була сталою і складала 2 коливання на секунду. Вихідні параметри та отримані результати наведені у (таблиці 1).

Таблиця 1. Зміна пористості при накладанні вібраційних коливань

D, піксел	Початкова пористість, %	Пористість після вібраційних коливань, %
10	19,1	18,7
15	20,4	20
20	22,7	22,1
24	23,8	23,4
29	25,2	25
35	27	26,2
40	28,9	28

Із отриманих результатів побудували графік отриманих залежностей, який зображений на (рис.3).

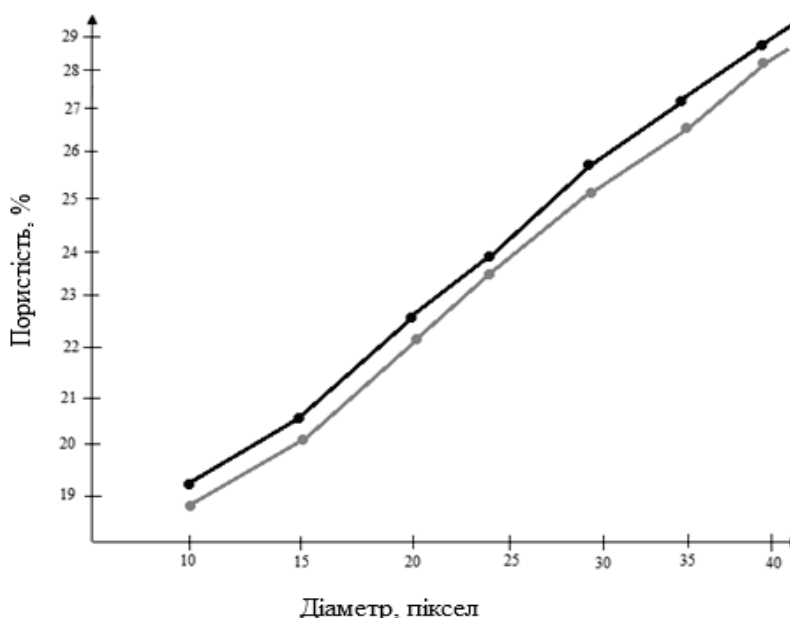


Рис. 3. Вплив технологічних параметрів на зміну пористості

(де: ● пористість за традиційною технологією, ● пористість з використанням вібраційних коливань)

Висновки:

На основі розробленої імітаційної моделі та алгоритму її реалізації є можливість дослідити зміну структури заготовки в широкому діапазоні технологічних параметрів. Застосування моделі дозволяє скорочувати трудові затрати за рахунок зменшення кількості технологічних операцій, а також досліджувати структурно-неоднорідні матеріали та прогнозувати розподіл пористості при будь-якій конфігурації заготовки, незважаючи на розмір та геометричні параметри бункера.

Література:

1. Антонов И.В. Численные методы моделирования микроструктуры зернистых материалов [Текст] / Е.Ю. Нурканов, М.С. Петров. – М., 2004. – 350с.
2. Карнаухов А.П. Моделирование пористых материалов [Текст] // Порошковая металлургия. – 1976. – 180с.
3. Крючков Ю.Н. Структурная модель пористых материалов [Текст] // Порошковая металлургия. – 1993. – 66с.
4. Лебедев А.А. Критерии прочности структурно-неоднородных материалов [Текст] // Металлургия. – 1969. – 57с.
5. Неймарк А.Ю. Многофазные процессы в пористых средах [Текст] / Л.Ю Хейфец. – М.: Химия, 1982. – 440с.

© В.Д. Рудь, В.В. Шиберко, В.В. Сергеев

УДК 621.762:678 -19

В.Д. Рудь, д.т.н., профессор

В.В. Шиберко, аспирант

В.В. Сергеев, инженер

Луцкий Национальный Технический Университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВ

В статье проанализирован и разработан алгоритм работы процесса засыпки порошков с применением вибрационных колебаний, а также исследовано изменение пористости при наложении вибрации, построены графики полученных зависимостей.

Ключевые слова: *процесс засыпки, неоднородность структуры, алгоритм, вибрационные колебания, пористость.*

UDC 621.762:678 -19

V. Rud, doctor of technical sciences, professor

V. Shyberko, postgraduate

V. Sergeyev, engineer

Lutsk National Technical University

SIMULATION MANUFACTURING TECHNOLOGY SAMPLES WITH POWDERS

The paper analyzes the algorithm works and the process of filling powders using vibrational oscillation and studied the change in porosity replaying vibrations, Graphs of obtained dependences (results) are built.

Keywords: *process of filling, inhomogeneities structure, algorithm, vibratory oscillations, porosity.*

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МОДЕЛИ БРАУНА НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Предложен метод параметрического синтеза модели Брауна в расширенной области внутреннего параметра, основанный на оптимизации показателей чувствительности и робастности ретроспективных прогнозных оценок. Предложенный подход проиллюстрирован примером.

Ключевые слова: модель Брауна, чувствительность и робастность прогнозных оценок.

Введение. Модель Брауна [1], или модель экспоненциального сглаживания, приобрела значительную популярность среди практиков прогнозирования в силу своей наглядности и алгоритмической простоты, а также свойства адаптивности, присущего ей [2]. В качестве прогнозной оценки, генерируемой этой моделью, выступает экспоненциальное среднее значение стационарного временного ряда:

$$F_t = \alpha A_{t-1} + \alpha(1-\alpha)A_{t-2} + \dots + \alpha(1-\alpha)^{n-1}A_{t-n} = \sum_{i=1}^n \alpha(1-\alpha)^{i-1}A_{t-i}, \quad (1)$$

где F_t – прогноз наблюдаемого показателя на момент времени t , A_{t-1} , A_{t-2} , ..., A_{t-n} – значения ряда в соответствующие моменты времени, n – длина выборки, α – параметр (константа) сглаживания.

Выбор параметра сглаживания α – основная задача параметрического синтеза модели Брауна, – не имеет однозначного решения в силу перспективной неопределенности.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Различные подходы к решению задачи параметрического синтеза прогнозной модели Брауна изложены в работах многих авторов, например, [3-9].

Одной из центральных идей параметрического синтеза прогнозных моделей является парадигма ретроспективного анализа, основанная на гипотезе о сохранении в будущем качества ретроспективных прогнозных оценок, полученных для значений временного ряда в прошлые относительно t моменты времени.

Аналитически решить задачу параметрического синтеза возможно лишь «задним числом», т.е. для моментов времени $(t-1)$, $(t-2)$ и более ранних [8]. Для этого необходимо решать ретроспективные уравнения вида

$$\Delta_{t-1}(\alpha) = 0 \text{ или } \varepsilon_{t-1}(\alpha) = 0, \quad (2)$$

где $\Delta_{t-1}(\alpha)$ и $\varepsilon_{t-1}(\alpha)$ – аналитические зависимости соответственно абсолютной и относительной ретроспективных ошибок прогноза на момент времени $(t-1)$ от внутреннего параметра модели Брауна – параметра сглаживания α .

Уравнения (2) – алгебраические, т.к. зависимости $\Delta_{t-1}(\alpha)$ и $\varepsilon_{t-1}(\alpha)$ полиномиальны:

$$\Delta_{t-1}(\alpha) = F_{t-1}(\alpha) - A_{t-1} = \sum_{i=1}^{n-1} \alpha(1-\alpha)^{i-1} A_{t-i-1} - A_{t-1} = 0, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{t-1}(\alpha) = 100 \cdot \frac{F_{t-1}(\alpha) - A_{t-1}}{A_{t-1}} = \frac{100}{A_{t-1}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \alpha(1-\alpha)^{i-1} A_{t-i-1} - A_{t-1} \right) = 0. \quad (4)$$

Очевидно, что корни уравнений (3) и (4) совпадают, поэтому будем рассматривать только ретроспективное уравнение (4) для относительной ошибки ε_{t-1} .

Параметр сглаживания α в модели Брауна – вещественный, причем в качестве области его допустимых значений используют как классическое множество значений α [3]

$$K_c = \{\alpha : 0 \leq \alpha \leq 1\}, \quad (5)$$

так и расширенное множество [4]

$$K_{ext} = \{\alpha : 0 \leq \alpha \leq 2\}. \quad (6)$$

В рамках настоящей публикации будем рассматривать решение задачи параметрического синтеза на расширенном множестве допустимых значений K_{ext} . Учитывая тот факт, что $K_c \subset K_{ext}$, все выводы и рекомендации будут справедливы и для классического множества допустимых значений K_c .

Постановка задачи. Будем считать выбор значения параметра сглаживания α обоснованным для прогноза на момент времени t , если оно обеспечивает абсолютную точность ретро-прогноза на момент времени $(t-1)$. Исходя из этого, будем искать вещественные корни уравнения (4), принадлежащие множеству K_{ext} . В случае, когда таких корней отыщется не меньше двух, возникает задача множественного выбора значения параметра сглаживания α из группы значений, состоящих из вещественных корней уравнения (4).

Основная часть. На рис. 1 схематично представим графическое решение алгебраического уравнения вида (4) для относительной ошибки ε_{t-1} .

Пусть на расширенном множестве допустимых значений K_{ext} уравнение (4) имеет m вещественных корней $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m, m \leq n-1$.

При $m \geq 2$ из значений $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ необходимо выбрать то, которое обеспечивает максимальное качество ретро-прогноза на момент времени $(t-1)$.

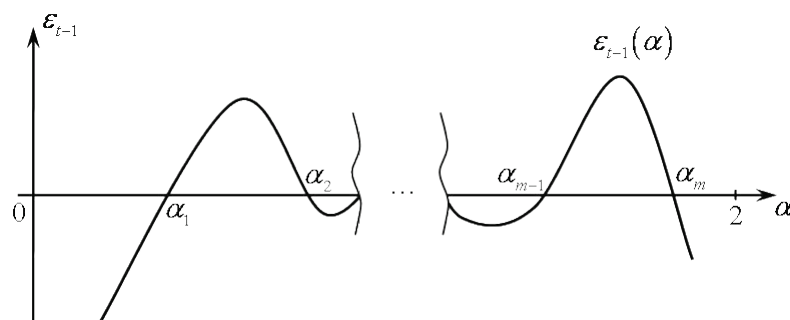


Рис. 1. Графическое решение ретроспективного уравнения (4) на расширенном множестве допустимых значений K_{ext} параметра сглаживания α

Для сравнительного анализа всего набора прогнозных оценок, полученных при значениях параметра сглаживания $\alpha = \alpha_1, \alpha = \alpha_2, \dots, \alpha = \alpha_m$, предлагается использовать пре-

образование, нормирующее значение параметра сглаживания α относительно каждого из вещественных корней:

$$\alpha = \alpha_j + \Delta\alpha_j = \alpha_j + 0,01\alpha_j\varepsilon_\alpha, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

где α_j – вещественные корни уравнения (4), $\Delta\alpha_j$ – абсолютное, а ε_α – относительное отклонение относительно вещественного корня α_j .

Учитывая симметрию свойств коэффициентов модели Брауна на классическом K_c и запредельном допустимом множестве K_{out} [10], выражение (7) будем использовать при $\alpha_j \in [0, 1]$, а при $\alpha_j \in (1, 2]$ выражение для $\Delta\alpha_j$ примет вид:

$$\Delta\alpha_j = 0,01(2 - \alpha_j)\varepsilon_\alpha. \quad (8)$$

После преобразований уравнение (4) примет следующий вид:

$$\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha) = \frac{100}{A_{t-1}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} (\alpha_j + 0,01\alpha_j\varepsilon_\alpha)(1 - \alpha_j - 0,01\alpha_j\varepsilon_\alpha)^{i-1} A_{t-i-1} - A_{t-1} \right) \stackrel{!}{=} 0, \quad (9)$$

$$\alpha_j \in [0, 1], \quad j = 1, 2, \dots, k,$$

и

$$\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha) = \frac{100}{A_{t-1}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} (\alpha_j + 0,01(2 - \alpha_j)\varepsilon_\alpha)(1 - 0,01(2 - \alpha_j)\varepsilon_\alpha)^{i-1} A_{t-i-1} - A_{t-1} \right) = 0, \quad (10)$$

$$\alpha_j \in (1, 2], \quad j = k+1, k+2, \dots, m,$$

где k – количество вещественных корней на классическом допустимом множестве K_c , $0 \leq k \leq m$.

Если зависимости вида (9) и (10) для всех вещественных корней ретроспективного уравнения (4) общим количеством m изобразить в единой плоскости параметров $(\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_\alpha)$ как показано на рис. 2, то можно легко провести их сравнительный анализ.

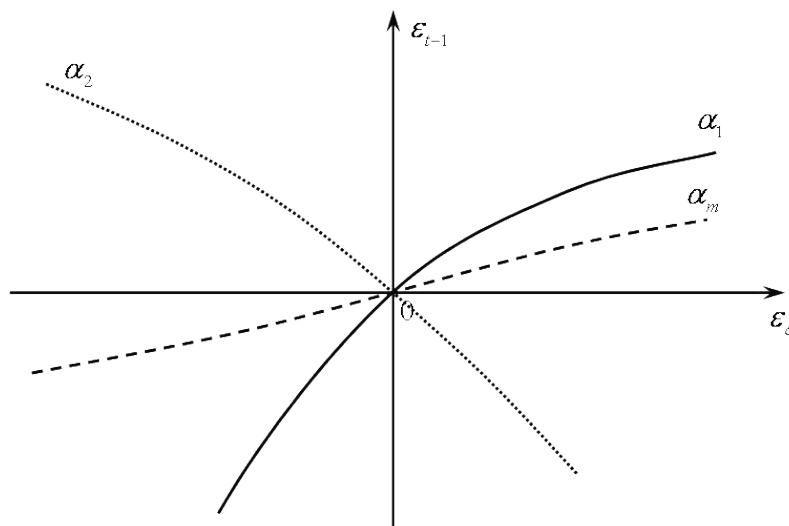


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки ретроспективной прогнозной оценки ε_{t-1} от отклонения ε_α параметра сглаживания α относительно корней $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ ретроспективного уравнения (4)

Все кривые $\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha)$ на рис. 2, соответствующие вещественным корням ретроспективного уравнения (4), проходят через центр координат, т.к. относительная ошибка прогнозных оценок при $\alpha = \alpha_j$, $j = 1, 2, \dots, m$ равна нулю.

Для решения задачи сравнительного анализа необходимо сформулировать критерии, по которым возможно сравнение ретроспективных прогнозных оценок.

Очевидно, что ошибка ретроспективной прогнозной оценки не может быть таким критерием, т.к. все значения $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, будучи корнями уравнения (4), обеспечивают её нулевое значение.

Предлагается использовать в качестве критериев такие характеристики прогнозных оценок, как чувствительность и робастность.

Обе они характеризуют зависимость качества прогнозной оценки (а именно точности) от изменения внутреннего настроечного параметра модели – параметра сглаживания α .

Дадим определения этим схожим, но, тем не менее, принципиально разным характеристикам.

Чувствительность прогнозной оценки к изменению внутренних параметров прогнознoй модели – степень изменения в значении точности прогнознoй оценки при небольших изменениях в значениях внутренних независимых переменных (в частности, параметра сглаживания α).

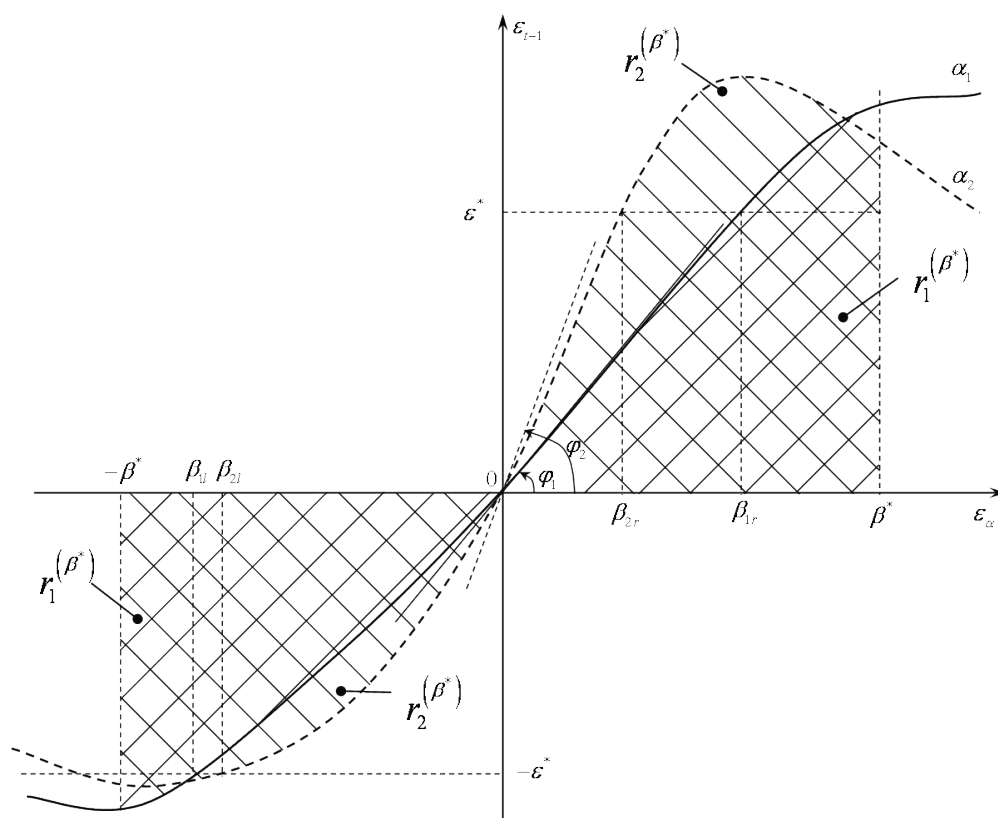


Рис. 3. Графическая интерпретация показателей чувствительности и робастности

В качестве *показателя чувствительности прогнознoй оценки* предлагается использовать значение модуля производной функции ошибки $\varepsilon_{t-1}'(\varepsilon_\alpha)$ в точках $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$:

$$s_j = \left| \frac{d\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha)}{d\varepsilon_\alpha} \right|_{\varepsilon_\alpha=0} \left| \operatorname{tg} \varphi_j \right|, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

где s_j – показатель чувствительности j -й прогнозной оценки, $\left. \frac{d\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha)}{d\varepsilon_\alpha} \right|_{\varepsilon_\alpha=0}$ – зна-

чения производной j -й функции ретроспективной ошибки в точке $\varepsilon_\alpha = 0$, φ_j – угол наклона кривой $\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha)$ в точке $\varepsilon_\alpha = 0$ (рис. 3), m – количество вещественных корней ретроспективного уравнения (4) на расширенном множестве допустимых значений K_{ext} .

Робастность прогнозной оценки – способность модели сохранять наперед заданный уровень качества прогноза в максимально широком диапазоне изменений внутренних параметров прогнозной модели (в частности, параметра сглаживания α).

Иногда робастность и грубость (нечувствительность) используют как эквивалентные понятия, однако это справедливо лишь отчасти.

В качестве *показателей робастности* предлагается использовать группу характеристик, геометрический смысл которых показан на рис. 3.

1. β_{jl}, β_{jr} – соответственно левая и правая границы интервала робастности, обеспечивающие сохранение точности прогнозной оценки в наперед заданных пределах $(-\varepsilon^*; \varepsilon^*)$.

2. $\Delta\beta_j = \beta_{jr} - \beta_{jl}$ – ширина интервала робастности.

3. $r_j^{(\beta^*)} = \frac{1}{\int_{-\beta^*}^{\beta^*} |\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha)| d\varepsilon_\alpha}$ – степень робастности в диапазоне $(-\beta^*; \beta^*)$, степень

близости кривой $\varepsilon_{t-1}^{(j)}(\varepsilon_\alpha)$ к оси абсцисс. Например, если при двух прогнозных оценках с одинаковыми значениями $\beta_{1l} = \beta_{2l}$ и $\beta_{1r} = \beta_{2r}$ выполняется условие $r_1^{(\beta^*)} > r_2^{(\beta^*)}$, то более предпочтительной является первая прогнозная оценка.

Очевидно, что $r_j^{(\beta^*)} \in (0, \infty)$. Малые значения степени робастности означают значительную чувствительность или неустойчивость прогнозной оценки к изменению параметра сглаживания α . Большие значения показателя робастности свидетельствуют, что на всем интервале $(-\beta^*; \beta^*)$ кривая чувствительности на рис. 3 «прижата» к оси абсцисс, обеспечивая нечувствительность или устойчивость качества прогнозной оценки к изменению параметра сглаживания α .

Показатели $s_j, \Delta\beta_j, r_j^{(\beta^*)}$ представляют собой группу критериев, по которым и предлагается оптимизировать прогнозные оценки. Возможны различные варианты свертки показателей в один, с учетом смысла каждого из них:

$$s_j \rightarrow \min, \Delta\beta_j \rightarrow \max, r_j^{(\beta^*)} \rightarrow \max. \quad (12)$$

При этом исследователь должен субъективно выбирать значения ε^* и β^* , характеризующие «жесткость» требований к прогнозным оценкам.

Отметим, что при $\varepsilon^* \rightarrow 0$ и $\beta^* \rightarrow 0$ ценность предложенных показателей становится близкой и оптимизацию целесообразно проводить по любому из критериев, исключив все остальные.

Блок-схема алгоритма предлагаемого метода параметрического синтеза модели Брауна представлена на рис. 4.

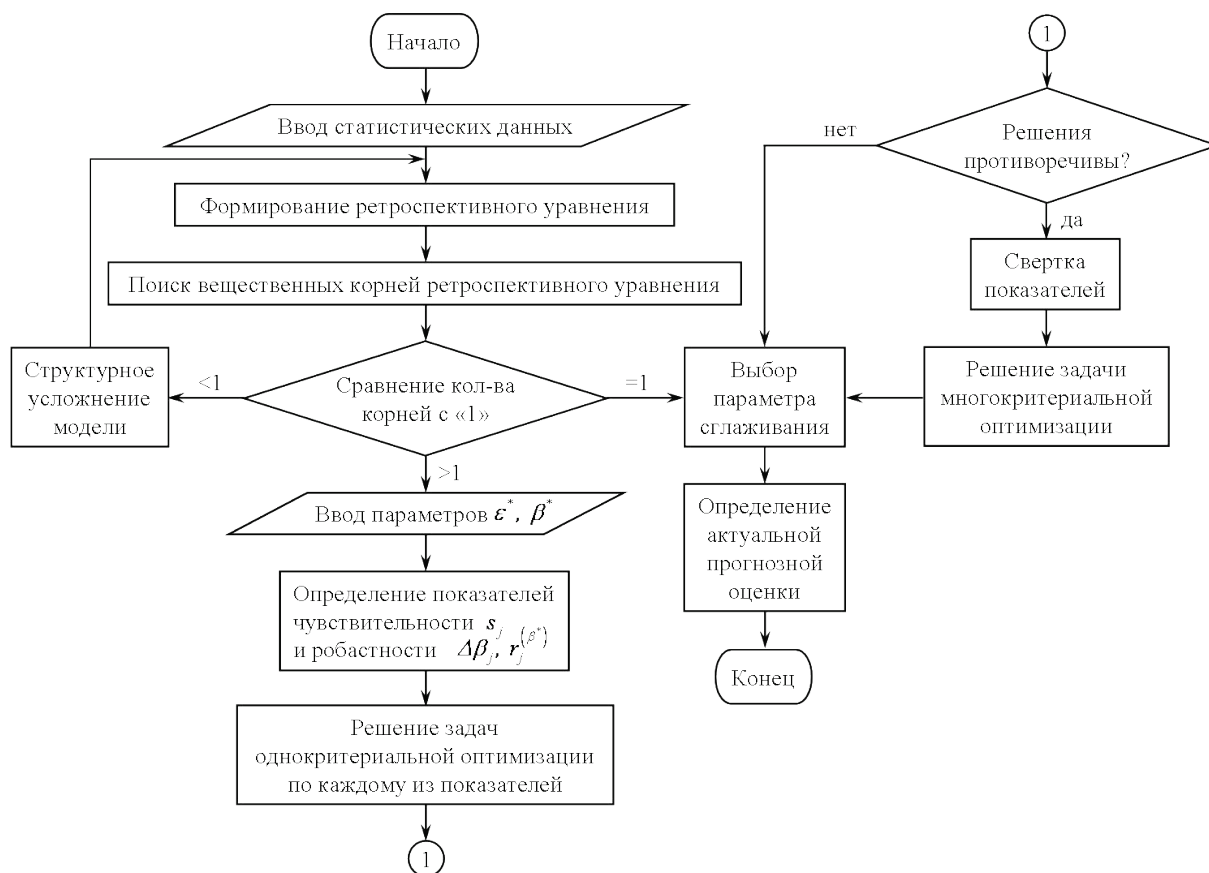


Рис. 4. Блок-схема алгоритма метода параметрического синтеза модели Брауна по критериям чувствительности и робастности ретроспективных прогнозных оценок

Пример. В качестве примера рассмотрим ряд цен Скандинавского рынка электроэнергии [11] в период с 01.01.2000 г. по 03.01.2000 г. с интервалом актуализации один раз в час (рис. 5).

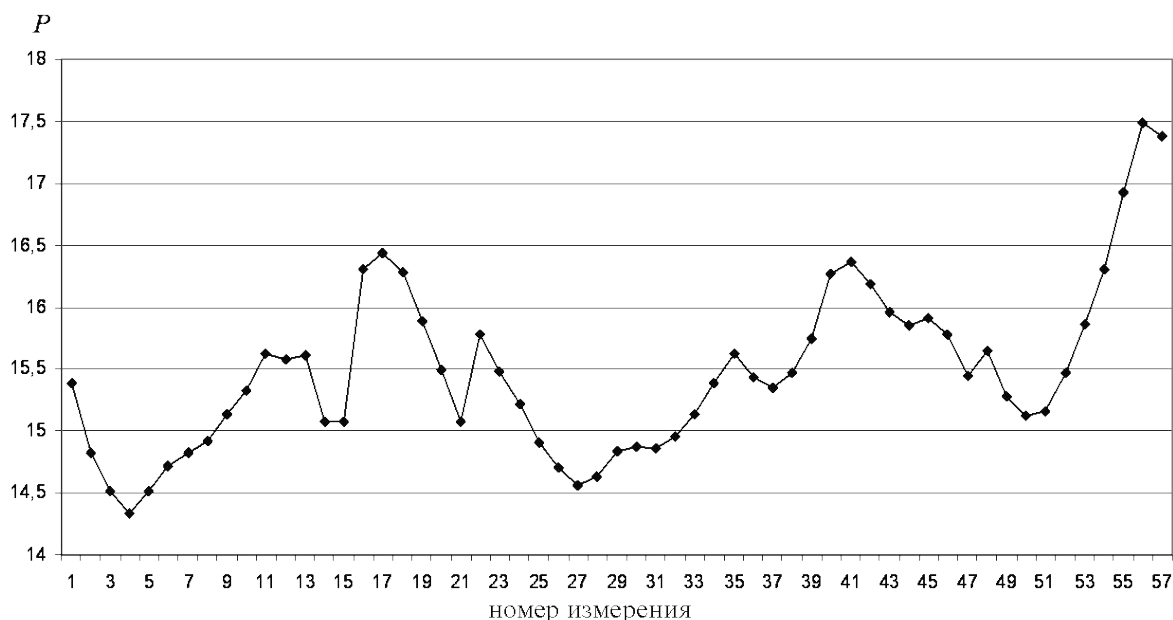


Рис. 5. Ряд данных о цене энергоносителей в Скандинавии

Применим предложенный метод выбора α для выборки с 15-го по 25-й элемент ряда.

Сформируем ретроспективное уравнение вида (4):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{t-1}(\alpha) = & 101.3596193\alpha^{11} - 1117.063222\alpha^{10} + \\ & + 5597.620666\alpha^9 - 16837.11761\alpha^8 + 33776.75051\alpha^7 - \\ & - 47445.75119\alpha^6 + 47615.63562\alpha^5 - 34148.1985\alpha^4 + \\ & + 17167.98097\alpha^3 - 5777.702243\alpha^2 + 1169.00068\alpha - 100 = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

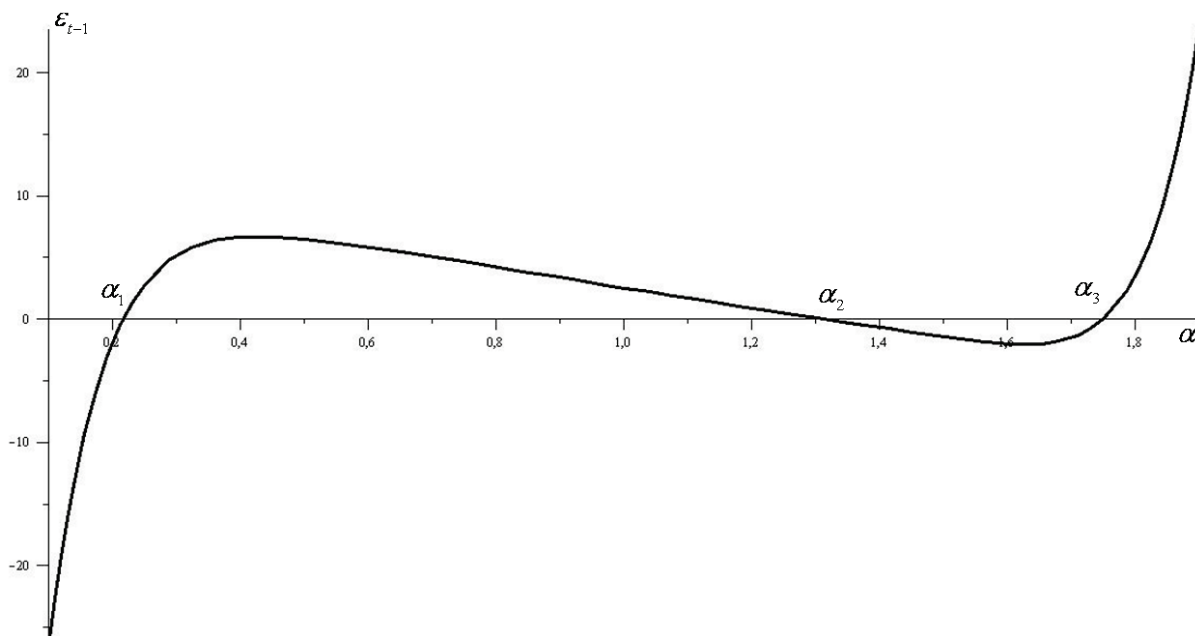


Рис. 6. Вещественные корни ретроспективного уравнения (13)

Вещественные корни уравнения сосредоточены на расширенном допустимом множестве параметра сглаживания α (рис. 6):

$$\alpha_1 = 0,2174 ; \alpha_2 = 1,3126 ; \alpha_3 = 1,7507 . \quad (14)$$

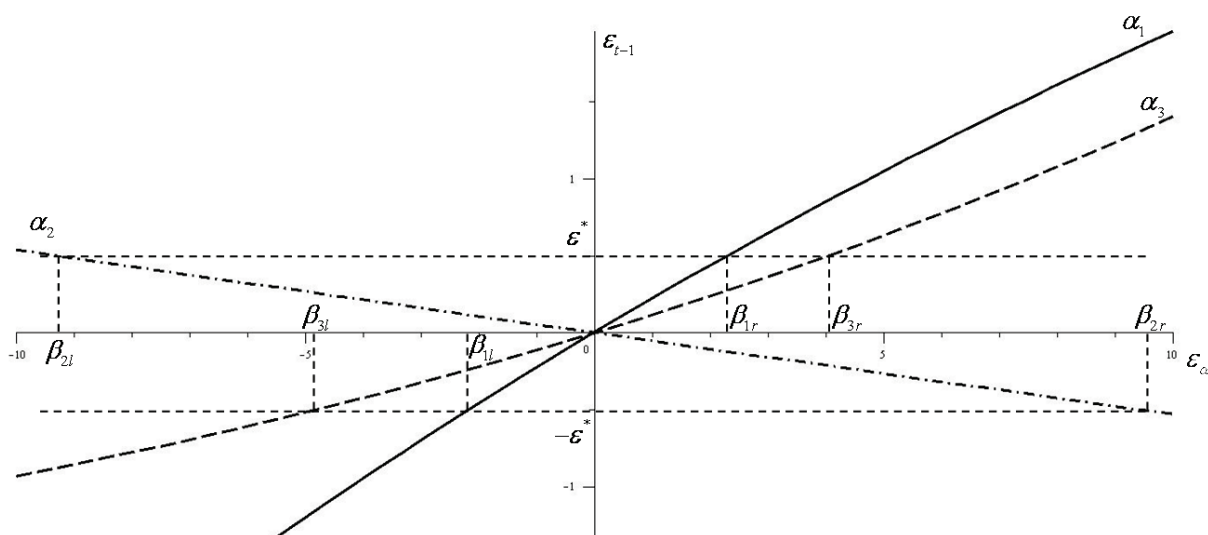


Рис. 7. Графическая оценка чувствительности и робастности прогнозных оценок

Зададим значения $\varepsilon^* = 0,5\%$, $\beta^* = 10\%$.

Определим показатели чувствительности прогнозных оценок в соответствии с (11):

$$s_1 = \left| \frac{d\varepsilon_{j-1}^{(2)}(\varepsilon_\alpha)}{d\varepsilon_\alpha} \right|_{\varepsilon_\alpha=0} = |\operatorname{tg}\varphi_1| = 0,2245, s_2 = 0,0533, s_3 = 0,1144. \quad (15)$$

Графическая оценка чувствительности и робастности прогнозных оценок представлена на рис. 7.

Весь комплекс показателей, рассчитанных по предложенной методике, приведен в табл. 1.

Таблица 1. Результаты ретроспективного анализа временного ряда и оценки чувствительности и робастности прогнозных оценок

Элементы ряда	15-26	15-26	15-26
j	1	2	3
α_j	0,2174	1,3126	1,7507
s_j	0,2245	-0,0533	0,1144
ε^* , %	0,5		
β_{il} , %	-2,1704	-9,3212	-4,7925
β_{jr} , %	2,2886	9,4134	4,0485
$\Delta\beta_j$, %	4,459	18,7346	8,841
β^* , %	10		
$r^{(\beta^*)}$	0,0443	0,1874	0,0865
$\varepsilon_i^{(11)}$, %	-2,3664	0,7907	7,2943
$\varepsilon_i^{(12)}$, %	-0,8478	0,7903	-0,4435

В табл. 1 представлены также относительные ошибки текущих прогнозных оценок на 27-й момент времени при $\alpha = \alpha_j$ для скользящей выборки в 11 элементов ($\varepsilon_j^{(11)}$) и для накопительной выборки в 12 элементов ($\varepsilon_j^{(12)}$).

Как видно из табл. 1, выбор параметра сглаживания $\alpha = 1,3126$ обеспечивает не только робастность ретроспективной прогнозной оценки к изменению α , но и робастность текущей прогнозной оценки к изменению длины выборки n . Отметим также, что в приведенном примере все критерии (показатели чувствительности и робастности) непротиворечивы.

Выводы. 1) Разработан метод параметрического синтеза модели Брауна на основе ретроспективной многокритериальной оптимизации, который позволяет определять настроечные параметры модели, обеспечивающие максимальную устойчивость прогнозных оценок к изменению внутренних параметров модели. 2) Предложены показатели чувствительности и робастности ретроспективных прогнозных оценок, по которым может быть осуществлена многокритериальная оптимизация внутреннего параметра модели Брауна. 3) Разработана блок-схема алгоритма метода параметрического синтеза модели Брауна по критериям чувствительности и робастности ретроспективных прогнозных оценок. 4) Предложенный метод проиллюстрирован примером прогнозирования ряда реальных данных.

Литература

1. Brown R.G. *Smoothing forecasting and prediction of discrete time series. [Текст] - N.Y., 1963.*
2. Лукашин Ю.П. *Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учебное пособие. [Текст] – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.*

3. Рабочая книга по прогнозированию [Текст] / Редкол.: И.В. Бестужев-Лада (отв. ред.). – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
4. Светуных, С.Г. О расширении границ применения метода Брауна [Текст] // Известия Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов. 2002. - №3. - С. 94-107.
5. Методы социально-экономического прогнозирования: учебник для вузов. Том II [Текст] / С.Г. Светуных, И.С. Светуных. – СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 2010. – 103 с.
6. Васильев А.А. Методы выбора постоянной сглаживания в модели прогнозирования Брауна [Текст] // Вестник Тверского государственного университета, 2013, №1 (серия «Экономика и управление». 2013, вып. 17). – С. 183-196.
7. Васильев А.А. Исследование модели прогнозирования Брауна при классических и предельных значениях постоянной сглаживания [Текст] / А.А. Васильев, Е.В. Васильева // Вестник Тверского государственного университета, 2013, №1 (серия «Экономика и управление». 2013, вып. 17). – С. 197-213.
8. Вартамян В.М. Параметрический синтез прогнозной модели экспоненциального сглаживания [Текст] / В.М. Вартамян, Ю.А. Романенков, А.В. Кононенко // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – № 59 – С. 9-16.
9. Вартамян В.М. Анализ адекватности моделей прогнозирования экономических показателей предприятий [Текст] / В.М. Вартамян, Ю.А. Романенков, А.В. Кононенко // Бизнес Информ. – Харьков: Хар. Нац. эконом. ун-т, 2007. - № 3-4. – С. 103-106.
10. Романенков Ю.А. Параметрический анализ области адекватности адаптивной прогнозной модели Брауна [Текст] // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет». – Технічні науки. Випуск 162. – Сімферополь: ВД «АРІАЛ», 2014. – С. 228-236.
11. <http://www.mbureau.ru/sites/default/files/timeseriesarchive.rar>.

© Ю.О. Романенков, Т.Г. Зейнієв

УДК 658.5:004.94

Ю.О. Романенков, Т.Г. Зейнієв

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ МОДЕЛІ БРАУНА НА ОСНОВІ РЕТРОСПЕКТИВНОЇ БАГАТОКРИТЕРІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Запропоновано метод параметричного синтезу моделі Брауна в розширеній області внутрішнього параметра, заснований на оптимізації показників чутливості та робастності ретроспективних прогнозних оцінок. Запропонований підхід проілюстровано прикладом.

Ключові слова: модель Брауна, чутливість і робастність прогнозних оцінок.

UDC 658.5:004.94

Yu.A. Romanenkov, T.G. Zieiniiev

N.Ye. Zhukovsky National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute",
Kharkiv, Ukraine

METHOD OF PARAMETRIC SYNTHESIS OF BROWN'S MODEL BASED ON RETROSPECTIVE MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

Method of parametric synthesis of Brown's model in extended domain of internal parameter is suggested. It is based on optimization of sensitivity and robustness of retrospective forecast. The approach suggested is illustrated by an example.

Keywords: Brown's model, forecast sensitivity and robustness.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ

Приведены результаты моделирования формирования микронеровностей профиля обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенной детали с использованием экспериментальных осциллограмм её колебаний.

Ключевые слова: фрезерование, моделирование, колебания, тонкостенные детали.

Качество поверхности деталей обычно оценивают параметрами шероховатости Ra или Rz . Согласно работе [1] средняя высота профиля в общем случае определяется:

$$Rz = Rz_1 + Rz_2 + Rz_3, \quad (1)$$

где Rz_1 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, а также колебаниями обрабатываемой поверхности и (или) инструмента, относительно друг друга;

Rz_2 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента;

Rz_3 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки. Даже на самых нежелательных режимах величина этой составляющей не превышает 1 мкм.

На составляющую Rz_1 приходится основная доля шероховатости поверхности, поэтому рассмотрение этой составляющей и представляет наибольший интерес.

Жесткость тонкостенных деталей типа «защемленных пластин» в направлении перпендикулярном обрабатываемой поверхности значительно ниже жесткостей в двух других направлениях. Кроме того, в рассматриваемом в данной работе случае жесткость инструмента на порядок превышает жесткость обрабатываемой детали. Поэтому можно предположить, что геометрия микронеровностей обработанной поверхности формируется в основном механическими колебаниями тонкостенной детали в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности.

Для проверки этого предположения была разработана математическая модель процесса формирования микрогеометрии обработанной поверхности. Методика основывается на моделировании процесса цилиндрического фрезерования во времени [2, 3] и способе описания микрогеометрии поверхности детали, предложенного в работе [4] (рис. 1).

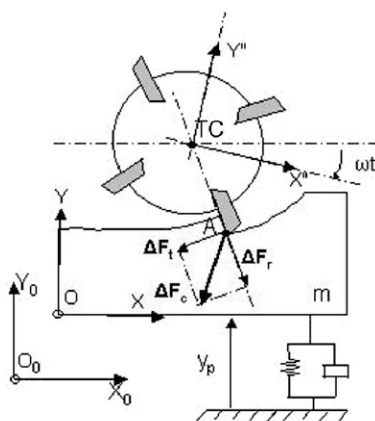


Рис. 1. Модель процесса фрезерования [4]

В математических моделях процесса фрезерования, описанных в работах [2, 3, 4] мгновенное положение обрабатываемой детали (или фрезы) определяется путем решения одного дифференциального уравнения движения в случае одномерного движения, или двух в случае двухмерного:

$$\ddot{y}_p + 2\zeta\omega_0\dot{y}_p + \omega_0^2 y_p = \frac{\omega_0^2}{k} F_y, \quad (2)$$

где y_p – положение обрабатываемой детали в направлении оси Y ; ω_0 – круговая частота собственных колебаний обрабатываемой детали; ζ – коэффициент демпфирования обрабатываемой детали; k – жесткость обрабатываемой детали; F_y – проекция силы резания на ось Y .

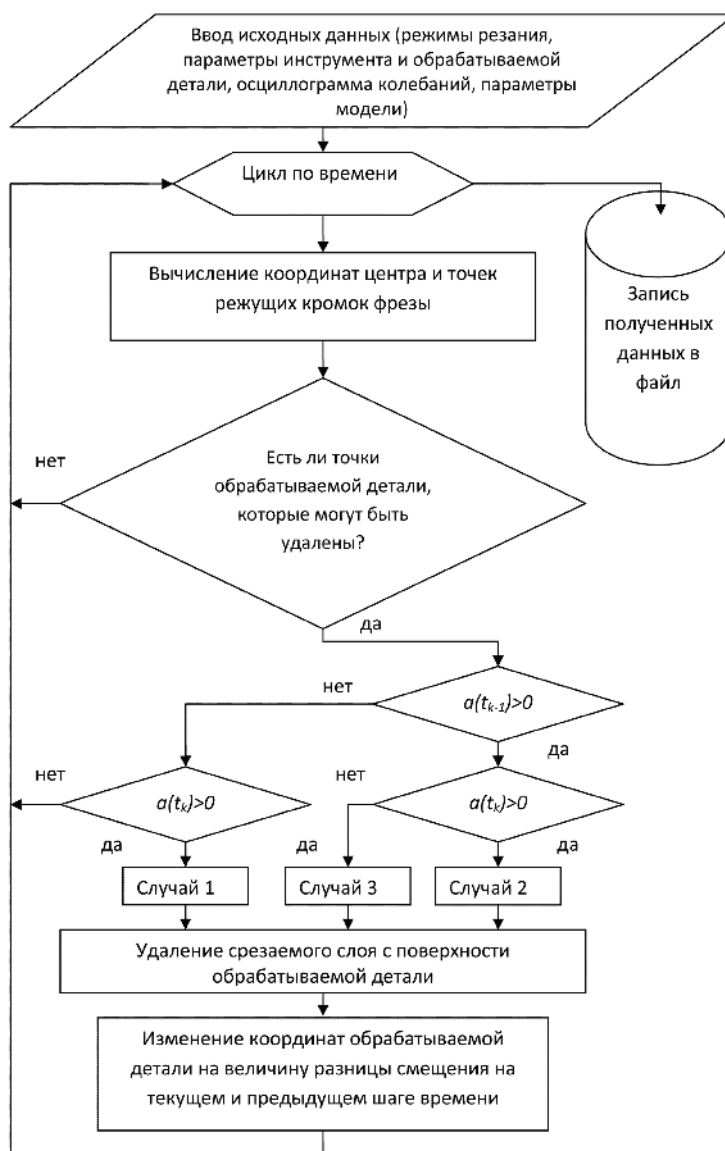


Рис. 2. Обобщенная блок-схема алгоритма моделирования формирования микронеровностей обрабатываемой поверхности при фрезеровании

В отличие от вышеперечисленных работ, в модели, предложенной автором, мгновенное положение обрабатываемой детали определяется по осциллограмме колебаний тонкостенной детали, записанной во время её обработки фрезерованием.

Описание модели

В общем виде алгоритм моделирования формирования геометрии поверхности при концевом фрезеровании тонкостенной детали показан на рис 2. Моделирование производится во временной области, т.е. вычисление положения фрезы, определение положения и модификация обрабатываемой поверхности производится для каждого дискретного момента времени. Геометрические модели фрезы и обрабатываемой детали показаны на рис. 3. Более подробное описание математической модели дано в работе [5].

Осциллограмма колебаний тонкостенной детали, являющаяся исходными данными для моделирования, записывалась на экспериментальном стенде [5] (рис. 4).

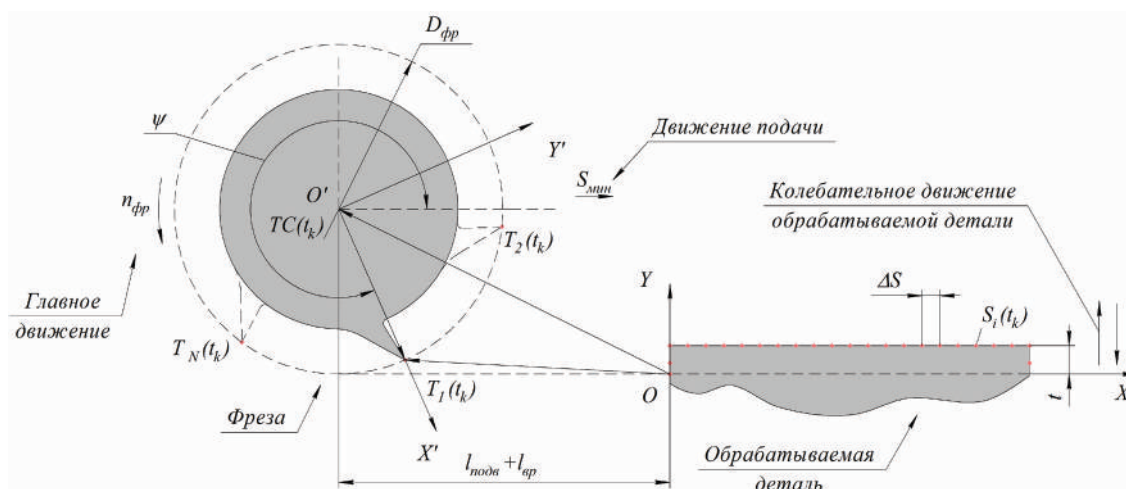


Рис. 3. Геометрические модели фрезы и обрабатываемой детали

Колебания регистрировались индуктивным датчиком (XS1 M18AB120) и с помощью аналого-цифрового преобразователя Е-140 фирмы L-Card записывались компьютером. Профилограмма обработанной поверхности записывалась на профилографе-профилометре Калибр-170311.

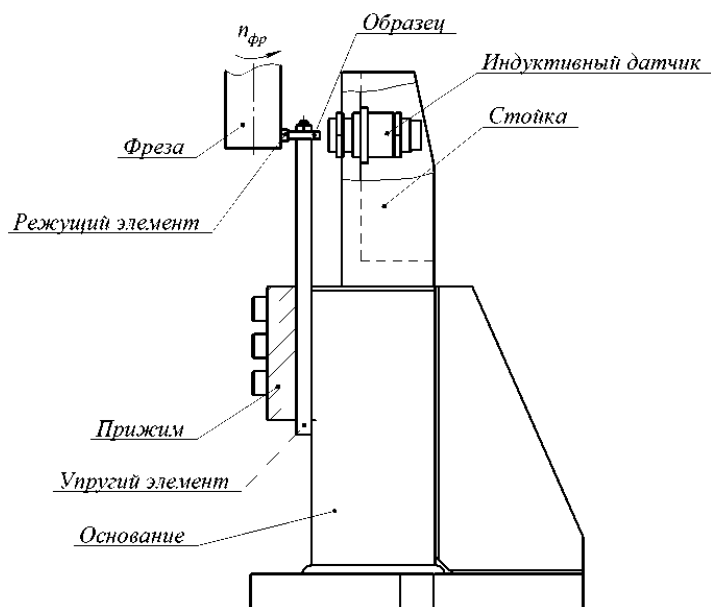


Рис. 4. Схема стенда для исследования механических колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей

Моделирование формирования микронеровностей обработанной поверхности проводилось для случая средних ($n_{фр} = 560$ об/мин) и высоких ($n_{фр} = 1800$ об/мин) скоростей вращения фрезы.

Рассмотрим случай формирования микронеровностей обработанной поверхности при следующих условиях обработки: фрезерование встречное, $D_{фр} = 35$ мм, $n_{фр} = 560$ об/мин, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм, $B = 3,4$ мм (ширина фрезерования, в геометрической модели этот параметр не учитывается). На рис. 5 показан участок виброграммы колебаний тонкостенной детали, полученный с помощью индуктивного датчика. Эта виброграмма служит в качестве исходных данных для экспериментально-аналитического метода определения профиля обрабатываемой поверхности тонкостенной детали.

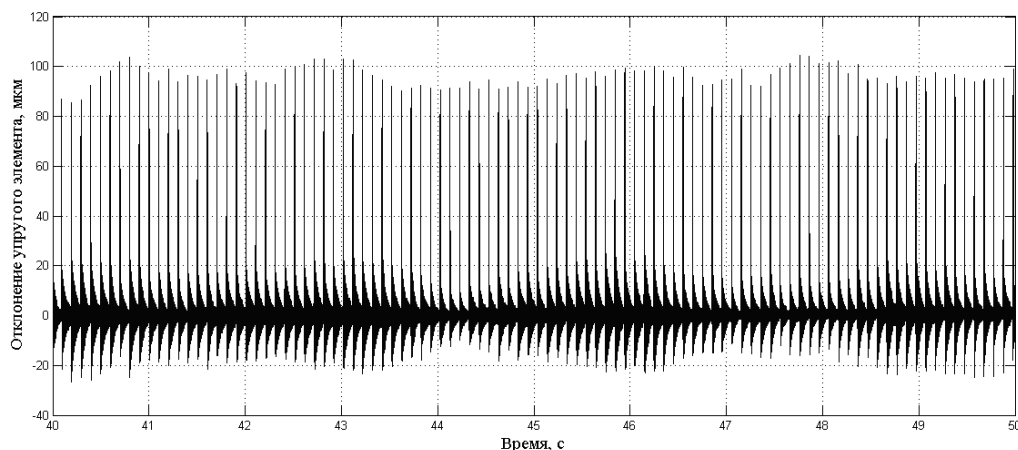


Рис. 5. Осциллограмма механических колебаний тонкостенной детали при фрезеровании с $n_{фр} = 560$ об/мин (встречное фрезерование)

Для успешного моделирования необходимо знать точную частоту вращения фрезы, а также синхронизировать вращение геометрической модели фрезы и колебания детали. Или, другими словами, указать точку на осциллограмме, в которой режущая кромка фрезы находится в крайнем нижнем положении. Действительная частота вращения фрезы определяется по осциллограмме и для рассматриваемого случая равна – $n_{фр} = 594,7691$ об/мин. Расположение точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали показано на рис. 6.

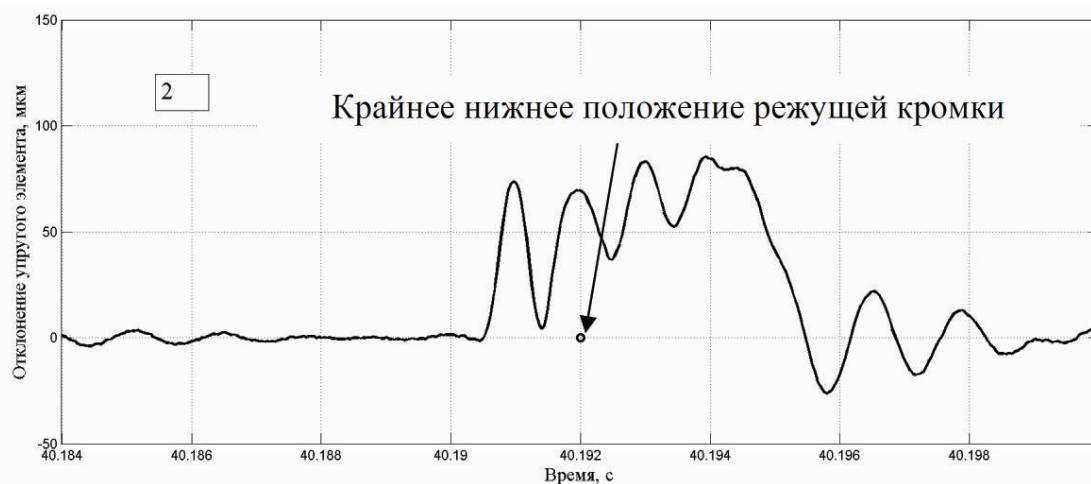


Рис. 6. Расположение точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали для $n_{фр} = 560$ об/мин (встречное фрезерование)

С целью снижения времени на вычисления моделировалось формирование микронеровностей обработанной поверхности не всего образца, а участка длиной 12,5 мм, что со-

ответствует 250 ударам зуба фрезы. Результаты моделирования профиля обработанной поверхности показаны на рис. 7. Ниже на рис. 8 приведен для сравнения участок измеренной профилограммы реальной детали в тех же масштабах. Сравнение профилограмм показывает не только хорошую воспроизводимость формы микровыступов, но и величину Ra , полученную расчетом по реальному и модельному рельефу обработанной поверхности. Для реального рельефа $Ra = 18,3$ мкм, для модельного – $Ra = 18,1$ мкм.

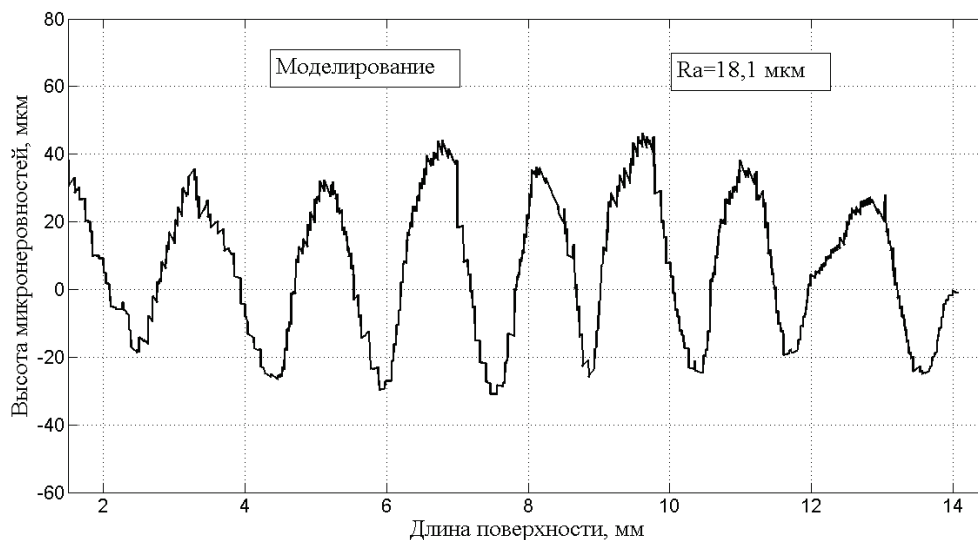


Рис. 7. Геометрия микронеровностей обработанной поверхности, полученная моделированием при $n_{фр} = 560$ об/мин (встречное фрезерование)

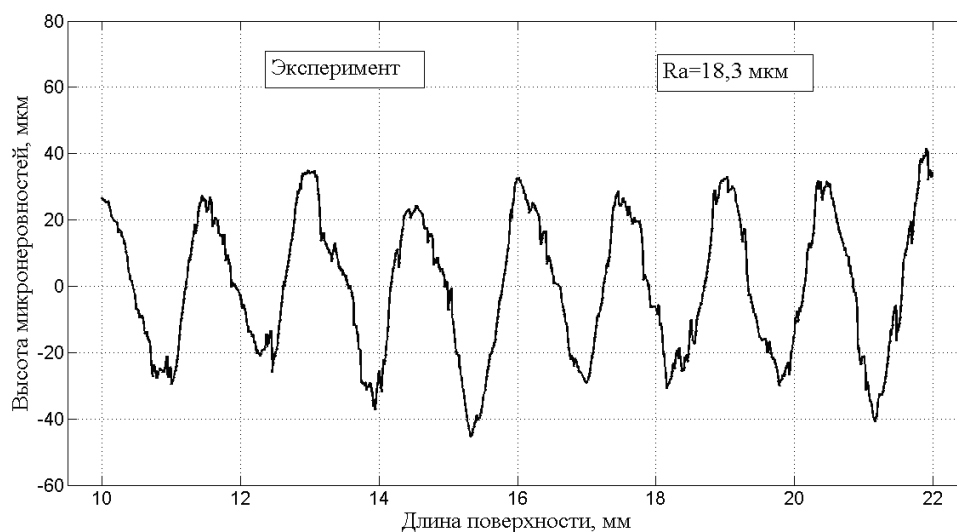


Рис. 8. Профилограмма реальной обработанной поверхности при $n_{фр} = 560$ об/мин (встречное фрезерование)

Следует отметить, что неправильный выбор точки крайнего нижнего положения фрезы или частоты вращения фрезы $n_{фр}$ приводит к сильному искажению формы модельного профиля и значений Ra . Пример неправильного выбора точки крайнего нижнего положения фрезы и полученный результат модельного профиля показан на рис. 9 и рис. 10 соответственно.

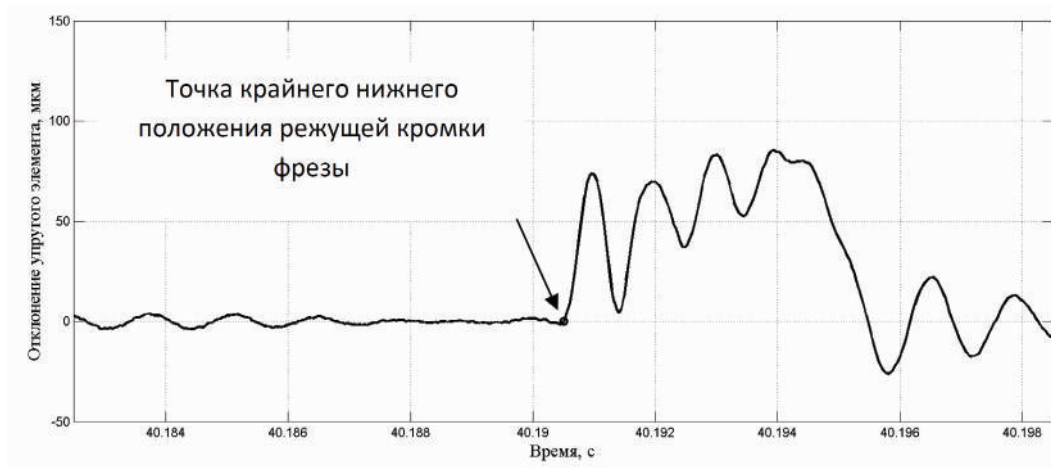


Рис. 9. Пример неправильного выбора точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали

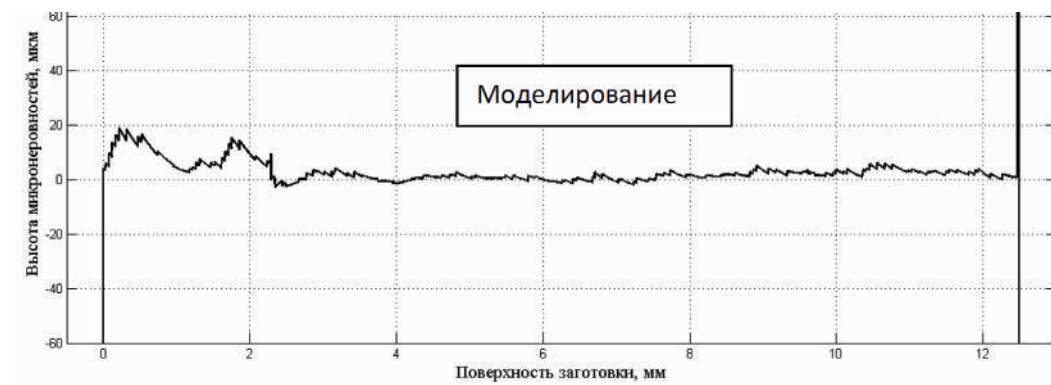


Рис. 10. Модельный рельеф поверхности при неправильно выбранном месте расположения точки нижнего положения режущей кромки фрезы

Установлено, что место расположения этой точки от точки врезания отстоит на расстоянии $\approx 1/4$ времени резания зубом фрезы для встречного фрезерования и $\approx 3/4$ времени резания зубом фрезы для попутного фрезерования. Т.е. её расположение должно находиться в зоне, в которой и происходит формирование рельефа.

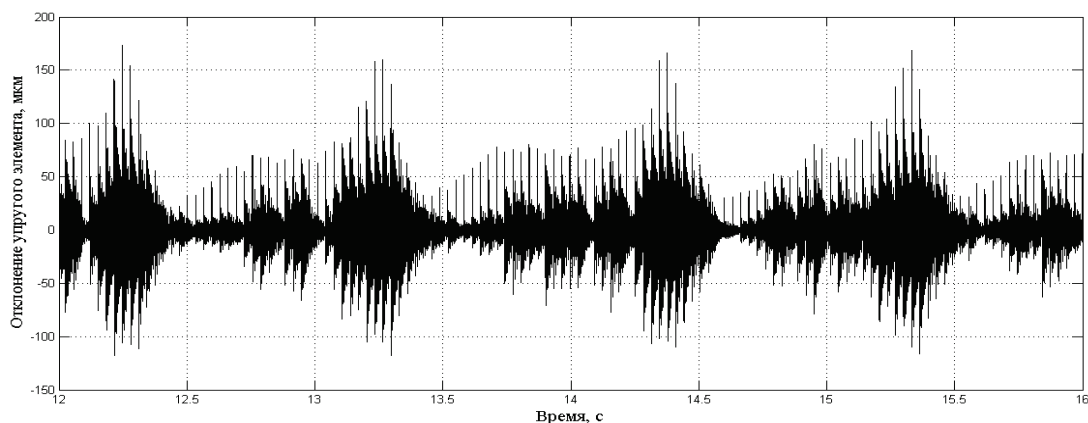


Рис. 11. Осциллограмма механических колебаний тонкостенной детали при фрезеровании с $n_{фр} = 1800$ об/мин (встречное фрезерование)

Рассмотрим формирование микронеровностей обработанной поверхности при высоких частотах вращения фрезы $n_{фр} = 1800$ об/мин, для следующих режимов: фрезерование встречное, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм. Участок осциллограммы колебаний детали пока-

зан на рис. 11. Рассматривалось 220 ударов зубом фрезы, что соответствует 11,5 мм обработанной поверхности. Выбор точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы показан на рис. 12.

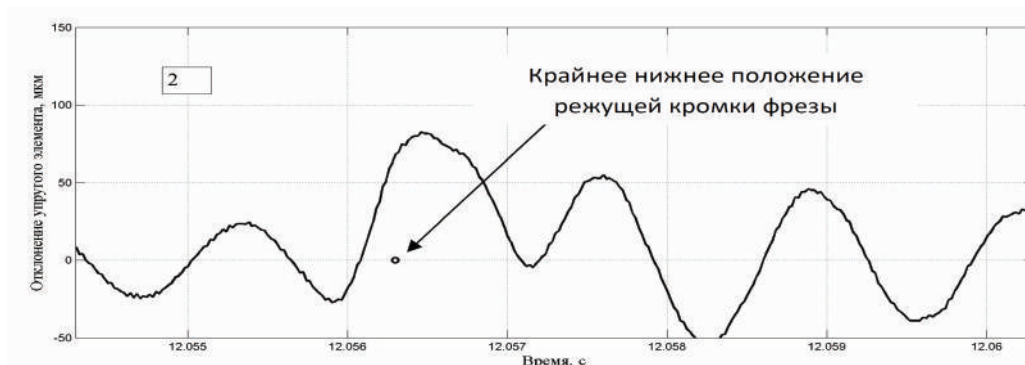


Рис. 12. Расположение крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали для $n_{фр} = 1800$ об/мин (встречное фрезерование)

Результаты моделирования геометрии микронеровностей обработанной поверхности приведены на рис. 13, а экспериментальная профилограмма – на рис. 14. Добиться более достоверного результата моделирования не удалось, т.к. при $n_{фр} = 1800$ об/мин период времени между ударами зубом фрезы несколько изменяется, однако форма профиля обработанной поверхности, имеющего специфические «зарезы» отражена достаточно точно.

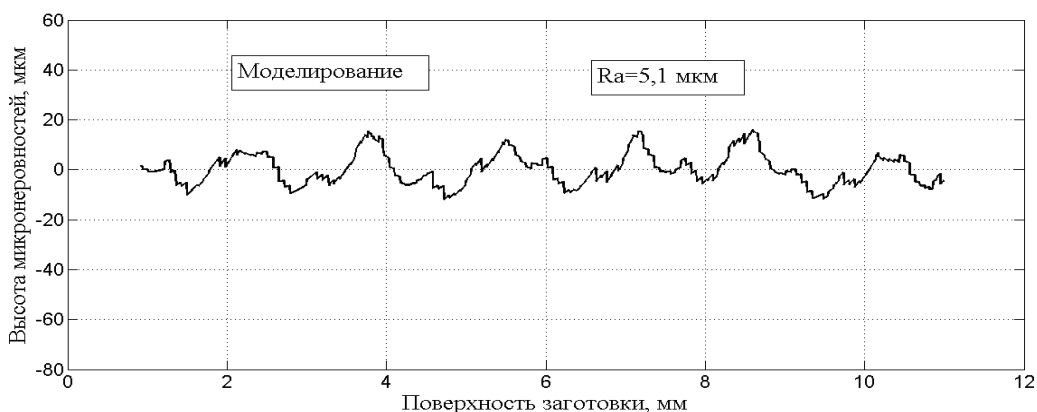


Рис. 13. Геометрия микронеровностей обработанной поверхности, полученная моделированием при $n_{фр} = 1800$ об/мин (встречное фрезерование)

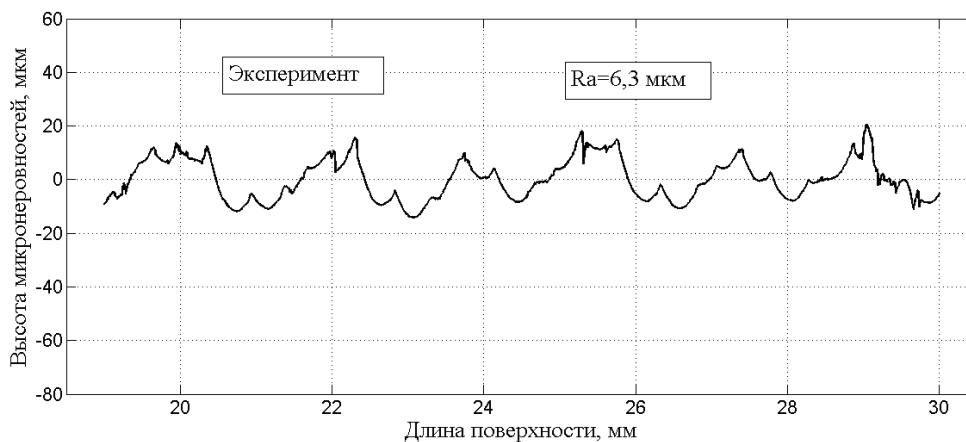


Рис. 14. Профилограмма реальной обработанной поверхности при $n_{фр} = 1800$ об/мин (встречное фрезерование)

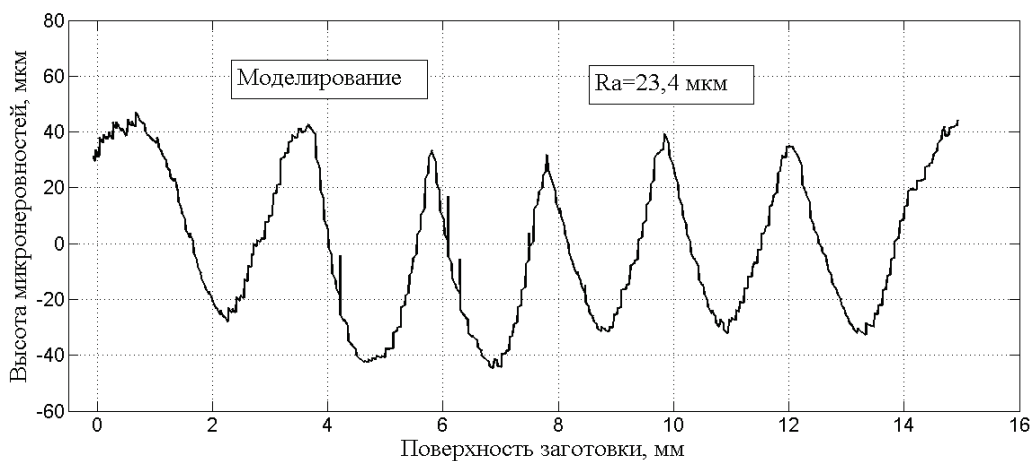


Рис. 15. Геометрия микронеровностей обработанной поверхности, полученная моделированием при $n_{фр} = 1800$ об/мин (попутное фрезерование)

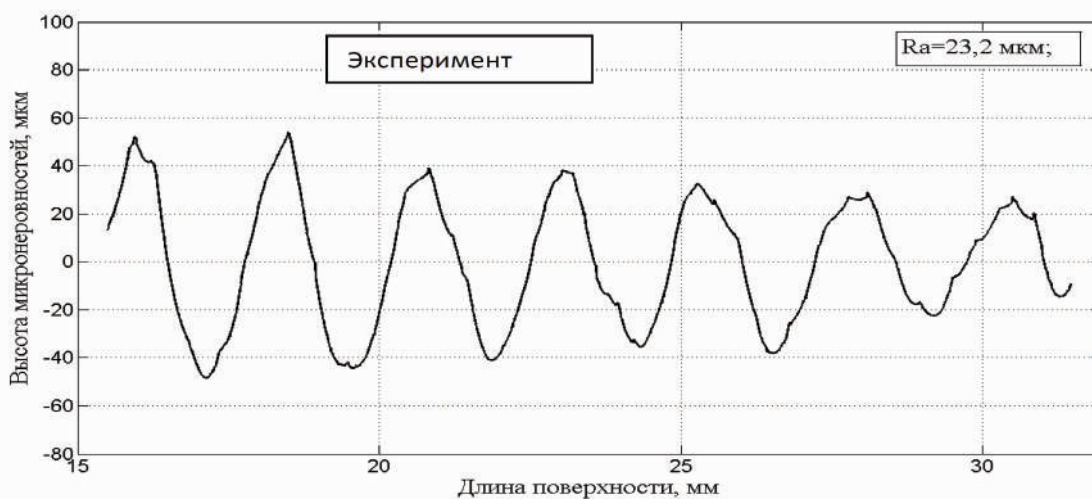


Рис. 16. Профилограмма реальной обработанной поверхности при $n_{фр} = 1800$ об/мин (попутное фрезерование)

На рис. 15 и рис. 16 показаны расчетные, полученные моделированием, и экспериментально измеренные профилограммы при следующих условиях: фрезерование попутное, $n_{фр} = 1800$ об/мин; $S_z = 0,05$ мм/зуб; $t = 0,5$ мм; $B = 4$ мм. По форме, высоте и шагу волн микронеровностей расчетная профилограмма близка к экспериментальной.

Значение параметра Ra для измеренного профиля и полученного путем моделирования имеют близкие значения $Ra = 23,2$ мкм и $Ra = 23,4$ мкм соответственно. Таким образом, можно утверждать, что разработанная методика моделирования процесса формирования шероховатости обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании тонкостенной детали с учетом реальных осциллограмм колебаний детали достаточно точно подтверждена экспериментальными измерениями профиля. Полученные результаты однозначно показывают, что основной причиной формирования шероховатости является уровень колебаний тонкостенной детали в зоне входа фрезы при встречном фрезеровании, и в зоне выхода фрезы при попутном.

Выводы

1. В статье предложена кинематическая экспериментально-расчетная модель формирования рельефа обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании тонко-

стенной детали, в которой используются реальные условия фрезерования и реальные осциллограммы колебаний детали. Разработан алгоритм расчета шероховатости обработанной поверхности.

2. Сравнение результатов моделирования процесса формирования рельефа поверхности с экспериментально измеренными профилем показывает хорошую сходимость по форме, высоте и шагу волн микронеровностей, а также по параметру шероховатости Ra . Адекватность результатов моделирования и экспериментального измерения шероховатости поверхности позволяет однозначно утверждать о доминирующей роли колебательных процессов при фрезеровании тонкостенных деталей в формировании её микрогеометрии.

Литература

1. Бобров, В.Ф. Основы теории резания материалов [Текст] / В.Ф. Бобров. – М., Машиностроение, 1975. – 344 с.

2. Altintas, Y. Chatter Stability in Metal Cutting and Grinding [Текст] / Y. Altintas, M. Weck // Annals of the CIRP. – №53/2. – 2004. – P. 619–642.

3. Coffignal, G. Virtual machining: a general approach to deal with flexible workpieces [Текст] / G. Coffignal, P. Lorong, J. Planchat, S. Yaqub, A. Larute // International Workshop on Modeling in Machining Operations. – 2007.

4. Peigne, G. A model of milled surface generation for time domain simulation of high-speed cutting [Текст] / G. Peigne, H. Paris, D. Brissaud // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2003. – Vol. 217. – No. 7. – P. 919–930.

5. Логоминов, В.А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 [Текст] / Логоминов Виктор Олексійович. – Запоріжжє, 2013. – 226 с.

© В.О. Логомінов

УДК 621.914

В.О. Логомінов, к. т. н., старший викладач
Запорізький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ МІКРОНЕРІВНОСТЕЙ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ ТОНКОСТІННОЇ ДЕТАЛІ

Наведено результати моделювання формування микронеровностей профілю обробленої поверхні при фрезеруванні тонкостінної деталі з використанням експериментальних осцилограм її коливань.

Ключові слова: фрезерування, моделювання, коливання, тонкостінні деталі.

UDC 621.914

V.O. Logominov, Ph.D.
Zaporozhye National Technical University

THE MODELING OF MICROROUGHNESSES FORMATION OF MACHINED SURFACE IN MILLING THIN-WALLED WORKPIECE

The investigation results of modeling of microroughnesses formation of machined surface in milling thin-walled workpiece used experimental oscillogram of it vibration.

Keywords: end milling, simulation, chatter, thin-walled workpiece.

ВІБРАЦІЙНЕ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКІВ ВІБРОПРЕС-МОЛОТОМ З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ КЕРУВАННЯМ

Наведено основні вимоги щодо вібраційного пресування порошків, технологічні вимоги, що необхідно подолати та їх реалізація за допомогою відповідного обладнання. Наведено переваги багатокомпонентного вібраційного пресування за допомогою вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням.

Ключові слова: вібропрес-молот, вібрація, порошки.

Вступ. Використання корисних вібрацій у таких технологічних процесах як пресування, формоутворення, розкочування, витягування дозволяє підвищити їх продуктивність, зменшити потужність обладнання та покращити якість виготовленої продукції. Також використання корисних вібрацій потребує вдосконалення конструкцій та комп'ютеризацію відомого вібраційного обладнання. Інтенсифікація виробництва вимагає постійного відслідковування робочих параметрів вібраційної машини (переміщення вібростола та значення тиску у системі) та їх корегування у процесі роботи. Необхідні питання вирішуються на кафедрі МРВОАВ Вінницького національного технічного університету, проводячи дослідження нових наукових рішень на базі вібропрес-молота (ІВПМ-16).

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій показав, що вібраційне пресування порошків, а також використання вібрацій у різних технологічних процесах дозволяє підвищити їх ефективність у порівнянні зі звичайним. Використання нових комп'ютерних технологій у відомому вібраційному обладнанні розширяє його можливості та дозволяє проводити автоматизацію зміни робочих параметрів пресового обладнання.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Вібраційне пресування широковідомий технологічний процес, реалізацію якого забезпечує велика номенклатура обладнання з різними типами приводів. Однак швидкі темпи розвитку комп'ютерних технологій та необхідність їх впровадження у технологічний процес для автоматизації виробництва, потребує необхідного наукового дослідження, щодо можливості модернізації відомого обладнання шляхом його комп'ютеризації.

Постановка завдання. Необхідно створити комбінований багатокомпонентний вібропрес-молот з електрогідравлічним керуванням, що дозволить реалізовувати поставлені технологічні проблеми, за рахунок комп'ютеризації регулюючого обладнання.

Основний матеріал та результати

Формоутворення порошків представляє собою технологічну операцію, в результаті якої утворюється порошкова формовка, тобто тіло із заданою формою, розмірами та щільністю. Початковий об'єм сипучого матеріалу під дією зусилля зменшується та проходить ущільнення порошку. Проходить зміна початкового об'єму, який займає порошок, що відрізняє його від деформації компактного тіла, об'єм якого залишається сталим, хоча геометричні розміри змінюються. Ущільнення порошку забезпечується формоутворенням в металевих пресформах чи в еластичних оболочках. Формоутворення металевих порошків розділяється за наступними методами: пресування; ізостатичне формоутворення; мундштучне формоутворення; прокатка; шлікерне формоутворення; імпульсне та вібраційне формоутворення. Тим чи іншим чином всі методи формоутворення металевих порошків можливо порівняти з процесом пресування.

Вібраційне формоутворення отримало широкий спектр застосування у різних галузях промисловості. Ефективність використання корисних вібрацій дозволяє при не знач-

них зусилля 0,3-0,6 МПа отримувати заготовки малопластичних (наприклад, карбіди, боріди металів та порошки вольфраму і титану) порошків щільністю 65-85%. Класифікація процесів вібраційного формування за ознаками вібраційного та віброударного режимів, залежить від складової навантаження – пульсуюче чи ударне (імпульсне). Схеми вібраційних та віброударних технологій знайшли, широке застосування у виробництві заготовок з порошкових матеріалів, ущільнення формуючих сумішей, фінішній обробці поверхонь деталей абразивними матеріалами, реалізації будівельно-монтажних технологій, технологій обробки пластичних матеріалів тиском та інших. Вібраційне та віброударне формування (пресування), у порівнянні з іншими способами пресування, забезпечує виконання технічних вимог до заготовок більш економічно. Зокрема останнє пояснюється значним зниженням робочого зусилля у порівнянні із зусиллям статичного пресування, зменшення зносу деталей прес-форми, а також забезпечення можливості їх виготовлення з тонкими стінками. Особлива ефективність вібраційного пресування відзначається при формуванні заготовок виробів складної конфігурації і великих габаритів.

Особливості процесів вібраційного пресування

В результаті аналізу особливостей характеру зміни фізико-механічних властивостей заготовок в процесі їх вібраційного пресування при інерційному навантаженні було відзначено, що пластичне деформування, або формування за рахунок зростання залишкових деформацій в заготовці відбувається дискретно, а їх величина зменшується зі збільшенням поточного значення густини заготовки для кожного наступного циклу навантаження. Враховуючи, що заготовка, яка деформується, є сукупністю безлічі непластичних частинок основи порошкового матеріалу, можна припустити, що процес деформування має характер зсуву без істотного руйнування частинок, оскільки для досягнення заданої остаточної густини заготовки потрібне динамічне зусилля навантаження значно (в десятки разів) менше відповідного статичного.

Для ударно-вібраційних режимів навантаження відзначено додаткове зростання пластичної деформації заготовки під впливом повторного імпульсу зусилля, коли первинний імпульс викликав в заготовці лише пружні деформації. Вказана закономірність характерна для випадків віброударного пресування заготовок з незначним змістом наповнювача для сталих режимів інерційного навантаження.

Віброударне пресування у порівнянні зі звичайним має кращу рівномірність пресування, адже при звичайному пресуванні розподіл шарів порошку розподіляється не рівномірно, що зумовлене внутрішнім та боковим тертям. Результат такого розподілу представлений на рис. 1. Складність переміщення порошку у внутрішній поверхні матриці добре ілюструють шари кальки або фольги, що розділяють частини вихідного об'єму і орієнтовані перпендикулярно осі навантаження.

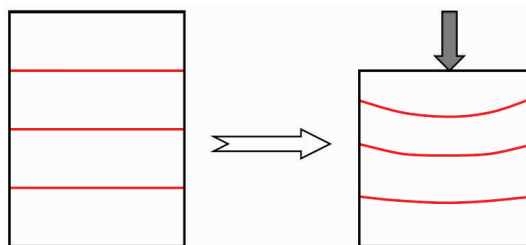


Рис. 1 Розподіл щільності за обсягом пресування

При збільшенні навантаження спостерігається вигинання шарів по осі пресування. Якщо спочатку частини об'ємів однакові, то верхні шари виявляються більш тонкими, тобто більш щільними, ніж нижні. Це наочно ілюструє зменшення тиску пресування по віддаленню від пуансона. Такий характер розподілу шарів у вібраційного пресування має місце але у не значній формі. Для вібраційного пресування важливою проблемою є глибина пресування, що для великогабаритних заготовок є дещо проблематично.

Обладнання та схеми вібраційного та віброударного пресування

Перші промислові технології формоутворення заготовок виробів із порошкових матеріалів проводились на традиційному пресовому обладнанні. Але не зважаючи на різноманітність технологій вібраційного та віброударного пресування схеми пресування заготовок залишаються наступними: з вібруючим контейнером, пуансоном та матрицею (рис. 2)

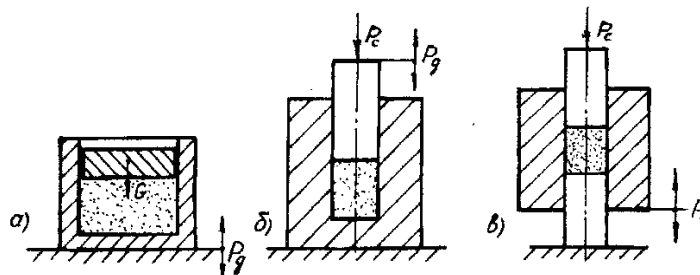


Рис. 2 Схеми пресування заготовок у закритій прес формі при вібруванні контейнера (а), пуансона (б) та матриці (в)

Для впровадження технологічних вібраційних процесів використовуються вібраційне та віброударне обладнання, яке виготовляється за єдиною структурною схемою (рис. 3). Від джерела енергії, привода енергоносія та системи елементів управління і розподілення енергії передається на привід генератора вібрацій, який з'єднаний з виконавчою робочою ланкою, і на привід допоміжних робочих ланок, які зображені, як приклад у вигляді пуансона – інерційної маси.

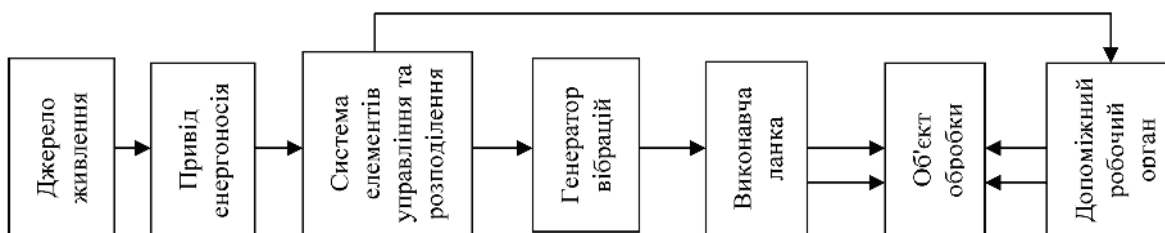


Рис. 3 Структурна схема типової ВМ та ВУМ:

→ – лінійний зв'язок, —→ – напрямок дії.

Зважаючи на це конструкції та номенклатура вібраційного обладнання містить основні елементи звичайних пресів. Більшість робіт зі створення спеціального обладнання для формоутворення заготовок методом вібраційного пресування часто завершувались на стадії випробовування дослідного чи освоєння дослідно-промислового зразка. Основна причина полягала у низькій технологічній та економічній ефективності. Однак вібраційне та віброударне обладнання все-таки знайшло широке застосування у різних галузях зокрема у порошковій металургії.

У випробовувальних вібраційних машинах нерідко реалізуються вузько полосну чи широко полосну стаціонарну випадкову вібрацію. Зазвичай це роблять у тих випадках, коли умови вібраційних досліджень об'єкта повинні бути в достатній мірі близькими до випадкових впливів, яким піддається об'єкт в реальних умовах.

В залежності від потреб практики примусового впливу, створюючого вібробуджувачем чи декількома вібробуджувачами, які приводять у вібраційних рух загальний виконавчий орган, може бути одномірним, двомірним та трьохмірним.

Направленими називають одномірні вимушені впливи, вектор яких має незмінний напрямок і коливальний модуль. Коловими називають вимушені впливи, вектор якого рів-

номірно обертається і має незмінний модуль. Аналогічно вібрацією точки також називають направленою чи коловою при відповідному поводженні вектор її швидкості.

В залежності з потребами технологій чи випробовувань можливо використати безударний вплив чи ударно-вібраційний вплив, коли вібраційний рух інерційного елемента переміщається наступними один за другим ударом. Удари можуть створюватись в самому віброзбуджувачі чи у вібраційному приводі, в сумі пристроїв для збудження вібрації, її перетворення та передачі виконавчому органу машини, або при зіткненні виконавчого органу машини з оброблюючим середовищем.

При розгляданні вібраційних пристосувань змушені користуватись поняттям як автономних, так і не автономних систем. Для практичного використання майже незатухаючих вільних коливань необхідно коливальна система з дуже малим розсіюванням енергії і, крім того, потрібна надійна ізоляція системи, що вібрує від впливу зовнішніх факторів. Такі вимоги практично виключають використання вільних коливань в технологічних цілях.

Автоколивання можуть виникати в визначених нелінійних автономних динамічних системах, в яких поглинання енергії для подолання дисипативних сил компенсовано поглинанням порцій енергії від не коливального джерела, причому це поглинання регулюється автоматично, самою системою в процесі її руху. Якщо автоколивальна система представляє вібратор з малим демпфуванням, то автоколивання такої системи енергетично доцільне, а в більшості випадків найбільш просто здійснюється близькими по частоті і формі до одної із власних частот і форм вібрації. Якщо система не являється коливальною, то відмічена можливість відсутня, але відкриваються більш широкі можливості керування частотою та спектральним складом автоколивань. Якщо під час розрахунку системи вплив віброзбуджувача можливо представити як деяку задану функцію часу, то коливальна система являється неавтономною.

Існує три способи збудження вібрацій неавтономних динамічних систем: силовий, кінематичний та параметричний. Системи з силовими і кінематичними збудженнями здійснюють вимушені коливання, а з параметричним збудженням - параметричні коливання. Силові збудження коливань здійснюють дію на систему вимувених сил і (або) вимувених моментів, тобто змінних у часі зовнішніх сил і моментів, не залежних від координат стану системи. Кінематичне збудження коливань здійснюється повідомленням із зовні деяким її точкам (або тілам) переміщень, які не залежать від координат стану системи.

Більшість сучасних вібраційних машин працюють у режимах вимувених коливань. Використання вимувених коливань відкривають широкі можливості розробки вібраційного привода, що реалізує коливання різної амплітуди та фазового спектру.

Саме тому від методу збудження вібрацій розрізняють: відцентровий, електромагнітний, електродинамічний, кінематичний та примусові гідравлічні і пневматичні віброзбуджувачі. В залежності від чого приводи вібраційних технологічних машин поділяють на: механічні, гідравлічні, пневматичні, електричні та комбіновані.

З вище перерахованих приводів нас цікавить гідравлічні віброзбуджувачі, які у порівнянні з іншими дають можливість отримання великих потужностей та мають відносно просту конструкцію.

Гідравлічні віброзбуджувачі передають коливання виконавчій ланці вібромашини у випадку використання пульсуючого джерела робочої рідини, або переривання потоку робочої рідини постійної подачі за допомогою золотникових та інших регулюючих пристроїв.

Гідравлічні віброзбуджувачі по принципу дії ділять на пульсуючі, автоколивальні, слідкуючі та самокеруючі.

Одним із найбільш істотних недоліків гідравлічних машин – втрати робочої рідини у процесі роботи через технологічні зазори між поршнем та циліндром, ущільненнями та штоком, та нагрів робочої рідини, що спричинено замкненим об'ємом. Також до недоліків

можна віднести те, що при зростанні величини амплітуди коливань зменшується їх частота; складність керування та налагодження віброзбуджувачів, оскільки більшість гідравлічних віброзбуджувачів налагоджується параметрично, що має негативний фактор, а саме налагодження проводиться з похибкою у $\pm 5\%$, що для сучасних умов експлуатації просто не припустимо.

Основними перевагами пульсуючих віброзбуджувачів з насосами – пульсаторами – чітка реалізація заданої амплітуди та частоти поршня виконавчого циліндра. Даний привід об'ємної дії. Амплітуда коливань штока робочого циліндра визначається об'ємом, витисненим поршнями насоса – пульсатора, і співвідношень конструктивних параметрів машини незалежно від робочого навантаження. До переваг відноситься також велике створюване зусилля, що у порівнянні з іншими віброзбуджувачами, враховуючи їхні габарити, значно більше. Простота схем підключення. Можливість використання за будь яких умов та середовищах. Великий ряд частот створюваних вібрацій.

Одним із видів гідравлічних віброзбуджувачів є гідроімпульсний привод ГІП. Принцип роботи приводу полягає у створенні імпульсу енергії рідини, що діє на виконавчу ланку вібраційної машини, за рахунок регулюючої апаратури. Основним елементом ГІП являється генератор імпульсів тиску ГІТ, який у технічній літературі також відомий під назвами «клапан пульсатор» та «гідроімпульсний віброзбуджувач». Основними перевагами даного приводу являється високі створювані зусилля до 100 кН, в залежності від експлуатаційних та технологічних вимог, при незначних габаритах, малий робочий тиск у гідравлічній системі до 10 МПа та використанні малопотужних електродвигунів до 5 кВт.

Основними елементами ГІП являються гідравлічний насос, гідроаккумулятор та генератор імпульсів тиску. В залежності від підключення ГІТ до виконавчої ланки вібраційної машини вони умовно поділяються «на вході», «на виході», та «комбіновані», що дозволяє отримувати різні типи навантаження на виконавчій ланці, а також розширяє технологічні можливості використання даного обладнання.

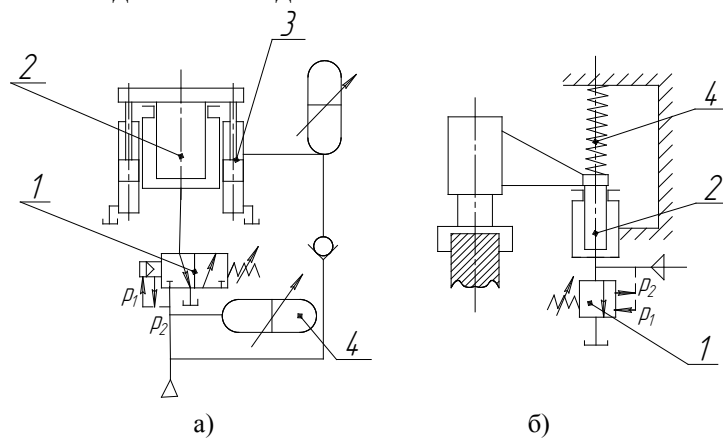


Рис. 4 Схеми вібраційних та віброударних машин з гідроімпульсним приводом: а – з триходовим генератором імпульсів тиску; б – з двоходовим генератором імпульсів тиску

Зважаючи на широку номенклатуру конструктивних рішень, ГІТ потребують поглибленого вивчення та вдосконалення, що можна продемонструвати на роботі ГІП з ГІТ. Гідроімпульсний привод з триходовим двопозиційним генератором імпульсів тиску 2 (рис. 4, а) застосовується в вібропресах, вібротрамбовках та інших машинах з підвищеними вимогами по відношенню до енергії імпульсу, швидкості і ККД. Залежно від розрахункової енергії одного ходу вібраційної ланки 2 виконується зарядка одноходового акумулятора 4 від напірної магістралі до тиску p_1 , при якому генератор імпульсів тиску 1 відкривається і забезпечить розрядку акумулятора на робочу ланку 2. По мірі розрядки акумулятора 4 тиск в системі падає до p_2 , генератор імпульсів тиску 1 закривається, а порожнина циліндра з'єднується зі зливом, після чого під дією гідропружин 3 вібраційна ланка 2

повертається у вихідне положення. Частина корисної роботи може бути здійснена в кінці цього зворотного ходу (струшуючі та випробувальні машини).

До складу приводу, принципова схема якого показана на рис. 4 б, входить більш простий двопозиційний генератор імпульсів тиску 1, встановлений на лінії зливу з порожнини циліндра робочої ланки 2. Рідина по напірній магістралі подається безпосередньо в порожнину циліндра і переміщує вібраційну ланку 2 вгору. При досягненні в порожнині циліндра тиску p_1 генератор імпульсів тиску 1 з'єднує її зі зливом. У процесі повернення вібраційної ланки у вихідне положення при відкритому генераторі імпульсів тиску під дією пружини 4 чи сил тяжіння ударних частин робочої ланки 2 тиск в системі падає до величини p_2 і генератор імпульсів тиску 1 закривається після завершення витрат зливу. В даній схемі відсутній акумулятор в тому вигляді, в якому він зображений на рис. 1.9, а. Роль акумулятора енергії виконує чи пружина 4, чи ударні частини вібраційної ланки, від висоти розташування яких залежить накопичена потенціальна енергія (mgh). Ця енергія виконує корисну роботу при відкритому на злив генераторі імпульсів тиску 1, забезпечуючи таким чином вільний хід вібраційної ланки вниз.

З вище викладеного стає зрозумілим, що головним віброзбуджувачем являється генератор імпульсів тиску, робота якого відбувається із спрацювання першого каскаду, який налагоджується параметрично. Недоліком даного налагодження являється його складність налагодження та не постійність у часі. Оскільки налагодження відбувається за рахунок пружних елементів, які можуть втрачати свої властивості під час роботи. А також не точністю спрацювання, під час тривалої роботи, при заданому тиску p_1 . Відхилення від тиску спрацювання та номінального тиску, при якому спрацьовує запірний елемент першого та другий каскади має похибку $\pm 5\%$ [], що значно впливає на закон, який відпрацьовує генератор імпульсів тиску. Саме тому виникає потреба у більш точному керуванні першого каскаду генератора імпульсів тиску, адже система може мати декілька віброзбуджувачів, що у кінцевому результаті дасть негативний ефект.

Звертаючи увагу на темпи розвитку електронних, гідравлічних технологій та технологій комп'ютерного програмування, а також враховуючи потреби сучасного виробництва виникає задача у інтенсифікації технологічних процесів та уніфікації виробничих модулів, що для машин, які створюють вібрації використовуючи вищевказані приводи, задачу можливо вирішити за рахунок поєднання та комбінування різних технологій.

Шляхом логічного аналізу можливо припустити, що найбільш ефективним поєднанням буде поєднання гідравлічного та електричного приводів для використання у технологічних процесах, де потрібно застосувати велику потужність та велику частоту. Оскільки враховуючи сучасну номенклатуру елементів та способів, що створюють вібрації обох приводів можливо проаналізувати переваги та недоліки їх поєднання.

Суть даного поєднання полягає у використанні переваг обох приводів, які будуть доповнювати один одного. А саме відомо, що гідравлічні віброзбуджувачі створюють великі робочі зусилля, маючи значно менші габарити у порівнянні з іншими віброзбуджувачами. В ту чергу як електромагнітні віброзбуджувачі мають, у порівнянні з іншими приводами, значно більшу частоту та досить просте її відтворення за заданим законом, що зумовлене використанням програмного забезпечення. Тому поєднавши обидва приводи ми отримуємо пристрій, який видає великі зусилля з великою частотою та програмується у блоці керування. Такий підхід полегшує процес налагодження обладнання та зміну його робочих параметрів.

Використовуючи дану систему керування можливо застосувати одночасно декілька паралельно працюючих вібронавантажувачів, що характеризує собою процес багатоконпонентного навантаження, яке має ряд переваг під час вібраційного пресування заготовок великих габаритів та складного форми. Тим самим, ми з легкістю зможемо контролювати силу, час та амплітуду коливань у всіх напрямках поширення вібрацій, що позитивно дія-

тиме на процес формоутворення. Перевагами такого комплексу є постійний моніторинг робочих параметрів та швидка їх зміна під час роботи .

Висновки. Вібраційне пресування – один з ефективних методів формоутворення, який дозволяє отримувати складні форми заготовок порошків металів та неметалів, а також інших пластичних матеріалів. Способи реалізації вібраційного пресування мають широкий номенклатуру обладнання, однак вимоги сучасного виробництва потребують модернізації та автоматизації відомого обладнання, що можливо виконати шляхом комп'ютеризації пресового обладнання та використання комбінованих приводів. Такий підхід забезпечить необхідні робочі параметри на виконавчій ланці та забезпечить чітке відпрацювання кожного із приводів під час багатокomпонентного навантаження.

Література

1. Бальшин М.Ю. / Основы порошковой металлургии [Текст] // Бальшин М.Ю., Кипарисов С.С. – М.:Металлургия, 1978. – 184 с.
2. Баранов В.Н. / Электрогидравлические и гидравлические вибрационные машины [Текст] // Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. – М.:Машиностроение, 1977. -326 с.
3. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. [Текст] / Ред. Сонет: В.Н. Челомий (пред.). - М.:Машиностроение, 1981. – Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Е.Е. Лавендела. – 509с.
4. Матвеев И.Б. / Гидропривод машин ударного и виброударного действия. [Текст] М. – Машиностроение, 1974, 184 с.
5. Искович – Лотоцький Р.Д. / Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія. [Текст] // Искович – Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р., Севостьянов І.В.–Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 206-291с.
6. Искович – Лотоцький Р.Д. / Генератори імпульсів тиску для керування гідроімпульсними приводами вібраційних та віброударних технологічних машин: Монографія. [Текст] // Искович – Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р., Архипчук М.Р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. – 171 с.

© Р.Д. Искович-Лотоцький, В.П. Миськов

УДК 621.74

*Р.Д. Искович-Лотоцький, проф., д.т.н.; В.П. Миськов, аспірант
Вінницький національний технічний університет*

ВИБРАЦИОННОЕ ПРЕССОВАНИЕ ПОРОШКОВ ВИБРОПРЕСС-МОЛОТОМ С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Приведены основные требования к вибрационному прессованию порошков, технологические требования, которые необходимо преодолеть и их реализация с помощью необходимого оборудования. Приведены преимущества многокомпонентного вибрационного прессования с помощью нагружения вибропресс-молота с электрическим управлением.

Ключевые слова: вибропресс-молот, вибрация, порошки.

UDC 621.74

*R.D. Iskovich-Lototskiy, professor, Doctor of engineering sciences; V.P. Miskov, postgraduate
Vinnitsia national technical university*

VIBRATORY COMPACTING THE POWDER VIBRO-HAMER WITH ELEKTRO-HYDRAULIC CONTROL

The basic requirements for vibratory compaction of powders, technological requirements that need to be overcome, and their implementation by means of the necessary equipment. The advantages of a multi-component vibratory compaction using loading vibropress hammerhead electrically operated.

Keywords: vibro-hammer, vibration, powder.

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНІ ПРИРОДНОГО ЗНОСУ ФІЛЬСЕРИ МУНДШТУКА ПРЕСА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ

В статті на базі раніше отриманих експериментальних даних виконується математичне моделювання геометричного профілю робочої поверхні фільсери, наближеного до форми її природного зносу. Розроблено три математичні моделі, що описують криволінійний профіль фільсери — у вигляді поліному третього порядку, кривої Безье і ламаної полілінії. Визначено для кожного випадку перелік параметрів, які задають геометрію кривої.

Ключові слова: математичне моделювання, фільсера, знос.

Вступ. На сьогоднішній час вітчизняними підприємствами з виготовлення керамічних виробів широко використовується високопродуктивне імпортне обладнання [1, 2] оснащене універсальними мундштуками для виробництва номенклатури виробів, наприклад цегли, блоків, черепиці, тощо.

Обслуговування обладнання для виробництва керамічної цегли включає в себе заміну швидкозношуваних деталей екструдерів. Зокрема, заміна фільсери мундштука Bongioanni на виробництві заводу "Закарпатська Будівельна Кераміка" ТОВ "Русинія" (Закарпаття, Україна) здійснюється кожні два тижні. Фільсера є «найслабшою» ланкою технологічного оснащення і основною причиною заміни є її розмірне зношення. Внаслідок спрацювання фільсери порушується геометрія бруса, збільшуються витрати сировини та енергоносіїв. Також процес заміни фільсери потребує зупинки виробничої лінії, що знижує ефективність виробництва в цілому.

Тому задача підвищення геометричної стійкості фільсери є актуальною в керамічному виробництві будівельних матеріалів.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Дослідженнями процесу екструзії цегли встановлено, що в зоні контакту шихти з фільсорою відбуваються абразивне зношування, адгезійне зчеплення і ерозія формоутворюючих поверхонь [3]. Рядом науковців проводились дослідження залежності інтенсивності зносу від форми зношених поверхонь. Зокрема, в роботах [4, 5] відмічається утворення в процесі зношування стійкої форми природного зносу, що приводить до зниження інтенсивності зношування. У зв'язку з цим рекомендується поверхням, які зношуються, надавати, за можливості, форму наближену до форми природного зносу, оскільки вона в мінімальній степені спотворюється в процесі зношування.

Попередніми дослідженнями зношених фільсер встановлено, що поперечний профіль природного зносу робочої поверхні фільсери (рис. 1) з достатньою точністю описується поліномом третього порядку. Методом найменших квадратів визначена формула апроксимаційного поліному третього порядку ділянки CE кривої зносу на інтервалі $x = [3; 25]$ мм

$$y(x) = 1,65143 + 0,09503x - 0,01442x^2 + 0,00032x^3$$

Мета дослідження полягає в пошуку аналітичного опису криволінійного профілю робочої поверхні фільсери, яка наближена до форми природного зносу і може бути використана в майбутньому для оптимізації конструкції фільсери.

Викладення основного матеріалу дослідження. В якості об'єкта досліджень використовується фільтр (рис. 2) мундштука екструдера для випуску пустотілої керамічної цегли виробництва фірми Bongioanni (Італія). Початкова форма поперечного перерізу вікна фільтри являє собою ламану лінію ABC , яка описує формуючу ділянку BC і калібруючу AB .

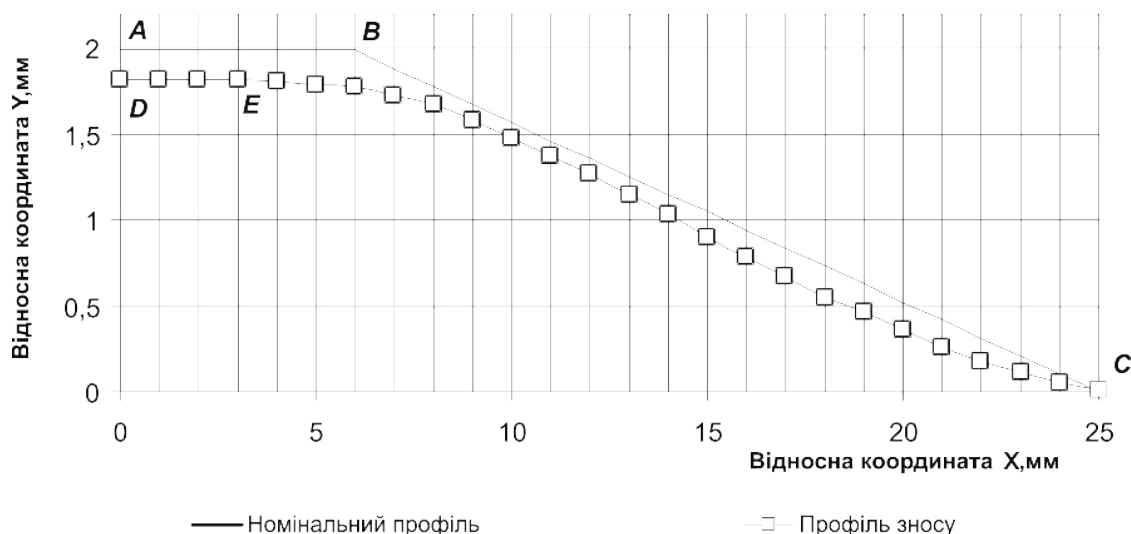


Рис.1. Результати вимірювань профілю робочої поверхні зношеної фільтри

Задача полягає у заміні ламаної ABC на деяку плавну криву DEC , яка проходить через три вузлові точки $D(0, 2) = A(0, 2)$, $E(x_E, 2)$, $C(25, 0)$ (див. рис. 1 і 2). Тобто, довжина калібруючої частини фільтри також є параметром оптимізації. Поставлена задача може бути вирішена декількома методами.

Перший метод — інтерполяція звичайними кубічними сплайнами. В цьому випадку лінія DEC описується двома поліномами

$$\begin{cases} y_1 = 2 & \text{для } x \in [0, x_E] \\ y_2 = a_2 + b_2x + c_2x^2 + d_2x^3 & \text{для } x \in (x_E, 25] \end{cases}$$

Щоб визначити невідомі коефіцієнти a_2, b_2, c_2, d_2 задаємося додатковими умовами плавності $y_1(x_E) = y_2(x_E)$, $y_1'(x_E) = y_2'(x_E) = 0$ та крайовими умовами $y_2'(25) = 0$. Тоді система рівнянь для визначення коефіцієнтів набуває виду

$$\begin{cases} a_2 + b_2x_E + c_2x_E^2 + d_2x_E^3 = 2 \\ b_2 + 2c_2x_E + 3d_2x_E^2 = 0 \\ b_2 + 2c_2 \cdot 25 + 3d_2 \cdot 25^2 = 0 \\ a_2 + b_2 \cdot 25 + c_2 \cdot 25^2 + d_2 \cdot 25^3 = 0 \end{cases}$$

або в матричній формі $\mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{Y}$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_E & x_E^2 & x_E^3 \\ 0 & 1 & 2x_E & 3x_E^2 \\ 0 & 1 & 2 \cdot 25 & 3 \cdot 25^2 \\ 1 & 25 & 25^2 & 25^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

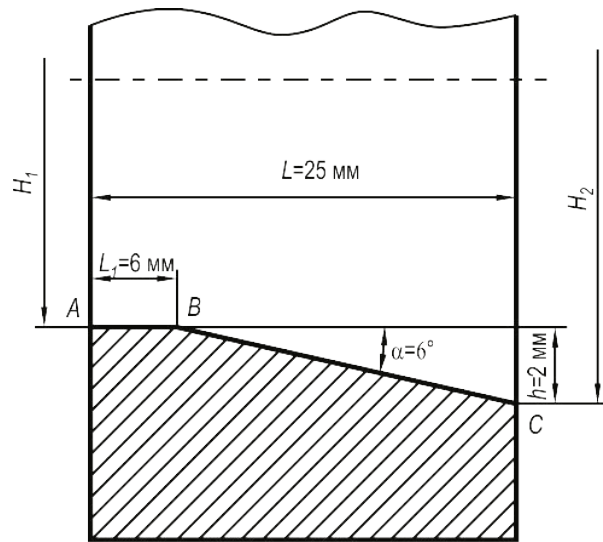


Рис. 2. Геометрія отвору фільтри

звідки отримаємо розв'язок

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_E & x_E^2 & x_E^3 \\ 0 & 1 & 2x_E & 3x_E^2 \\ 0 & 1 & 2 \cdot 25 & 3 \cdot 25^2 \\ 1 & 25 & 25^2 & 25^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

В даному випадку профіль робочої поверхні фільтри однозначно визначається шириною калібруючої частини DE , тобто положенням точки E з координатою z_E .

Для реалізації розрахунків і контролю одержаних результатів складаємо програму в середовищі MatLab (рис. 3). Для прикладу задається значення $x_E = 3$ мм. За результатами розрахунку отримані коефіцієнти поліному $a_2 = 1,8783$, $b_2 = 0,0845$, $c_2 = -0,0158$, $d_2 = 0,0004$.

```
% ініціалізація даних
A = []; Y=[2; 0; 0; 0]; xe = 3;
B = [1 xe xe.^2 xe.^3; 0 1 2*xe 3*xe.^2;
0 1 2*25 3*25.^2; 1 25 25.^2 25.^3];
% визначення коефіцієнтів поліному
A = B\Y
% візуалізація результатів розрахунку
i = 0;
for x = xe:1:25
    i=i+1; X(i)=x; Q(i) = A(1)+A(2)*x+A(3)*x^2+A(4)*x^3;
end
plot (X, Q,);
```

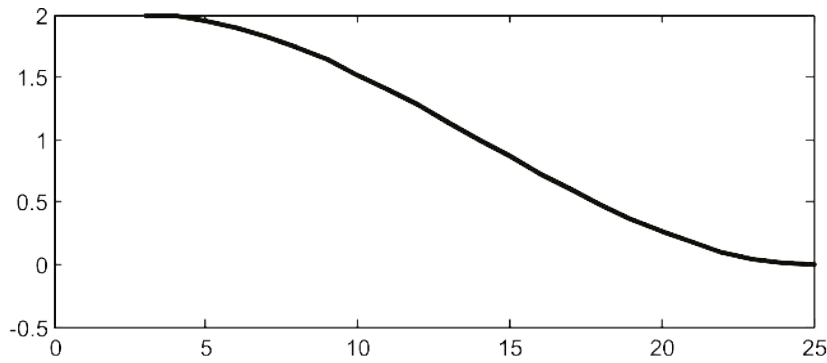


Рис. 3. Фрагмент програми для розрахунку і профіль фільтри, заданий кубічним поліномом

Другий метод — інтерполяція кривими Безьє. Розглянуті вище кубічні сплайни незручні для інтерактивної роботи, оскільки напрям і величина дотичних не дають інтуїтивного уявлення про криву, так як неочевидний зв'язок між набором чисел і формою відповідної кривої. Тому в комп'ютерній графіці для створення кривих і поверхонь будь-якої форми використовують метод, який був запропонований П'єром Безьє [6, 7].

Математичне параметричне представлення кривої Безьє, яка задається $n + 1$ контрольними точками P_0, P_1, \dots, P_n , має вигляд

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (1)$$

де $B_{i,n}(t)$ — базові поліноми Бернштейна степеня n ,
 t — дійсний параметр, що змінюється в інтервалі $[0, 1]$.

Поліноми Бернштейна визначаються за формулою

$$B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad 0 \leq i \leq n, \quad (2)$$

де $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$, $0 \leq i \leq n$ — біноміальні коефіцієнти.

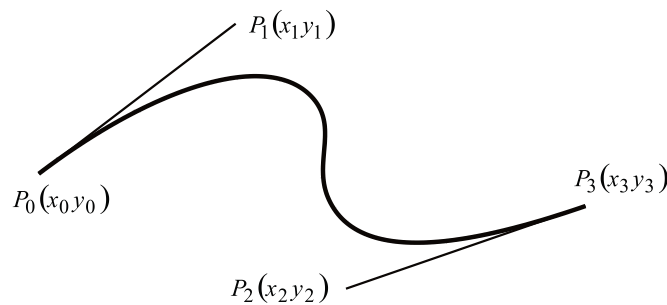


Рис. 4. Крива Безьє і точки, які її задають.

Для моделювання робочої поверхні фільтри використаємо криву Безьє третього порядку, яка в загальному випадку задається чотирма точками відповідно до рис. 4.

В даному випадку формули (1) і (2) набувають виду

$$P(t) = \sum_{i=0}^3 P_i B_{i,3}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (3)$$

де $B_{i,3}(t) = \frac{6}{i!(3-i)!} t^i (1-t)^{3-i}$, $0 \leq i \leq 3$. (4)

Тоді рівняння кубічної кривої Безьє в параметричному виді

$$\begin{cases} x(t) = (1-t)^3 x_0 + 3(1-t)^2 tx_1 + 3(1-t)t^2 x_2 + t^3 x_3, \\ y(t) = (1-t)^3 y_0 + 3(1-t)^2 ty_1 + 3(1-t)t^2 y_2 + t^3 y_3 \end{cases}, 0 \leq t \leq 1.$$

Для багатокутника із чотирьох точок ($n = 3$) матрична форма кривої Безьє має вид

$$P(t) = [T][N][G] = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}, 0 \leq t \leq 1.$$

У відповідності до заданих геометричних розмірів фільтери (див. рис. 1) введемо координати опорних точок

$$P_0 = [x_E \quad 2], P_1 = [x_1 \quad 2], P_2 = [x_2 \quad 0], P_3 = [25 \quad 0]$$

і деякі обмеження $x_E \leq x_1 < x_2$, $x_1 < x_2 \leq 25$. Очевидно, що при сталих розмірах профіль робочої поверхні фільтери визначається трьома параметрами.

На рис. 5 показано приклад і результат розрахунку за заданими значення вхідних параметрів $x_E = 3$ мм, $x_1 = 15$ мм, $x_2 = 20$ мм.

```
xe = 3;
x0 = xe; x1 = 15; x2 = 20; x3 = 25;
Mb = [-1 3 -3 1; 3 -6 3 0; -3 3 0 0; 1 0 0 0];
Px = [z0; z1; z2; z3]; Py = [2; 2; 0; 0];
i = 0;
for t = 0:0.01:1
    i=i+1; T = [t.^3 t.^2 t 1];
    X(i) = T*Mb*Px; Y(i) = T*Mb*Py;
end
plot (X, Y);
```

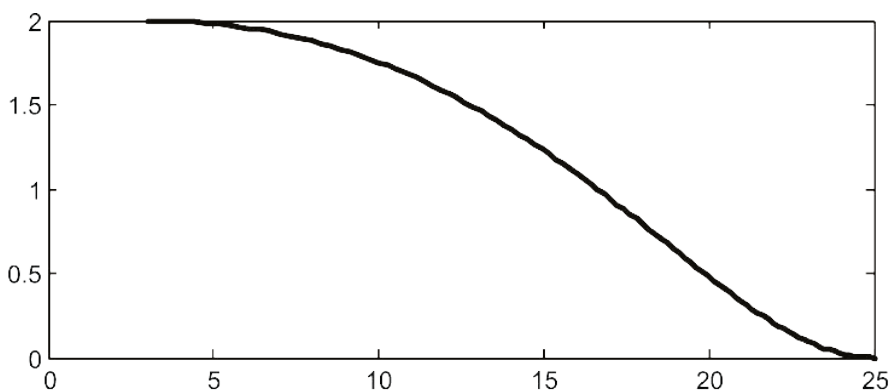


Рис. 5. Фрагмент програми розрахунку і профіль кривої Безьє

Третій метод — побудова профілю фільтери у вигляді кривої полілінії, яка складається з відрізків прямих і дуг (рис. 6). З геометричної точки зору, відповідно до рисунку, задача полягає у знаходженні спільної дотичної для двох дуг радіусів R_1 і R_2 . Обмеження полягають в тому, що кола між собою не перетинаються і дуга одного кола знаходиться в першому квадранті, а другого — в третьому квадранті.

Рівняння кола радіуса R з центром в точці (x_0, y_0) в загальному виді

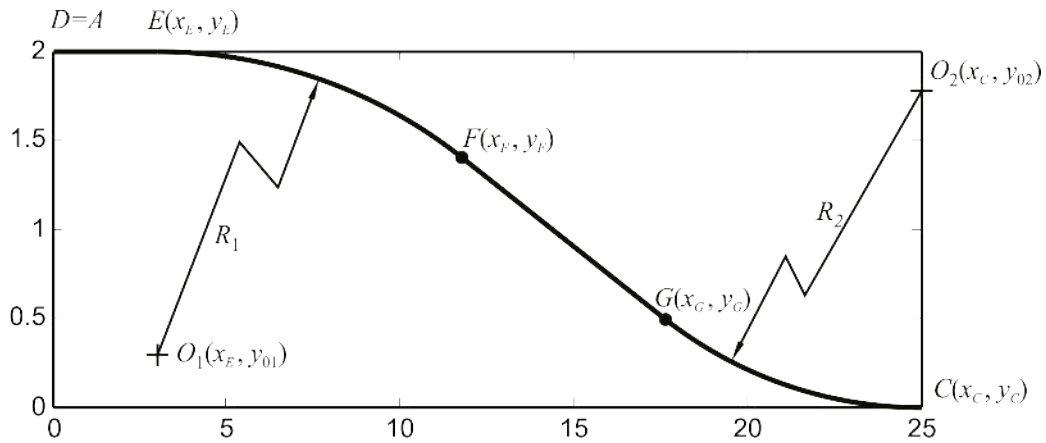


Рис. 6. Розрахункова крива профілю фільтери

описується рівнянням

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2,$$

і в параметричному виді системою рівнянь

$$\begin{cases} x(\theta) = x_0 + R \cos \theta \\ y(\theta) = y_0 + R \sin \theta, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

Довжина L кожної дотичної до кола, яка проведена з точки (x_1, y_1) , визначається за формулою [8]

$$L = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - R^2}.$$

Звідси маємо (див. рис. 6), що довжина L_{GF} дотичної до кола радіуса R_1 з точки $G(x_G, y_G)$ рівна

$$L_{GF} = \sqrt{(x_G - x_{01})^2 + (y_G - y_{01})^2 - R_1^2} \quad (6)$$

і, відповідно, довжина L_{FG} дотичної до кола радіуса R_2 з точки $F(x_F, y_F)$

$$L_{FG} = \sqrt{(x_F - x_{02})^2 + (y_F - y_{02})^2 - R_2^2}. \quad (7)$$

На підставі формул (5) можемо записати координати точки F

$$\begin{cases} x_F = x_E + R_1 \cos \theta_F \\ y_F = y_{01} + R_1 \sin \theta_F, \quad 0 \leq \theta_F \leq 0,5\pi \end{cases} \quad (8)$$

де θ_F кут повороту радіус-вектора $\overline{O_1F}$ відносно осі Ox . Оскільки радіус-вектори $\overline{O_1F}$ і $\overline{O_2G}$ є перпендикулярні до одної прямої, то вони є протилежно направлені і знаходяться в протилежних квадрантах. Звідси координати точки G відповідно будуть рівні

$$\begin{cases} x_G = x_C + R_2 \cos(\theta_F + \pi) = x_C - R_2 \cos(\theta_F) \\ y_G = y_{02} + R_2 \sin(\theta_F + \pi) = y_{02} - R_2 \sin(\theta_F), \quad 0 \leq \theta_F \leq 0,5\pi \end{cases} \quad (9)$$

Якщо рівняння (6) і (7) прирівняти між собою і підставити значення формул (8) і (9), то отримаємо вираз

$$\begin{aligned} & (x_C - (R_2 \cos \theta_F + x_E))^2 + (y_{02} - (R_2 \sin \theta_F + y_{01}))^2 - R_1^2 = \\ & = (x_E + (R_1 \cos \theta_F - x_C))^2 + (y_{01} + (R_1 \sin \theta_F - y_{02}))^2 - R_2^2 \end{aligned}$$

який після відповідних спрощень набуває виду

$$(x_C - x_E) \cos \theta_F + (y_{02} - y_{01}) \sin \theta_F - (R_1 + R_2) = 0.$$

Якщо ввести умовні позначення $d_x = (x_C - x_E)$, $d_y = (y_{02} - y_{01})$, $d_R = (R_1 + R_2)$ і виконати підстановку $\sin \theta_F = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_F}$, то після ряду перетворень отримаємо квадратне рівняння

$$(d_x^2 - d_y^2) \cos^2 \theta_F - 2d_x d_R \cos \theta_F + d_R - d_y = 0$$

і його розв'язок

$$\cos \theta_F = \frac{2d_x d_R \pm 2d_y \sqrt{(d_x^2 - d_y^2 + d_R^2)}}{2(d_x^2 - d_y^2)}. \quad (10)$$

Із двох значень $\cos \theta_F$ вибирається те, яке відповідає першому квадранту. Підстановкою $\cos \theta_F$ в залежності (8) і (9) визначаються координати точок спряження F і G сегментів кривої лінії.

Приклад реалізації описаного алгоритму побудови кривої представлено на рис. 7. В якості вхідних параметрів для розрахунку прийнято $E(3, 2)$, $C(25, 0)$, $R_1 = 60$, $R_2 = 50$. Отже при сталих розмірах рамки фільтри геометрія профілю задається трьома параметрами.

```
clear;
xE = 3; yE = 2; xC = 25; yC = 0; r1 = 60; r2 = 50;
O1 = [xE yE-r1]; O2 = [xC yC+r2];
a = O2(1)-O1(1); b = r1+r2; c = O2(2)-O1(2);
cos_tet = (2*a*b-2*c*sqrt(a^2+b^2-c^2))/(2*(-c^2+a^2));
sin_tet = sqrt(1-cos_tet^2);
xF = O1(1)+r1*cos_tet; yF = O1(2)+r1*sin_tet;
xG = O2(1)-r2*cos_tet; yG = O2(2)-r2*sin_tet;
A = [xF xG]; B2 = [yF yG];
i = 1; w = 0.5*pi; t = cos(w);
while t <= cos_tet;
    tetal(i,1) = t; tetal(i,2) = sin(w);
    i = i+1; w = w - 0.01; t = cos(w);
end
tetal(i,1) = cos_tet; tetal(i,2) = sin_tet;
X1 = r1*tetal(:,1)+O1(1); Y1 = r1*tetal(:,2)+O1(2);
X2 = -r2*tetal(:,1)+O2(1); Y2 = -r2*tetal(:,2)+O2(2);
plot(X1,Y1,X2,Y2,A,B2);
```

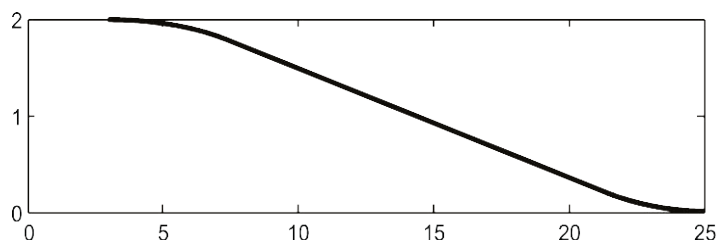


Рис. 7. Фрагмент програми розрахунку і профіль фільтри у вигляді кривої полілінії

Висновки. Таким чином, в роботі на основі одержаних раніше даних експериментальних досліджень профілю природного зносу робочої поверхні фільтри розроблено три

варіанти математичного опису криволінійного профілю. Ці математичні моделі можуть бути використані в процесі оптимізації конструкції фільтри і реалізовані при її виготовленні.

Література

1. Handle GMBH Maschinen und Anlagenbau: Каталог [Електронний ресурс] — 12 с. — <http://www.haendle.com>.
2. Bongioanni stampi : Каталог [Електронний ресурс] — 16 с. — Режим доступу: <http://www.bongioannistampi.com>.
3. Барабаничиков Ю.Г. Трение керамической массы по металлической поверхности [Текст] / Ю.Г. Барабаничиков, С.Г. Чулкин // Научно-технические ведомости. — СПб.: Изд-во СПбГПУ. — 2011. — №1(117). — С. 268–278.
4. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента [Текст] / В.В. Шульц. — Л.: Машиностроение, 1990. — 208 с.
5. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин [Текст] / Д.Н. Решетов. М.: Высшая школа, 1974. 206 с.
6. Weisstein, Eric W. "Bézier Curve." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://mathworld.wolfram.com/BezierCurve.html>
7. Роджерс Д. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. [Текст] // Д. Роджерс, Дж. Адамс — М.: Мир, 2001. — 604 с.
8. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука — 1974. — 832 с.

© В. Г. Панчук, А. Г. Панчук, В.О. Мельник

УДК 62-44 : 621.979 : 621.7.08

*В. Г. Панчук, д.т.н., доцент ; А. Г. Панчук, к.т.н., доцент ; В.А. Мельник, аспирант
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЕСТЕСТВЕННОГО ИЗНОСА ФИЛЬТЕРЫ МУНДШТУКА ПРЕССА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

В статье на базе ранее полученных экспериментальных данных выполняется математическое моделирование геометрического профиля рабочей поверхности фильеры, приближенного к форме естественного износа. Разработаны три математические модели, описывающие криволинейный профиль фильеры - в виде полинома третьего порядка, кривой Безье и ломаной полилинии. Определены для каждого случая перечень параметров, которые задают геометрию кривой.

Ключевые слова: математическое моделирование, фильера, износ.

UDC 62-44 : 621.979 : 621.7.08

*V.H. Panchuk, Full Ph.D.; A.H. Panchuk, Ph.D.; V.O. Melnyk, Postgraduate student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

SIMULATION SURFACE OF NORMAL WEAR OF A CARRIER DIE USED FOR CERAMIC BRICKS PRODUCTION

On the basis of previously obtained experimental data in the paper performed mathematical modeling of the geometric profile of the working surface of the spinneret, close to its natural shape wear. Three mathematical models describing the curvilinear profile dies are worked out - as a third-order polynomial, Bezier curve and broken polylines. Determined for each case, the list of parameters that define the geometry of the curve.

Keywords: mathematical simulation, dies, wear.

МАЛОУТХОДНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ШТАМПОВКА МЕДНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОКОВОК

Обоснована целесообразность комбинирования операций предварительного осаждения и прошивки заготовок вне гравюр штампов с операциями последующей завершающей штамповки в штампах при производстве осесимметричных поковок. Операции могут быть выполнены на различном оборудовании, при этом показана необходимость учета закономерностей бочкообразования заготовок при подготовительной осадке перед последующими штамповочными переходами. Предложена обобщенная методика проектирования технологий комбинированной штамповки осесимметричных поковок, учитывающая закономерности формоизменения на операциях осадки и прошивки. Выполнено промышленное внедрение более совершенной технологии комбинированной горячей объемной штамповки поковки «Головка кислородной фурмы», позволившее сэкономить до 7,7 % технической меди на каждом изделии.

Ключевые слова: заготовка, подготовительная осадка, прошивка, горячая объемная штамповка, осесимметричная медная поковка.

Введение. Осесимметричные поковки, изготавливаемые с применением операций предварительной осадки заготовок в торец, являются весьма распространенными изделиями, штампуемыми на кривошипных горячештамповочных прессах. Такие поковки, включенные в первую группу соответствующей классификации [1], штампуют в открытых и закрытых штампах. Среди представителей круглых в плане поковок достаточно много изделий из меди и медных сплавов. Проектирование технологических процессов штамповки поковок из цветных металлов и сплавов должно осуществляться с учетом технологических и теплофизических свойств материала заготовки для исключения его разрушения и подсыхания, включать анализ вариантов изготовления детали с минимальными затратами металла и труда [2]. При этом на этапах выбора переходов штамповки и конструирования ручьев штампов следует учитывать закономерности формоизменения материала при выбранной схеме деформирования и заданных термомеханических условиях. Применение операции подготовительной свободной осадки заготовок при технологическом проектировании требует принимать во внимание закономерности бочкообразования медных заготовок, которые, при прочих равных условиях, количественно, а иногда и качественно, отличаются от закономерностей бочкообразования стальных заготовок и в настоящее время изучены недостаточно.

Анализ последних исследований и публикаций. Операция осадки, в том числе бойками различной конфигурации, наиболее соответствует одному из принципов проектирования энергоэффективных технологий штамповки – принципу максимума свободных внеконтактных поверхностей, сформулированному И.М. Володиным [3]. Деформирование сопровождается бочкообразованием заготовки, т.е. формированием профиля боковой поверхности, что позволяет предложить ряд безручьевых способов подготовительного профилирования заготовок [4]. Для прогнозирования формоизменения с некоторой погрешностью пользуются данными, полученными при осадке свинцовых образцов, используемых для физического моделирования процессов горячей деформации. Данный подход не учитывает количественную разницу размеров бокового профиля заготовок из разных материалов при различных условиях деформирования [5, 6]. Это может привести к неправильному назначению линии разреза штампов, незаполнению гравюр материалом, чрез-

мерному вытеканию металла в облой, повышенному износу штампов. Поэтому часто при моделировании процессов осадки для отражения адекватной картины формоизменения предварительно экспериментально получают зависимости напряжений от деформаций при заданных скоростях деформирования и температурах [7, 8], которые используют в пакетах конечно-элементного анализа.

Различия показателей бочкообразности при осадке заготовок из разных материалов объясняются объективными причинами. Во-первых, из-за отличия коэффициентов трения на контакте материалов «сталь-медь», «сталь-свинец», «сталь-сталь» и т.п., причем выделение влияния таких факторов как температура, скорость и степень деформации, размеры заготовок является затруднительным [9]. Давление металла на инструмент в процессе осадки также непостоянно. Во-вторых, на количественные показатели формоизменения оказывают влияние реологические свойства материалов, т.е. форма кривой упрочнения при заданных термомеханических условиях [9]. Классические представления, опирающиеся на принципы постоянства объема и наименьшего сопротивления, не берут во внимание влияние реологических свойств материалов на конечное формоизменение, различие которого объясняется только разными коэффициентами контактного трения, а, следовательно, различным объемом металла, вовлеченного в жесткие приконтактные зоны, и различными размерами очага деформации [5, 6]. В настоящее время преобладающим является мнение, что влиянием свойств материалов на количественные показатели формоизменения пренебрегать нельзя [9, 10].

Известны исследования процессов деформации материалов на основе меди при повышенных температурах [11], на основании которых усовершенствована технология производства круглых в плане изделий электротехнического назначения. В работе [12] выполнен анализ влияния исходной формы боковой поверхности медных заготовок и условий контактного трения на конечное формоизменение полуфабриката, при этом для практических целей предложены специальные карты трения и методика определения оптимальной формы бокового профиля заготовки перед осадкой. Следует отметить, что данные исследования проведены только для условий холодной деформации при комнатной температуре заготовки, а указанную методику трудно реализовать на практике из-за сложностей предварительной профилировки заготовок на вогнутый профиль боковой поверхности.

В работе [13] выполнено исследование закономерностей бочкообразования заготовок из меди марки М1 при осадке в холодном (18 °) и горячем (850 °С) состоянии. Данные закономерности целесообразно учитывать при проектировании энергоресурсосберегающих технологий штамповки круглых в плане поковок для формирования рациональной формы предварительного полуфабриката.

Цель работы, постановка задач. Целью настоящей работы является разработка малоотходных технологий комбинированной горячей объемной штамповки осесимметричных поковок из меди на основе установления рациональных режимов предварительной осадки заготовок.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- на основании модели бочкообразования заготовок при осадке разработать обобщенную методику проектирования технологий комбинированной штамповки осесимметричных поковок из цветных металлов, при этом учесть возможность комбинирования операций осадки, прошивки, предварительной и окончательной штамповки;
- усовершенствовать технологию горячей объемной штамповки осесимметричной медной поковки применительно к конкретным производственным условиям.

Материалы исследования. Известно, что на прессовом оборудовании для получения простых стальных поковок необходимы один – три ручья, а для сложных поковок – до пяти ручьев, включая осадку [1]. При штамповке же цветных металлов применение мно-

горючевых штампов зачастую нецелесообразно, т.к. после каждой деформирующей операции необходимо удалять дефекты на поверхности заготовок [2].

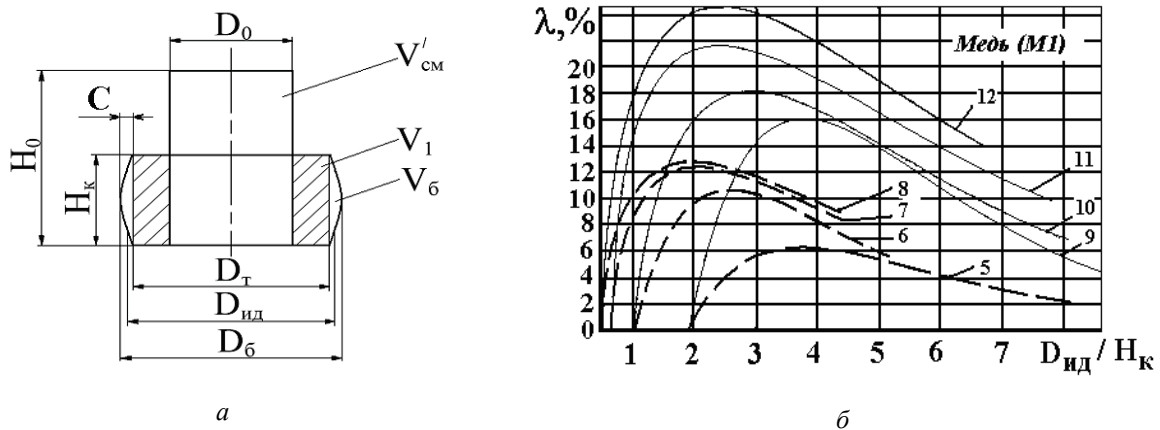


Рис. 1. Бочкообразность заготовок при осадке:

a – баланс объемов заготовки при осадке плоскими плитами: *C* – прогиб образующей бочки; $D_б, D_т, D_ид$ – конечные диаметральные размеры; $V_б, V_1$ и $V_см$ – конечные объемные характеристики и смещенный объем заготовки; *б* – изменение коэффициента бочкообразности медных заготовок в процессе осадки при различных начальных коэффициентах контакта (D_0/H_0):

5 – 18 °С, $D_0/H_0 = 1,899$; 6 – 18 °С, $D_0/H_0 = 1,026$; 7 – 18 °С, $D_0/H_0 = 0,65$; 8 – 18 °С, $D_0/H_0 = 0,502$; 9 – 850 °С, $D_0/H_0 = 1,917$; 10 – 850 °С, $D_0/H_0 = 1,034$; 11 – 850 °С, $D_0/H_0 = 0,676$; 12 – 850 °С, $D_0/H_0 = 0,511$

Как правило, используют два метода штамповки на прессах [2]: а) из предварительно подготовленной заготовки, получаемой открытой ковкой на плоских или фасонных бойках; б) из мерной заготовки без предварительной подготовки. В первом случае подготовленную фасонную заготовку штампуют в одноручьевом штампе с одним или несколькими нагревами. Заполнение полости штампа металлом зависит от формы полуфабриката и штамповочного ручья, а схемы деформирования следует выбирать такими, при которых получение требуемой формы происходит за счет выдавливания, а не за счет осадки [2], что также является отличительной особенностью технологий штамповки поковок из цветных металлов. Многопереходную штамповку осуществляют в одном штампе или специальных предварительных штампах, постепенно доводящих форму заготовки до окончательных размеров поковки. Предварительные переходы рассчитывают так же, как и для поковок, штампуемых из конструкционных сталей. При этом подготовительная осадка медных заготовок под штамповку поковок типа дисков, сопровождающаяся интенсивным бочкообразованием (рис. 1), способствует лучшему заполнению гравюр, т.е. служит для фасонирования заготовок.

Бочкообразность при осадке оценивают коэффициентом λ [6]:

$$\lambda = (V_б / V_{заг}) \times 100\%, \quad (1)$$

где $V_{заг}$ и $V_б$ – объем заготовки и объем, образующий бочку соответственно (см. рис. 1, а).

Исходную заготовку принимают идеализированной с начальными диаметром D_0 и высотой H_0 . На рис. 1, б приведены графические зависимости коэффициента бочкообразности λ для медных заготовок (марка М1) от изменяющегося с увеличением степени деформации ε при осадке коэффициента контакта $D_ид / H_к$, где $D_ид = D_0 / \sqrt{1 - \varepsilon}$ – идеальный диаметр при равномерной осадке заготовки; соответственно $H_к = H_0 (1 - \varepsilon)$ – конечная высота заготовки после осадки. Соответственно, показатель λ , необходимый для

инженерных расчетов формоизменения, для материала при заданных условиях деформирования зависит от начального коэффициента контакта D_0 / H_0 и степени деформации при осадке $\varepsilon = (H_0 - H_k) / H_0$, которую можно выразить через текущий коэффициент контакта $D_{уд} / H_k$.

На основе анализа закономерностей изменения коэффициента бочкообразности λ при осадке, полученных в работе [13], установлено, что семейство кривых $\lambda = f(D_{уд} / H_k; D_0 / H_0)$ удовлетворительно описывается экспоненциальная модель:

$$\lambda = a_0 \frac{D_0}{H_0} \left(\frac{1}{(1-\varepsilon)^{3/2}} - 1 \right)^{a_1} \cdot \exp \left[a_2 \frac{D_0}{H_0} \left(\frac{1}{(1-\varepsilon)^{3/2}} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

где a_0 , a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты, найденные после обработки результатов эксперимента.

Значения коэффициентов a_0 , a_1 и a_2 находили методом перебора по аргументу при помощи разработанного специального программного обеспечения [13]. Для условий горячей (850 °С) осадки медных (М1) заготовок получены зависимости данных коэффициентов от начального коэффициента контакта:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 8,384 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 24,674 \cdot (D_0 / H_0) + 39,88; \\ a_1 &= 0,388 e^{0,495 \cdot (D_0 / H_0)}; \quad a_2 = 0,211 e^{0,488 \cdot (D_0 / H_0)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Средняя погрешность между расчетами коэффициента бочкообразности λ по модели (2), с учетом зависимостей (3), и данными эксперимента для меди М1 составляет 13 %. Сравнение значений коэффициента λ для геометрически подобных заготовок, осажённых до одинаковых степеней осадки ε при различных условиях, показало, что расчеты по модели Я.М. Охрименко [6] при горячей осадке меди приводят к занижению результатов до 6 % (следует отметить, что для случая холодной осадки меди наблюдается занижение результатов до 44 %).

После вычисления параметра λ проводят инженерные расчеты конечных размеров:

$$D_T = D_{уд} \sqrt{1 - 0,01\lambda}; \quad C = \frac{3}{4} D_T \left(\sqrt{1 + \frac{0,01\lambda}{1 - 0,01\lambda}} - 1 \right) \left. \right\} \Rightarrow D_0 = D_T + 2C. \quad (4)$$

Горячую объемную штамповку медной (М1) поковки «Головка кислородной фурмы» в условиях кузнечно-прессового цеха ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» (в настоящее время цех находится в составе ООО «Метинвест – Мариупольский ремонтно-механический завод») проводили после порезки медного прутка $\varnothing 90$ мм на мерные заготовки длиной $H_0 = 119$ мм. Резку осуществляют в штампах кривошипного пресса с номинальной силой 4 МН. Технический контроль выполняют линейкой и штангенциркулем после наружного осмотра. Нарезанные мерные заготовки передают на кузнечный участок к нагревательным печам. Согласно технологической инструкции заготовки нагревают в газопламенной печи камерного типа до $t = 850 \dots 900$ °С, далее производят осадку заготовки и прошивку в подкладном кольце. После этого заготовки подогревают и осуществляют предварительную штамповку. Осадку, прошивку и предварительную штамповку в подкладном штампе, закрепляемом в хоботе кузнечного манипулятора, согласно изложенным выше рекомендациям, проводят на паровоздушном ковочном молоте. Для окончательной штамповки в размер поковки передают на кривошипный пресс (4 МН). Образовавшийся заусенец убирают механическим способом.

Учитывая, что прошивку заготовки проводят после осадки, то формулу А.В. Ребельского [14] для вычисления конечного наружного диаметра (D) прошитой заготовки записывали как

$$D = D_{\text{ио}} \sqrt{1 + \varepsilon_{\text{пр}} (d / D_{\text{ио}})^2}, \quad (5)$$

где d – диаметр прошивня;

$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 - h_{\text{пр}} / H_{\kappa}$ – условная степень деформации при прошивке, здесь $h_{\text{пр}}$ – толщина дна заготовки при глухой прошивке.

Откуда, после преобразований, получили:

$$\varepsilon = 1 - \frac{D_0^2}{D^2 - \varepsilon_{\text{пр}} d^2}. \quad (6)$$

Диаметр заготовки после прошивки должен быть меньше на 3...5 мм диаметра гравюры предварительного ручья штампа, который составляет 150 мм (диаметр заготовки, отштампованной в данном штампе, рис. 2, з). Откуда принимали $D = 147$ мм (рис. 2, в). Учитывая условия поставки меди, расчеты проводили при сохранении диаметра исходной заготовки $D_0 = 90$ мм (рис. 2, а), а также диаметра прошивня $d = 42$ мм (рис. 2, в). При сквозной прошивке $\varepsilon_{\text{пр}} = 1$. Тогда, после вычислений по формуле (6), имеем: $\varepsilon = 0,58$ (т.е. 58 %), откуда получили $D_{\text{ио}} = 139$ мм. Объем гравюры для поковки составляет $V = 744000$ мм³. Тогда конечная высота заготовки после осадки: $H_{\kappa} = V / (0,785 D_{\text{ио}}^2) = 744000 / (0,785 \cdot 139^2) = 49$ мм. Это позволило рассчитать начальную высоту заготовки: $H_0 = H_{\kappa} / (1 - \varepsilon) = 49 / (1 - 0,58) = 117$ мм. Вычисляли отношения $h_{\text{пр}} / H_{\kappa} = 0$ и $d / D_{\text{ио}} = 0,302$. Воспользовавшись графиком Цшейле (приведен, например, в источнике [15, стр. 332]), находили $(H_{\kappa, \text{пр}} / H_{\kappa}) = 0,99$, где $H_{\kappa, \text{пр}}$ – высота заготовки после прошивки.

Расчеты проверяли по условию образования бочки при осадке и её развития при прошивке. Отношение $D_0 / H_0 = 90 / 117 = 0,77$ и $D_{\text{ио}} / H_{\kappa} = 139 / 49 = 2,83$. Тогда, по выражениям (2) и (3) рассчитывали коэффициент бочкообразности: $\lambda = 0,207$. Проведя вычисления по формулам (4), получили: $D_T = 124$ мм, $D_{\sigma} = 146$ мм (рис. 2, б).

Выполняли учет развития бочкообразования ($\lambda_{\text{пр}}$) при прошивке:

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{\lambda}{\sqrt[3]{(H_{\kappa, \text{пр}} / H_{\kappa})}}. \quad (7)$$

Откуда: $\lambda_{\text{пр}} = 0,208$. Размеры прошитой заготовки: $H_{\kappa, \text{пр}} = 48,5$ мм, $D_T = 124$ мм, $D = 147$ мм (см. рис. 2, в). Эквивалентный коэффициент подкатки при данных условиях составляет $K_{\text{но}} = 1,113$, что соответствует формовочному или пережимному ручью [1]. Таким образом, подтвердили, что деформированная заготовка свободно размещается в гравюре предварительного ручья (рис. 3). Отметим, что по базовой технологии $\varepsilon = 0,55$. Принимаемая длина $H_0 = 117$ мм, что отличается от базовой технологии на 2 мм.

Штамповка по усовершенствованной технологии (см. рис. 3) внедрена в условиях кузнечно-прессового цеха ПАО «ММК им. Ильича» (ООО «Метинвест – Мариупольский ремонтно-механический завод»). При этом поковки отштамповывали на кривошипном прессе в закрытом штампе «в размер», образование заусенца не происходило. Разработанные мероприятия позволили достигнуть экономии меди (M1) до 7,7 %.

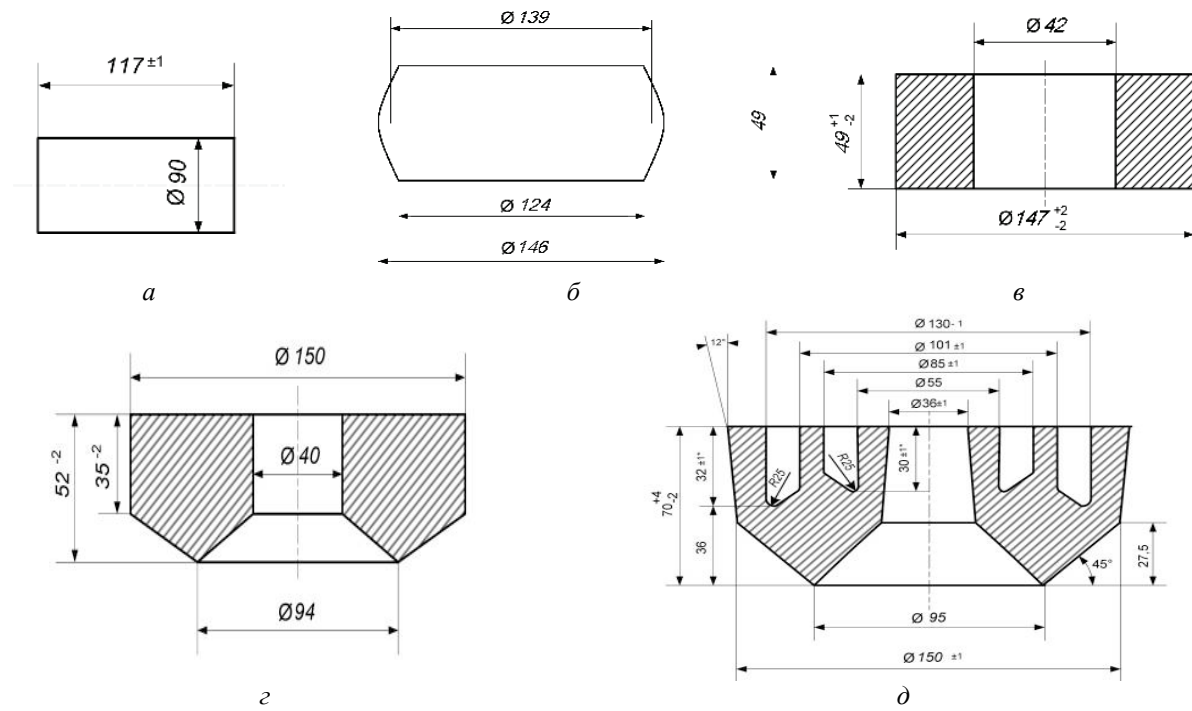


Рис. 2. Эскизы переходов штамповки поковки «Головка кислородной фурмы»:
а – мерная заготовка, *б* – заготовка после осадки, *в* – заготовка после прошивки,
г – поковка после предварительного ручья, *д* – поковка после окончательного ручья



а



б



в

Рис. 3. Промышленное внедрение штамповки «Головки кислородной фурмы»:

а – заготовка и подготовительная осадка; *б* – прошивка и прошитая заготовка;
в – предварительная и окончательная штамповка (фотографии оборудования и поковок)

Выводы. Разработана обобщенная методика проектирования технологий комбинированной объемной штамповки осесимметричных поковок, учитывающая закономерности формообразования полуфабриката на предварительных операциях осадки и прошивки. В производственных условиях внедрена более совершенная технология штамповки поковки

«Головка кислородной фурмы», которая позволила достичь экономии до 7,7 % технической меди на каждом изделии.

Литература

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. [Текст] / Ред. совет: Е. И. Семенов [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2. Горячая объемная штамповка / под ред. Е. И. Семенова. – 1986. – 592 с.
2. Ковка и штамповка цветных металлов: справочник [Текст] / Н. И. Корнеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 229 с.
3. Володин И. М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки и созданные на её основе технологии [Текст] / И. М. Володин, А. А. Ромашев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 9. – С. 19–29.
4. Гринкевич В. А. Бесштамповое профилирование на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях [Текст] / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – № 5. – 2010. – С. 19–23.
5. Воронцов А. Л. Определение формы боковой поверхности заготовки при осадке [Текст] / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 3. – С. 7–16.
6. Охрименко Я. М. Теория процессов ковки [Текст] / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин – М.: Высш. шк., 1977. – 295 с.
7. Jerzy Kajtoch. Strain in upsetting process [Текст] / Jerzy Kajtoch // Metallurgy and foundry engineering. – 2007. – Vol. 33. – № 1. – P. 51-61.
8. Tahir Altinbalik. An upper bound analysis and determination of the barreling profile in upsetting [Текст] / Tahir Altinbalik, Yilmaz Çan // Indian Journal of Engineering & Material Sciences. – December, 2011. – Vol. 18. – P. 416-424.
9. Inverse analysis applied to the evaluation of friction and rheological parameters in hot forming of steel [Текст] / Szyndler D., Pietrzyk M., Lenard J.G., Fyke S.H. // Proc. 8th International Conference Metal Forming' 2000, Sept. 3-7.2000. – Krakow; Poland, 2000. – P.101–106.
10. Shlomchack G. G. Rheological complexity of metals and anomalies of their deformation [Текст] / G. G. Shlomchack, A. M. Melnik, I. Mamuzič // Metallurgija. – Zagreb, 1996. – Vol. 35, Br. 2. – P. 83–86.
11. Gaponova O. Deforming of the copper-titanium powder materials at elevated temperatures [Текст] / O. Gaponova, L. Ryabicheva // International Conference Deformation and fracture in structural pm materials DF PM 2008 Proceedings. – Stará Lesná, High Tatras, Slovak Republic, 2008. – P. 202–206.
12. Rajeev Arya. Near net shape upsetting of cooper billet using friction determination curve [Текст] / Rajeev Arya, Kuldip Singh Parihar, Pritesh Prajapati // International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. – January-March, 2012. – Vol. 1, Issue II. – P. 51–54.
13. Кухарь В. В. Бочкообразование при осадке черных и цветных металлов и сплавов [Текст] / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко // Труды международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». 26–28 сентября 2007 г. – Санкт-Петербург: из-во СПбГПУ, 2007. – С. 347–351.
14. Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки [Текст] / А. В. Ребельский; под ред. С. С. Соловцова. – М.: Машиностроение, 1965. – 248 с.
15. Теория обработки металлов давлением [Текст] / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго [и др.]; под ред. И. Я. Тарновского. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.

© В.В. Кухарь

МАЛОВІДХОДНЕ КОМБІНОВАНЕ ШТАМПУВАННЯ МІДНИХ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОКОВОК

Обґрунтована доцільність комбінування операцій попереднього осаджування та прошивки заготовок поза гравюрами штампів з операціями наступного завершального штампування у штампах при виробництві вісесиметричних поковок. Операції можуть бути виконані на різному устаткуванні, при цьому показана необхідність врахування закономірностей діжкоутворення заготовок при підготовчому осаджуванні попереду наступних штампувальних переходів. Запропоновано узагальнену методику проектування технологій комбінованого штампування вісесиметричних поковок, що враховує закономірності формозміни на операціях осаджування та прошивки. Виконано промислове впровадження більш досконалої технології комбінованого гарячого об'ємного штампування поковки «Головка кисневої фурми», що дозволило економити до 7,7 % технічної міді на кожному виробі.

Ключові слова: заготовка, підготовче осаджування, прошивка, гаряче об'ємне штампування, вісесиметрична мідна поковка.

THE LOW-WASTE COMBINED DIE-FORGING OF COPPER AXISYMMETRIC FORGINGS

The expediency of a combination of operations of preliminary upsetting and drifting of billets outside of dies' gravures with operations of consequent completing die-forging by manufacture of axisymmetric forgings is justified. Operations can be executed on the different equipment, thus necessity of the account of regularities of buckling of billets is shown at a preparatory upsetting before consequent die-forging transitions. The generalized technique of designing of technologies of the combined die-forging of the axisymmetric forgings, taking into account regularities of a form-changing on operations of a upsetting and drifting is offered. The industrial introduction of more perfect technology of the combined hot volumetric die-forging of the forging-part “the Head of an oxygen nozzle” is executed, allowed to save up to 7,7 % of a technical copper on each workpiece.

Keywords: billets, preliminary upsetting, drifting, hot volumetric die-forging, axisymmetric copper forgings.

А.В. Явтушенко, к. т. н., доцент

А.В. Явтушенко, к. т. н., доцент

Запорожский национальный технический университет

Т.А. Васильченко, к. т. н., доцент

Запорожская государственная инженерная академия

АНАЛИТИЧЕСКАЯ КИНЕМАТИКА ШЕСТИЗВЕННОГО МЕХАНИЗМА ВЫТЯЖНОГО ПРЕССА

Рассмотрены вопросы кинематического анализа шестизвеного рычажного механизма специализированных прессов для глубокой вытяжки. Механизм полностью соответствует требованиям технологического процесса в отношении скорости ползуна в период рабочего хода. По сравнению с кривошипно-ползунным механизмом максимальная скорость ползуна во время деформации уменьшается более чем в два раза и на 2/3 участка рабочего хода остается практически постоянной.

Ключевые слова: *пресс, исполнительный механизм, анализ, параметр, функция положения, передаточная функция, угол давления.*

Введение. Для выполнения операций глубокой вытяжки используются механические прессы со специальным исполнительным механизмом, обеспечивающим в период рабочего хода движение ползуна со скоростью, близкой к постоянной [1–4]. Из всех возможных вариантов механизмов для этой цели наиболее широкое применения находят многозвенные рычажные механизмы, представляющие собой комбинацию некоторых простейших механизмов. Одним из таких механизмов является шестизвеновый рычажный механизм, используемый в прессах ведущих фирм "Aida" (Япония), "Clearing" (США) и др. Практическая реализация такого механизма показывает простоту его конструкции, надежность и, главное, достаточное удовлетворение требований технологического процесса в отношении скорости ползуна в период рабочего хода. Однако попытки создания прессов указанной структурной схемы с иными техническими параметрами приводят к конструктивным проблемам, связанным с отсутствием теоретических исследований по синтезу и анализу подобных механизмов. Выбор параметров механизма производится или по данным аналогичных конструкций прессов с другими техническими характеристиками, или приближенными методами, например, графическим. Вполне очевидно, что параметры синтезируемого механизма в общем случае оказываются не всегда оптимальными в смысле обеспечения наибольшего кинематического эффекта.

Анализ последних исследований и публикаций. Частично вопросы кинематического анализа указанного механизма рассмотрены в работе [5], в которой представлены рекомендации по методике оптимизации параметров шестизвенового механизма вытяжных прессов. Упрощенная методика кинематического анализа подобных механизмов рассмотрена в работе [6].

Постановка задачи. Целью настоящей статьи является определение аналитических зависимостей для определения кинематических характеристик механизма, служащих основой для последующего параметрического синтеза.

Основной материал и результаты. Главный исполнительный механизм вытяжного пресса представляет собой сочетание двух простейших механизмов (рис. 1), первый из которых представляет собой обычный четырехзвенник кривошипного исполнения. К шатуну этого механизма присоединена трехшарнирная диада, представляющая собой второй шатун CD и ползун D . Кинематический эффект достигается за счет того, что шарнир C , расположенный на шатуне AB первого механизма, совершает движение по специальной

$$l_s = -R \frac{\sin \alpha}{\sin \phi_s};$$

l_0 – расстояние между центрами O_1 и O_2 ;

R, b, c – размеры звеньев механизма (см. рис. 1).

При известном положении шатуна AB координаты точки C присоединения второго шатуна CD определяются длиной f звена AC и углом наклона ϕ_{f_0} звена AC относительно оси шатуна AB . В принятой системе координат $X_1O_1Y_1$ находится

$$\left. \begin{aligned} x_{c1} &= x_A + f \cos(\phi_b + \phi_{f_0}), \\ y_{c1} &= y_A + f \sin(\phi_b + \phi_{f_0}). \end{aligned} \right\}$$

Переходя в основную систему координат XO_1Y , т. е. выполняя поворот осей координат на угол ϕ_{f_0} , находим

$$\left. \begin{aligned} x_{c0} &= x_{c1} \cos \phi_{f_0} - y_{c1} \sin \phi_{f_0}, \\ y_{c0} &= x_{c1} \sin \phi_{f_0} + y_{c1} \cos \phi_{f_0} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Система (1) представляет собой параметрическое уравнение шатунной кривой, описываемой точкой C . При известных координатах точки C , перемещение ползуна от крайнего нижнего положения определяется по формуле

$$S_p = (R + f + L_s) \cos \beta_0 + y_{c0} - L_s \cos \beta, \quad (2)$$

где L_s – длина второго шатуна;

β, β_0 – текущий угол наклона шатуна CD и угол наклона шатуна в крайнем нижнем положении

$$\beta = \arcsin \frac{x_{c0}}{L_s}, \quad \beta_0 = \arcsin \left(\frac{E}{R + f + L_s} \right), \quad (3)$$

E – дезаксиал второго механизма.

Зависимость (2) является функцией положения механизма и определяет зависимость между координатами ведущего и ведомого звеньев механизма. Первая и вторая производные функции положения по координате ведущего звена являются первой AV и второй AJ передаточными функциями механизма. Дифференцируя дважды зависимость (2), находим

$$AV = \frac{dS_p}{d\alpha} = y'_{c0} \cdot L_s \sin \beta \cdot \beta'. \quad (4)$$

$$AJ = \frac{d^2 S_p}{d\alpha^2} = y''_{c0} + L_s \left[\cos \beta (\beta')^2 + \sin \beta \cdot \beta'' \right]. \quad (5)$$

Производные координат точки C находятся по зависимостям:

$$\begin{aligned} x'_{c0} &= x'_c \cos \phi_0 - y'_c \sin \phi_0; & - & & y'_{c0} &= x'_c \sin \phi_0 + y'_c \cos \phi_0; \\ x'_c &= R \sin \alpha + f \sin(\phi_b + \phi_{f_0}) \phi'_b; & = & & y'_c &= R \cos \alpha + f \cos(\phi_b + \phi_{f_0}) \phi'_b; \\ x''_{c0} &= x''_c \cos \phi_0 - y''_c \sin \phi_0; & - & & y''_{c0} &= x''_c \sin \phi_0 + y''_c \cos \phi_0; \\ x''_c &= R \cos \alpha + f \left[\cos(\phi_b + \phi_{f_0}) (\phi'_b)^2 - \sin(\phi_b + \phi_{f_0}) \phi''_b \right]; \\ y''_c &= -R \sin \alpha + f \left[\sin(\phi_b + \phi_{f_0}) \phi''_b + \cos(\phi_b + \phi_{f_0}) (\phi'_b)^2 \right]. \end{aligned}$$

Производные угла β определяются после дифференцирования первого выражения (3)

$$\beta' = \frac{x'_{c0}}{L_s \cos \beta}; \quad = \beta'' \frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{x''_{c0}}{L_s} \cdot \sin \beta + (\beta')^2 \right).$$

Производные координаты ϕ_b определяются по формулам [7]

$$\phi_b' = \frac{-R \sin(\alpha - \phi_c)}{b \sin(\phi_b - \phi_c)}; \quad \phi_c' = \frac{R \sin(\alpha - \phi_b)}{c \sin(\phi_c - \phi_b)},$$

$$\phi_b'' = \frac{R \cos(\alpha - \phi_c) - c(\phi_c')^2 + b(\phi_b')^2 \cos(\phi_b - \phi_c)}{-b \sin(\phi_b - \phi_c)}.$$

Зависимости (1), (4) и (5) однозначно определяют кинематические характеристики механизма в зависимости от его геометрических параметров, дают возможность оценки его свойств и служат теоретической основой для оптимизационного параметрического синтеза. В следующей статье авторов в настоящем сборнике представлены методы параметрического синтеза рассматриваемого механизма. Использование оптимизационных методов параметрического синтеза [8, 9] обеспечивает определение оптимального варианта параметров механизма, в наилучшей степени соответствующим технологическим требованиям.

Координатой входного звена является угол поворота α , отсчитываемый от положительного направления оси O_1X_1 против часовой стрелки. Координатой выходного звена является перемещение ползуна S_p , отсчитываемое от крайнего нижнего положения против движения ползуна. Вспомогательная ось O_1X_1 повернута относительно основной оси O_1X на угол ϕ_0 . При анализе кинематики механических прессов угол отсчета поворота главного вала принимается от линии перемещения ползуна против движения кривошипа. В таком случае расчетный угол поворота кривошипа O_1A определяется по формуле

$$\alpha_v = \frac{\pi}{2} + \alpha + \phi_0.$$

Фактические значения скорости V_p и ускорения J_p ползуна определяются из зависимостей, определяющих понятие передаточных функций. Если скорость кривошипа $\omega = d\alpha/dt$ принять постоянной, то тогда находим

$$V_p = AV \cdot \omega, \quad J_p = AJ \cdot \omega^2.$$

В качестве примера на рисунке 2 показаны результаты расчета кинематических параметров шестизвенного механизма вытяжного пресса S4-10000/4500x2300/LD номинальным усилием 10 МН фирмы "Aida" (Япония). Угловая скорость ω кривошипа принята равной 1 рад/с. Расчет углов поворота кривошипа производится по формуле (8).

Для сравнения на рисунке приведены соответствующие характеристики аксиального кривошипно-ползунного механизма (показаны штриховыми линиями) имеющего такой же максимальный ход ползуна (900 мм), что и механизм пресса S4-10000/4500x2300/LD. Из рисунка следует, что при принятых параметрах механизма обеспечивается основное функциональное назначение механизма, как исполнительного органа пресса для глубокой вытяжки – на участке рабочего хода обеспечивается практически постоянная скорость движения ползуна. Если принять, что рабочий ход ползуна составляет примерно 200 мм, то из рисунка следует, что скорость начала рабочего хода рассматриваемого механизма (примерно 200 мм/с) более чем в два раза меньше скорости ползуна кривошипно-ползунного механизма (примерно 410 мм/с) и сохраняется практически неизменной на 2/3 участка рабочего хода. Скорость обратного хода ползуна незначительно превышает скорость ползуна кривошипно-ползунного механизма.

Для рычажных механизмов важным является обеспечение допустимых углов давления. Для силовых механизмов угол давления в период рабочего хода не должен превышать 20...30°, а при холостом ходе – 45...60°.

Для первого четырехзвенника угол давления в шарнире C определяется по формуле

$$\delta_c = \frac{\pi}{2} + \phi_b - \phi_c.$$

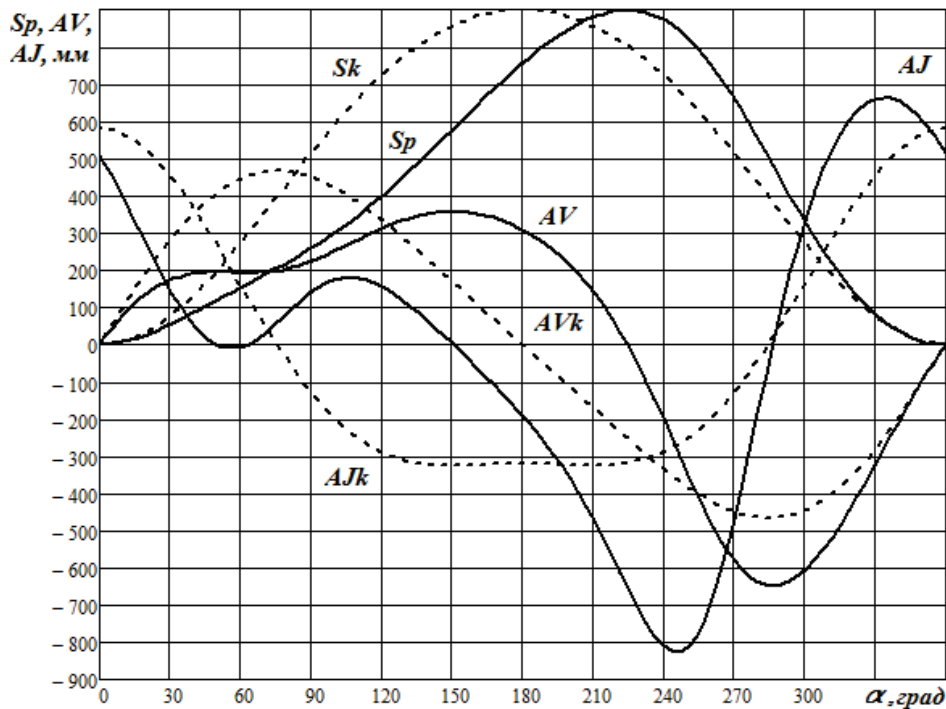


Рис. 2 – Кинематические характеристики исполнительного механизма
вытяжного прессы S4-10000/4500x2300/LD

Для второго механизма угол давления в шарнире D есть угол β , определяемый по первой формуле (3).

Предварительные расчеты показывают, что при любой допустимой вариации параметров механизма величина углов давления не превышает предельные значения.

Выводы

Шестишвенный исполнительный механизм вытяжного прессы соответствует функциональному назначению и полностью удовлетворяет технологические требования в отношении скорости перемещения ползуна в период рабочего хода.

Представленные аналитические зависимости определяют все кинематические характеристики механизма в зависимости от его параметров, дают возможность анализа влияния параметров и служат основой для последующего параметрического синтеза механизма.

Рассматриваемый механизм обеспечивает снижение скорости в период рабочего хода по сравнению с кривошипно-ползунным механизмом более чем в два раза. При оптимальном выборе параметров обеспечивается уменьшение скорости начала рабочего хода с последующим ее незначительным возрастанием в процессе деформации.

Значения углов давления при оптимальных параметрах механизма не превышают допустимые величина, как в период рабочего хода, так и при холостом ходе механизма.

Литература

1. Живов Л.И. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов [Текст] / Л.И. Живов, А.Г. Овчинников, Е.Н. Складчиков / Под ред. Л.И. Живова. – М.: Изд-во МГТУ, 2006. – 560 с.
2. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов [Текст] / Ю.А. Бочаров. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 480 с.
3. Свистунов В.Е. Кузнечно-штамповочное оборудование. Кривошипные прессы / В.Е. Свистунов. – М.: МГИУ, 2008. – 704 с.

4. Müller S. Gesichtspunkte für die Gestaltung von Kurbel- und Tiefziehpressen [Текст] // *Maschinenbautechnik*, 21, – 1972, – № 4. – P. 170-174.

5. Балаганский И.Г. Оптимальное проектирование исполнительного механизма вытяжного листоштамповочного пресса из условия выравнивания скорости рабочего движения ползуна [Текст] / И.Г. Балаганский, Б.Н. Юрухин, В.И. Балаганский // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1976, – № 6. – С. 31–34.

6. Свистунов В.Е. Кузнечно-штамповочное оборудование. Кривошипные прессы [Текст] // В.Е. Свистунов. – М.: МГИУ, 2008. – 704 с.

7. Явтушенко А.В. Кинематика многозвенного прижимного механизма механических прессов / А.В. Явтушенко, А.В. Явтушенко, Т.А. Васильченко // *Современная техника и технологии*. – Март 2014. - № 3 [Электронный ресурс]. URL:<http://technology.snauka.ru/2014/03/3324> (дата обращения: 17.03.2014).

8. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах [Текст] / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высш. шк., 2002. – 544 с.

9. Исследование операций [Текст] / В 2-х томах. / Пер. с англ. / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. Т. 1. – 712 с.

© А.В. Явтушенко, А.В. Явтушенко, Т.А. Васильченко

УДК 621.01: 621.73

А.В. Явтушенко, к. т. н., доцент; А.В. Явтушенко, к. т. н., доцент
Запорізький національний технічний університет

Т.А. Васильченко, к. т. н., доцент
Запорізька державна інженерна академія

АНАЛІТИЧНА КІНЕМАТИКА ШЕСТИЗВЕННОГО МЕХАНІЗМУ ВИТЯЖНОГО ПРЕСА

Розглянуто питання кінематичного аналізу шестизвеного важільного механізму спеціалізованих пресів для глибокої витяжки. Механізм повністю відповідає вимогам технологічного процесу відносно швидкості повзуна в період робочого ходу. Порівняно з кривошипно-ползунним механізмом максимальна швидкість повзуна під час деформації зменшується більш ніж у два рази і на 2/3 ділянки робочого ходу залишається практично постійною.

Ключові слова: *прес, виконавчий механізм, аналіз, параметр, функція положення, передатна функція, кут тиску.*

UDK 621.01: 621.73

Javtushenko A, PhD, Associate Professor; Javtushenko A, PhD, Associate Professor
Zaporizhzhya national technical University

Vasilchenko T, PhD, Associate Professor
Zaporozhye state engineering Academy

ANALYTICAL KINEMATICS OF SIX-BAR MECHANISM EXHAUST PRESS

Considered the issues of the kinematic analysis of the six-bar linkage mechanism specialized presses for deep drawing. The mechanism fully consistent with the requirements of the process in terms of speed of the RAM during the working stroke. In comparison with the crank-slider mechanism maximum speed of the RAM during deformation is reduced by more than half and 2/3 of the area of the stroke remains almost constant.

Keywords: *press, actuator, analysis, argument, position function, transfer function, the pressure angle.*

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ВЫТЯЖНОГО ПРЕССА

Рассмотрены вопросы кинематического анализа шестизвенного рычажного механизма специализированных прессов для глубокой вытяжки. Механизм полностью соответствует требованиям технологического процесса в отношении скорости ползуна в период рабочего хода. По сравнению с кривошипно-ползунным механизмом максимальная скорость ползуна во время деформации уменьшается более чем в два раза и на 2/3 участка рабочего хода остается практически постоянной.

Ключевые слова: пресс, исполнительный механизм, анализ, параметр, функция положения, передаточная функция, угол давления.

Введение. Для листовой вытяжки глубоких деталей используются механические прессы со специальным исполнительным механизмом, главная задача которого состоит в воспроизведении определенного закона движения рабочего органа (ползуна) в период рабочего хода. В современных конструкциях прессов наибольшее применение получили многозвенные рычажные механизмы. Однако способы и методы их проектирования, и прежде всего синтеза, в литературе освещены недостаточно. Основными методами синтеза подобных механизмов по-прежнему являются графическое проектирование и проектирование по данным прессов-аналогов. Первый метод синтеза при его простоте и наглядности не может обеспечить определение комбинации параметров в наилучшей степени соответствующих назначению механизма. Проектирование по данным существующих конструкций прессов не всегда возможно ввиду отсутствия действующих прессов с близкими характеристиками.

Анализ последних исследований и публикаций. По условиям обеспечения наилучших условий пластического деформирования заготовки необходимо обеспечить удовлетворение определенных требований в отношении скорости ползуна. Кроме этого существует ряд конструктивных ограничений на параметры механизма. Аналитическое решение задачи синтеза сопряжено с определенными трудностями и требует использования современных математических методов и технических средств. Создание новых конструкций прессов требует разработки новых методов синтеза параметров исполнительного механизма, удовлетворяющих установленные конструктивные и технологические требования. Развитие математических методов оптимизации дает возможность полного отражения в математической модели всех условий синтеза и определения оптимального глобального решения в заданной области параметров. Частично задача была рассмотрена в работах [1, 2] в которых авторы, используя методы минимизации некоторой целевой функции при наличии нескольких ограничений, получили численное решение для конкретных конструкций прессов.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка метода оптимизационного параметрического синтеза исполнительного механизма вытяжного пресса с учетом всех требований технологического и конструктивного характера.

Основной материал и результаты. Содержание и алгоритм оптимизационного параметрического синтеза механизма вытяжного ползуна являются инвариантными по отношению к структуре механизма и форме функции положения и передаточных функций. Поэтому дальнейшие исследования показаны на примере шестизвенного механизма вытяжного ползуна, кинематический анализ которого рассмотрен в работе [3] в настоящем

сборнике. В работе [3] приведена расчетная схема механизма и аналитические зависимости, достаточные для последующего синтеза механизма.

При синтезе механизма оперируют тремя объектами анализа: параметры синтеза, условия синтеза и целевая функция.

Варьируемые параметры:

Параметры механизма x_i ($i = 1 \dots 8$) суть геометрические размеры звеньев R, b, c, f, L_s , угол φ_0 между рычагами AB и AC , а также размеры, определяющие взаимное положение опор X_0 и Y_0 . Любые из указанных параметров могут назначаться проектировщиком исходя из условий компоновки, условий необходимой прочности или жесткости и тогда они представляют собой т. н. *назначаемые параметры*. Если условия синтеза, имеющие форму уравнений, позволяют вычислить одни параметры через другие, такие параметры являются *вычисляемыми*. Все остальные параметры могут принимать любые значения в области допустимых решений, являются *свободными* (варьируемыми) и подлежат определению в результате синтеза. Ниже показано, что условие рационального расположения звеньев механизма в крайнем нижнем положении дает возможность определения угла φ_0 через другие параметры. Тогда параметр φ_0 становится вычисляемым и может быть исключен из анализа, если удовлетворяется указанное условие расположения звеньев. Угол α поворота главного вала является независимой переменной, определяющей текущее положение звеньев механизма, и к параметрам механизма не относится.

Условия синтеза:

Задача параметрического синтеза механизма состоит в определении его геометрических параметров, обеспечивающих требуемый закон движения ползуна (изменения функции положения) и удовлетворяющих ряд условий. Условия синтеза делятся на желательные, обязательные и главные. Одно из главных условий, является целевой функцией оптимизационной задачи.

Желательными условиями синтеза обычно являются ограничения, накладываемые на варьируемые параметры по конструктивным условиям, а также ограничения углов давления являются. Все варьируемые параметры механизма могут принимать значения из указанного диапазона

$$G_1 = \{x_{in} \leq x_i \leq x_{iv}\}, (i = 1 \dots 8) \quad (1)$$

где x_i – начальное приближение i -го параметра;

x_{in}, x_{iv} – соответственно нижнее и верхнее допустимое значение i -го параметра, установленные по конструктивным условиям.

Выражение (1) является первым желательным условием синтеза.

В общем случае любое граничное значение параметра (x_{in} или x_{iv}) может отсутствовать, т. е. любой параметр может быть неограничен снизу или сверху. В данной задаче все параметры, кроме Y_0 удовлетворяют условию $x_{in} \geq 0$.

Значения некоторых параметров могут задаваться конструктором исходя из условий конструирования других узлов и деталей пресса, например, размещения зубчатых передач, ограничения вертикальных и горизонтальных размеров привода, станины или ползуна. Значения остальных параметров в общем случае являются свободными, однако должны удовлетворять всем другим условиям синтеза, т. е. должны находиться в области допустимых решений Θ .

Желательным условием синтеза является условие обеспечения допустимых углов передачи в кинематических парах C и D . Угол передачи γ_C в шарнире C должен удовлетворять следующему неравенству

$$\gamma_0 \leq \gamma_{C(D)} \leq \pi - \gamma_0 \quad (2)$$

при всех $\alpha \in [0, 2\pi]$.

Здесь γ_0 – допустимый угол передачи. При холостом ходе величина γ_0 принимается больше 45° , а при рабочем – больше 75° [7].

Область Ω параметров механизма, в пределах которой механизм существует в заданной сборке, а углы передачи удовлетворяют ограничению (2), определяется следующими неравенствами

$$G_2 = \left\{ \begin{array}{l} (L_0 - R_v)^2 \geq b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos \gamma_0, \\ (L_0 + R_v)^2 \geq b^2 + c^2 + 2bc \cdot \cos \gamma_0, \\ x_{c0} \leq L_s \cos \gamma_0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь x_{c0} – координата шарнира C в системе координат XO_1Y [5].

Предварительные расчеты механизма показывают, что условия (3) выполняются практически на всем интервале $\alpha \in [0, 2\pi]$. Угол передачи γ_D в шарнире D всегда больше 50° . Только при приближении ползуна к крайнему верхнему положению величина угла передачи γ_C достигает значения $55 \dots 65^\circ$.

Обязательным условием синтеза являются условие существования механизма. Условие существования первого механизма как четырехзвенника кривошипного типа состоит в удовлетворении неравенств

$$G_3 = \left\{ \begin{array}{l} L_0 + R_v < b + c, \\ L_0 - R_v > |b - c|, \end{array} \right. \quad (4)$$

где L_0 – расстояние между центрами опор, определяемое размерами X_0 и Y_0

$$L_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}.$$

Главное условие синтеза рассматриваемого механизма состоит в том, что он должен с заданной точностью воспроизводить заданное движение рабочего органа. В данном случае это условие состоит в том, чтобы удовлетворялись, по меньшей мере, три требования в отношении скорости ползуна.

Первое требование заключается в том, что на участке рабочего хода скорость ползуна не должна превышать некоторое допустимое значение $[V]$, зависящее от механических свойств обрабатываемого металла, формы и размеров изделия и типа прессы. Для специализированных прессов для глубокой вытяжки величина скорости $[V]$ ограничивается значениями 250–400 мм/с [111]. Действительная скорость V_g ползуна и первая передаточная функция AV механизма связаны отношением $V_g = \omega \cdot AV$, где ω – угловая скорость ведущего кривошипа O_1A . Сопоставление вариантов синтеза производится при условии постоянства скорости ω и тогда должно ограничиваться значение передаточной функции AV . Из кинематического анализа механизма следует, что на участке рабочего хода максимальное значение передаточной функции AV_{\max} составляет

$$AV_{\max} = K_{v\max} \cdot S_{\max}, \quad (5)$$

где $K_{v\max}$ – коэффициент максимальной скорости $K_{v\max} = 0,22 \dots 0,3$;

S_{\max} – максимальное перемещение вытяжного ползуна.

Тогда первое требование представляет собой обязательное условие синтеза в виде неравенства

$$G_4 = \{ AV \leq [AV] = K_{v\max} S_{\max} \}. \quad (6)$$

Второе требование состоит в том, что для увеличения стойкости инструмента, повышения пластичности металла и снижения вероятности его разрывов скорость начала рабочего хода V_{np} должна быть, по возможности, меньше максимальной скорости AV_{\max} , а затем после начала процесса деформации она может возрасти до величины $[V]$. В работе

[6] рекомендуется величину скорости $V_{нр}$ принимать $(0,4-0,6)[V]$. Однако предварительные теоретические расчеты показывают, что ни при каких комбинациях параметров проектируемого механизма не может обеспечиваться выполнение такого условия, при одновременном выполнении условия (1). При удовлетворении всех других условий синтеза значение скорости $V_{нр}$ не может быть меньше $0,7 \dots 0,9$ максимальной скорости V_{max} . Тогда третье обязательное условие синтеза представляется в виде неравенства

$$G_5 = \{AV_{нр} \leq K_{внр}AV_{max}\}, \quad (7)$$

где $K_{внр}$ – коэффициент снижения начальной скорости вытяжки, $K_{внр} = 0,7 \dots 1$.

Обязательным условием синтеза является обеспечение заданного максимального перемещения S_{max} вытяжного ползуна

$$G_6 = \{S_6(\alpha_{max}) = S_{max}\}. \quad (8)$$

Угол α_{max} , соответствующий максимальному перемещению ползуна, т. е. его крайнему верхнему положению, определяется как угол, соответствующий максимуму функции положения $S_6(\alpha)$.

Целевая функция:

Третье главное требование синтеза состоит в том, что на участке рабочего хода, или на большей его части, желательно обеспечить постоянную скорость ползуна. При заданном интервале рабочего хода $\alpha_p \geq 50^\circ$ достичь абсолютного постоянства скорости невозможно, поэтому речь идет о допустимом отклонении скорости V_6 от некоторого постоянного значения, например скорости V_{max} на участке рабочего хода, определяемого углами начала $\alpha_{нр}$ и конца $\alpha_{кр}$ процесса штамповки. Определение условия синтеза в форме среднего арифметического или среднеквадратического отклонения скорости V_6 от величины V_{max} являются недопустимыми, т. к. в этом случае нарушается условие (6). В наилучшей степени отклонение скорости от постоянного значения характеризуется отношением

$$K_{vz} = \frac{I_{vz}}{S_{vz}}, \quad (9)$$

где I_{vz} – площадь, ограниченная графиком первой передаточной функции и осью абсцисс;

S_{vz} – площадь прямоугольника $abcd$ (рис. 1).

Отношение (9) назовем *коэффициентом заполнения* графика скорости на участке рабочего хода. Очевидно, что при $K_{vz} \rightarrow 1$ скорость ползуна V_6 , а значит и передаточная функция AV , стремятся к постоянному значению. Из условия (7), а также из того, что при приближении к концу рабочего хода происходит постепенное снижение величины AV , следует, что $K_{vz} \leq 1$ при любых параметрах механизма. В задачах оптимизации обычно определяют минимум целевой функции, поэтому третье условие синтеза записывается в следующем виде

$$F_z = 1 - K_{vz} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Учитывая степень важности, последнее условие (10) принимается как целевая функция синтеза, а три других условия (6), (7) и (8) относятся к обязательным условиям.

Прямоугольник $abcd$ соответствует предельному характеру изменения скорости ползуна на рабочем участке. Ширина прямоугольника определяется длительностью участка рабочего хода $(\alpha_{нр} - \alpha_{кр})$, а его высота равна допустимому значению первой передаточной функции $[AV]$ по условию (6). Тогда величина S_{vz} будет равна

$$S_{vz} = [AV] \cdot (\alpha_{нр} - \alpha_{кр}).$$

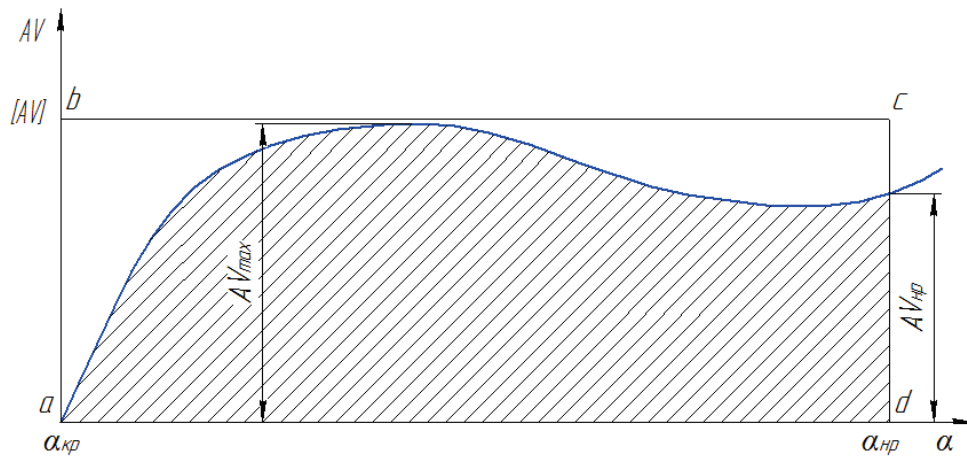


Рис. 2 – Определение целевой функции

Угол окончания процесса деформации $\alpha_{кр}$ соответствует крайнему нижнему положению вытяжного ползуна. При оптимальном варианте параметров механизма это соответствует положению, когда кривошип O_1A , звено AC и шатун CD располагаются на одной линии. Такое положение звеньев обусловлено стремлением уменьшить нагрузку на механизм, уменьшить крутящий момент на главном валу и потери энергии на трение. В таком случае угол φ_0 определяется из условия

$$\phi_{f_0} = \frac{3\pi}{2} \phi_b(\alpha_0) - \phi_0, \quad (11)$$

где $\phi_b(\alpha_0)$ – угол наклона звена AB относительно оси O_1X_1 при нижнем положении кривошипа, т. е. при $\alpha = \alpha_0 = \frac{3\pi}{2} - \phi_0$;

ϕ_0 – угол наклона линии центров опор ($\phi_0 < 0$).

Тогда угол $\alpha_{кр}$ определяется, как $\alpha_{кр} = \alpha_0 - 2\pi$ и при оптимальных значениях параметров практически соответствует крайнему нижнему положению ползуна.

Выражение (11) является условием синтеза, которое дает возможность вычислить параметр φ_0 через другие параметры механизма, т. е. переводит параметр φ_0 в ранг вычисляемых параметров. Таким образом, число свободных параметров q_i сокращается до 7.

Начало процесса деформации определяется значением перемещения S_p ползуна на участке рабочего хода. При заданном значении S_p угол $\alpha_{нр}$ начала процесса деформации определяется как решение алгебраического уравнения

$$S_e(\alpha) - S_p = 0. \quad (12)$$

Наибольшая величина рабочего хода S_p вытяжного ползуна специализированных вытяжных прессов двойного действия составляет

$$S_p = K_{sp} \cdot S_{\max},$$

где K_{sp} – коэффициент величины рабочего хода $K_{sp} = 0,22 \dots 0,25$.

При известном значении угла $\alpha_{нр}$ из уравнения (12) значение передаточной функции $AV_{нр}$ в начале рабочего хода определяется как $AV(\alpha_{нр})$.

Площадь I_{vz} , ограниченная графиком первой передаточной функции и осью абсцисс при известном диапазоне угла поворота главного вала на участке рабочего хода $\alpha \in [\alpha_{нр}, \alpha_{кр}]$ находится как интеграл функции перемещения

$$I_{vz} = \int_{\alpha_{ни}}^{\alpha_{ки}} S_e(\alpha) \cdot d\alpha.$$

Пределы интегрирования соответственно равны: $\alpha_{ni} = \alpha_{кр}$, $\alpha_{ki} = \alpha_{нр}$.

Таким образом, задача оптимизационного параметрического синтеза состоит в минимизации функции цели (10) при одновременном выполнении условий (1), (3), (4), (6)–(8) и представляет собой задачу нелинейной однокритериальной многопараметрической условной оптимизации, решение которой возможно специальными методами, например методом деформируемого многогранника (комплексный метод Бокса), методом сопряженных градиентов [4–6].

Выводы. Представленный метод параметрического синтеза дает возможность определения оптимальных значений параметров механизма, обеспечивающих минимальное отклонение скорости ползуна на участке рабочего хода от заданного значения.

Задача условной оптимизации всегда сходится к конечному результату, если удовлетворяются все, в том числе и желательные условия синтеза.

Метод оптимизационного синтеза дает возможность определения параметров механизма при различных вариациях начальных параметров и условий синтеза.

Представленный алгоритм и разработанное программное обеспечение задачи оптимизационного синтеза являются инвариантными по отношению к заданным условиям синтеза. Имеются возможности синтеза механизмов при вариации любых параметров механизма и условий синтеза, удовлетворяющих всем другим условиям.

Литература

1. Балаганский В.И. Об оптимальном проектировании исполнительных механизмов прессов двойного действия / В.И. Балаганский, А.Д. Галахов, Б.Н. Юрухин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979, – № 7. – С. 10–12.

2. Балаганский И.Г. Оптимальное проектирование исполнительного механизма вытяжного листоштамповочного прессы из условия выравнивания скорости рабочего движения ползуна / И.Г. Балаганский, Б.Н. Юрухин, В.И. Балаганский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976, – № 6. – С. 31–34.

3. Явтушенко А.В. Аналитическая кинематика шестизвенного механизма вытяжного прессы / А.В. Явтушенко, А.В. Явтушенко, Т.А. Васильченко // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво / – Вип. 2 (39). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. С. 88–94.

4. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высш. шк., 2002. – 544 с.

5. Исследование операций / В 2-х томах. Пер. с англ. / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. Т. 1. – 712 с.

6. Fletcher R. Function Minimization by Conjugate Gradients / R. Fletcher, C.M. Reeves // Computer J., –7, –1964. –P. 149–154.

© А.В. Явтушенко

УДК 35.073: 621.01: 621.73

А.В. Явтушенко, к. т. н., доцент

Запорізький національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ВИКОНАВЧОГО МЕХАНІЗМУ ВИТЯЖНОГО ПРЕСА

Розглянуто питання кінематичного аналізу шестизвенного важільного механізму спеціалізованих пресів для глибокої витяжки. Механізм повністю відпо-відповідає вимогам технологічного процесу відносно швидкості повзуна в період робочого ходу. Порівняно з кривошипно-ползунним механізмом максимальна швидкість повзуна під час деформації зменшується більш ніж у два рази і на 2/3 ділянки робочого ходу залишається практично постійною.

Ключові слова: прес, виконавчий механізм, аналіз, параметр, функція пропозиції, передатна функція, кут тиску.

UDK 35.073: 621.01: 621.73

*Javtushenko A, PhD, Associate Professor
Zaporizhzhya national technical University*

OPTIMIZATION OF PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE ACTUATOR EXHAUST PRESS

Considered the issues of the kinematic analysis of the six-bar linkage fur-mechanism specialized presses for deep drawing. The mechanism fully complies corresponds to the requirements of the process in terms of speed of the RAM during the working stroke. In comparison with the crank-slider mechanism maximum speed of the RAM during deformation is reduced by more than half and 2/3 of the area of the stroke remains almost constant.

Keywords: *press, actuator, analysis, parameter, function, application, transfer function, the pressure angle.*

ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ МАЛОВУГЛЕЦЕВИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ З ОКИСЛЮВАЛЬНИМ ПОКРИТТЯМ

Розроблені електроди для холодного зварювання чавуну на дроті Св-08А з окисним покриттям, що містять окислювачі, шлакоутворювальні й стабілізуючі елементи мармур, гематит, кварцовий пісок, оксид хрому, алюмінієвий порошок, слюду й соду.

Ключові слова: чавун, електрод, графіт, зварювання, сталь, струм

Вступ. У чавунних виливках на різних стадіях обробки виявляються різні дефекти. Крім того, знижена міцність і висока крихкість сірих чавунів приводять в окремих випадках до поломки в процесі експлуатації виготовлених з них деталей, а це у свою чергу приводить до виходу з ладу або простою устаткування [1].

Для усунення дефектів у чавунних виливках і при ремонті деталей, що вийшли з ладу, широко застосовують зварювальні процеси.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Заслужують на увагу роботи, проведені П.С. Елістратовим, по розробці електродів типу СЧС на дроті Св-08 з покриттям окисного виду. В умовах високотемпературної фази зварювальної дуги вуглець є самим активним розкислювачем. Окислений вуглець у вигляді газу СО видаляється зі зварювальної ванни. Велика товщина покриття й високі значення зварювального струму, застосовуваного при зварюванні електродами СЧС, не дозволили встановити оптимальні межі технологічності електродів [1].

Постановка завдання. Метою даної роботи є створення електродів для холодного зварювання чавуну на стрижнях із дроту Св-08А і покриттям, що містить кисневмісний компонент – гематит, що відрізняються від електродів марки СЧС поліпшеними зварювально-технологічними властивостями й високою якістю наплавленого металу за рахунок зміни шлакової й легуючої системи покриття.

Застосовували покриття електродів кислого виду. У якості розкислювача металу шва застосовували алюмінієвий порошок марки ПАП-1 по ГОСТ 4135. У якості окисного компонента застосовували гематит (Fe_2O_3) по ГОСТ 4418.

Коефіцієнт ваги покриття електродів становив 0,45...0,47 при товщині покриття на сторону 0,8 мм електродів діаметром 3 мм, і 1 мм - електродів діаметром 4 мм. Виготовляли 5 варіантів електродів. Для порівняння виготовляли електроди СЧС.

Зварювання й наплавлення зразків для випробування твердості й хімічного складу металу шва й наплавленого металу, а також зварювально-технологічних властивостей електродів, відповідно до вимог ГОСТ 9466, робили як на змінному, так і постійному струмі прямій і зворотної полярності.

Для виготовлення зварних зразків використовували пластини із чавуну марки СЧ 21 по ГОСТ 1412 товщиною 30 мм. Підготовка крайок під зварювання стикових з'єднань відповідала ГОСТ 9466. Твердість металу шва й наплавленого металу вимірювали на приладі ТК-2 (по шкалі С), мікротвердість заміряли на приладі ПМТ-3, при навантаженні 100 г. Проби для хімічного аналізу наплавленого металу відбирали із трьох верхніх шарів вісьмишарового наплавлення відповідно до ГОСТ 7122.

Загальний характер мікроструктури зварних швів оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-8М на поперечних мікрошліфах розміром 15x25x30 мм, протравлених в 5 %-ному спиртовому розчині азотної кислоти.

Основним завданням при розробці електродів УПА-Ч з'явилося максимальне видалення вуглецю з металу шва за рахунок його окиснення киснем газової й шлакової фази дуги.

Для дослідження ступеня вигорання вуглецю з металу шва було зроблено багатошарове наплавлення висотою 20 мм досліджуваними електродами на механічно оброблену поверхню пластини із сірого чавуну марки СЧ 21 і зроблений хімічний аналіз металу шва по глибині із кроком 1 мм від верху наплавленого металу до основного металу.

Основний матеріал і результати. Отримані результати показують, що в металі, наплавленому розробленими електродами зі збільшенням відстані від основного металу, вміст вуглецю в металі шва різко зменшується й досягає мінімально необхідних значень на висоті 6-7 мм.

Це відповідає другому проходу при зварюванні електродами діаметром 4 мм. При цьому також спостерігається зниження вмісту легуючих елементів Si, Mn, а також шкідливих домішок P і S.

При зварюванні електродами марки СЧС зниження вмісту вуглецю в металі шва менш інтенсивне й рівень вуглецю нижче 0,12 % досягається на висоті більше 10 мм, що відповідає третьому проходу. Аналогічне зниження й інших елементів.

Отримані результати підтверджують припущення про більш повне обезвуглецювання металу шва складом покриття електродів УПА-Ч, що дає можливість проведення подальших досліджень.

Графічно результати проведених досліджень представлені на рис.1.

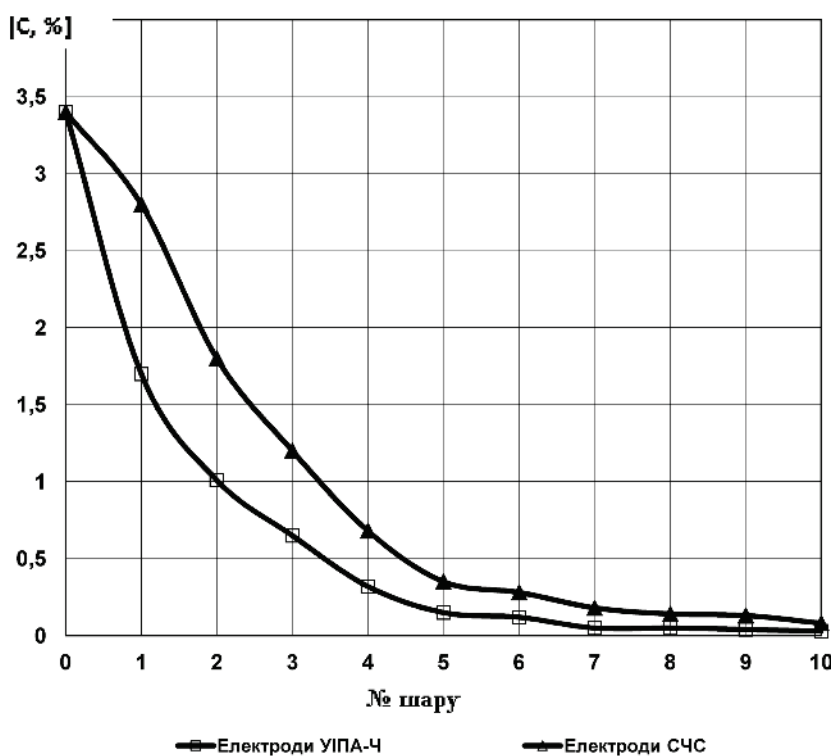


Рис. 1. Залежність вмісту вуглецю в металі від висоти шва

З метою дослідження впливу вмісту вуглецю в наплавленому металі на твердість досліджували залежність твердості наплавленого металу від висоти шва. Виміри робили на шліфах тришарового наплавлення в семи крапках із кроком в 1 мм.

Результати вимірів твердості наведені в табл.1.

Таблиця 1 Твердість наплавленого металу, HRC

Варіант електрода	Номери крапок (знизу нагору через 1 мм)						
	1	2	3	4	5	6	7
СЧС	18	55	48	46	42	35	20
УПА-Ч	18	43	38	30	20	17	16

Як видно з табл. 1 твердість наплавленого металу зменшується по висоті шва. Максимальна твердість металу шва в зоні сплавлення (крапка № 2).

У електродів УПА-Ч твердість металу в зоні сплавлення значно нижче, чим у електродів СЧС, що дозволяє механічно обробляти зварні шви.

Вивчення макроструктури зварних зразків при наплавленні від 1 до 5 шарів показало, що лінія сплавлення чавун-сталь плавна без явних дефектів і несущільностей. Наплавлений метал у всіх зразках щільний, без тріщин і зашлаковок. Вигляд деталі до і після зварювання показано на рис.2.



Рис. 2 Вигляд деталі до і після зварювання

На нетравленому шліфі (рис. 3а) видний плавний перехід від основного металу (сірий чавун СЧ 21) до наплавлення. Кількість структурно вільного графіту поступово зменшується в міру видалення від основного металу в повній відповідності зі ступенем обезвуглецювання чавуну киснем покриття.

Ширина зони термічного впливу, виявлена після металографічного травлення (рис. 3б), становить 0,3-0,35 мм.

Структура основного металу – пластинчастий графіт, матриця – сорбітообразний і тонкопластинчастий перліт з незначною кількістю феррита.

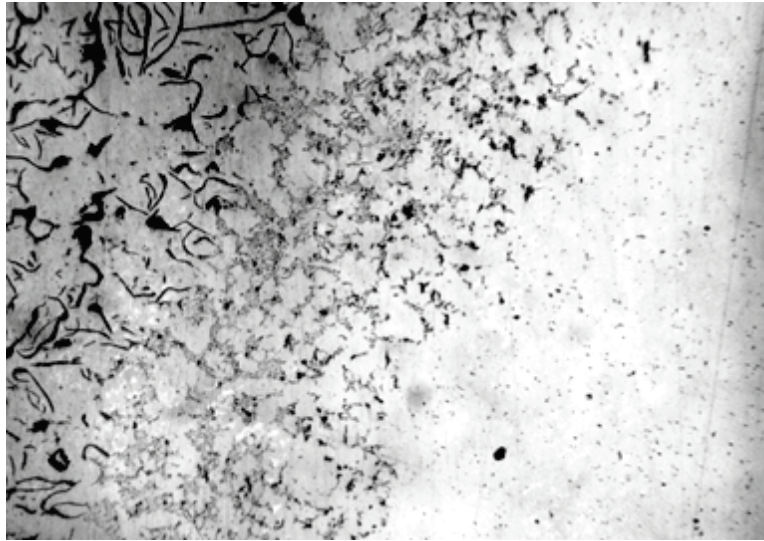
У зоні термічного впливу – троосто сорбіт і графіть отжига, $H_{\mu} = 297-420$ (HRC = 29-43). Спостерігаються також голки цементиту й ледебуриту (твердість голок $H_{\mu} = 742$, HRC = 61). Ширина ділянки з наявністю голчастої структури 0,1-0,2 мм.

Структура наплавленого металу в області, що безпосередньо прилягає до основного, являє собою крупні зерна троосто-сорбіту твердістю $H_{\mu} = 420$ (HRC = 43). Потім троосто-сорбіт $H_{\mu} = 322-420$ (HRC = 32-43) зі світлими ділянками троосто-мартенситу $H_{\mu} = 464$ (HRC = 46).

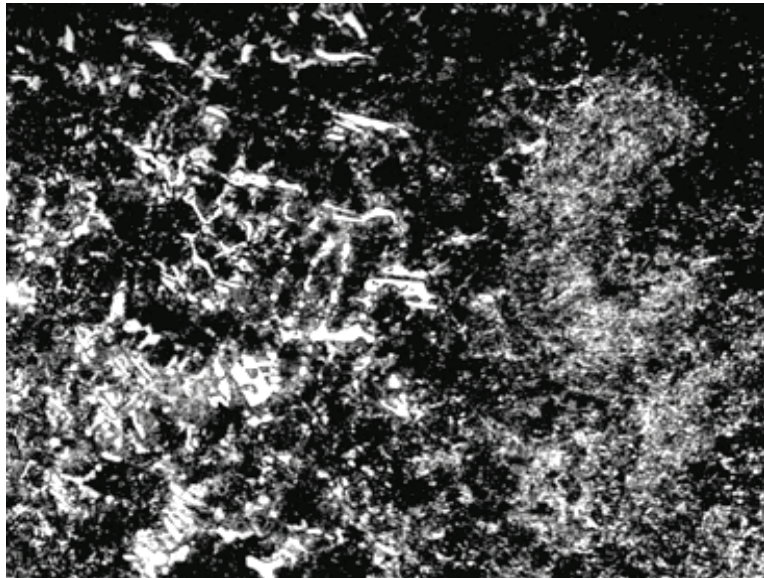
У міру видалення – троосто-сорбіт і дрібні включення феррита $H_{\mu} = 254-350$ (HRC = 23-35).

Поблизу поверхні – структура типова для литої маловуглецевої сталі ($H_{\mu} = 170-254$).

Результати хімічного аналізу тришарових наплавлень чавунних пластин СЧ 21, виконаних електродами УПА-Ч діаметром 4 мм на струмах 140, 160 і 180 А на зворотній полярності представлені рис. 4, 5.



а



б

Рис.3. Структура зони сплавлення чавуну зі сталевим швом

а-зона сплавлення чавун-сталь, х 100, нетравлено

б-мікроструктура зони сплавлення чавун-сталь, х 450

Як видно з результатів досліджень зі збільшенням сили струму при зварюванні на прямій і зворотній полярності ступінь науглецювання металу шва збільшується, що пояснюється збільшенням проплавлення основного металу – чавуну. Залежно від кількості швів вміст вуглецю у шві зменшується, що пояснюється розбавленням металу попередніх швів наплавленим електродним металом. Аналогічні залежності спостерігаються для Mn і Si.

Висновки. Розроблені електроди для холодного зварювання чавуну на дроті Св-08А с окисним покриттям. Якість наплавленого металу висока, без пор і тріщин. Лінія сплавлення сталь-чавун плавна, з поступовою зміною вмісту вуглецю.

Твердість наплавленого металу змінюється по висоті наплавленого металу від HB = 200 у верхніх шарах до HRC = 43 – поблизу зони сплавлення. У зоні термовпливу відзначається підвищення твердості до HRC = 61. Ширина зони цементиту-ледебуриту рівна 0,1-0,2 мм.

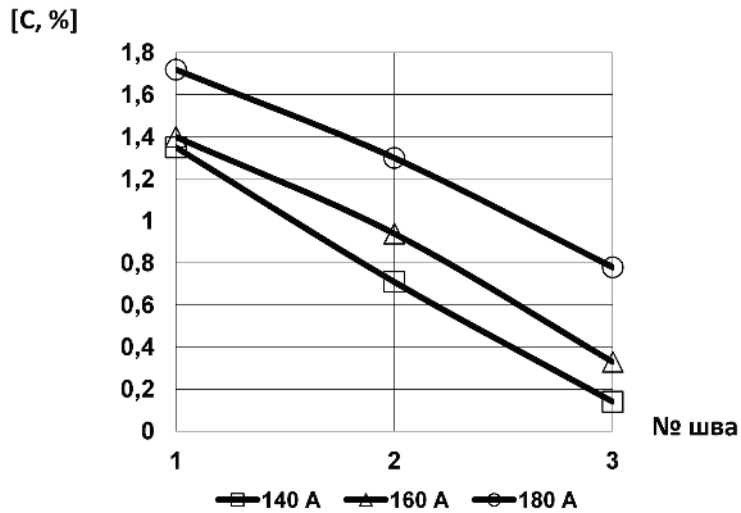


Рис. 4 Залежність вмісту вуглецю в металі швів від сили струму при зварюванні на зворотній полярності

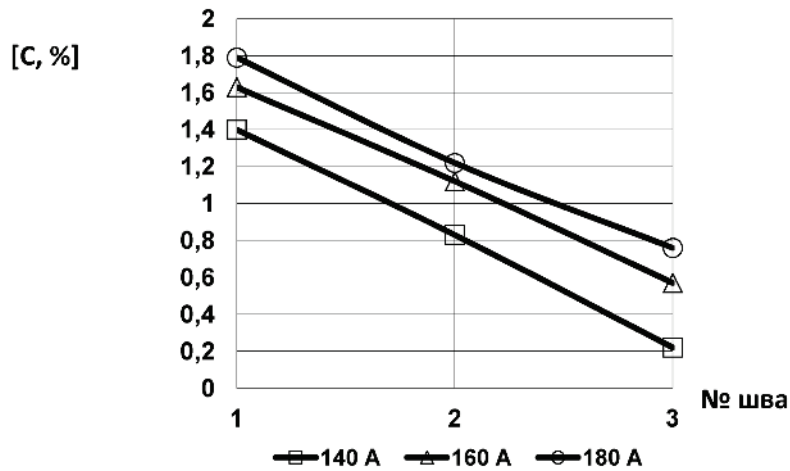


Рис.5 Залежність вмісту вуглецю в металі швів від сили струму при зварюванні на прямій полярності

Література

1. Иванов Б.Г., Журавицкий Ю.И., Левченков В.И. Сварка и резка чугуна. [Текст] – М: Машиностроение, 1977. - 208 с.
2. Левченков В.И. Состояние и перспективы развития сварки чугуна (обзор). [Текст] // Сварочное производство. - 1988. - №2. – С. 2-4.
3. А.С. 1031702 СССР, МПК В 23 К 35/365. Состав электродного покрытия [Текст] / Н.А. Калинин, В.П. С.В. Кафтанов, К.К. Евдокимов и др., - Опубл. 30. 07. 83; Бюл. № 28.

© М.А. Калін, К.О. Ізотова

СВАРКА ЧУГУНА МАЛОУГЛЕРОДИСТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ С ОКИСЛИТЕЛЬНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Разработаны электроды для холодной сварки чугуна на проволоке Св-08А с окислительным покрытием, которое содержит окислители, шлакообразующие и стабилизирующие элементы мрамор, гематит, кварцевый песок, оксид хрома, алюминиевый порошок, слюду и соду.

Ключевые слова: *чугун, электрод, графит, сварка, сталь, ток*

WELDING OF CAST-IRON LOW-CARBON ELECTRODES WITH OXIDIZING COVERAGE

Electrodes are worked out for the cold welding of cast-iron on the wire of Св-08А with oxidizing coverage which contains oxidants, slag-forming and antihunt elements marble, anhydroferrite, quartz sand, oxide of chrome, aluminium powder, mica and soda.

Keywords: *cast-iron, electrode, graphite, welding, steel, current*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНОГО ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ТА ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ З РОЗДАЧЕЮ ЗАГОТОВОК ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА ВАЛІВ

Методом скінченних елементів визначені силові режими, напружено-деформований стан заготовки та кінцева форма виробу. Запропонована технологія та спроектовано штампове оснащення для отримання зубчастих коліс холодним видавлюванням з роздачею

Ключеві слова: холодне видавлювання з роздачею, зубчасте колесо, профіль, напружено-деформований стан, силові режими, технологія виготовлення, штампове оснащення.

Сучасне виробництво зубчастих коліс та валів потребує впровадження нових ресурсозберігаючих технологічних процесів, які б дозволили суттєво зменшити витрати на отримання та підвищити точність форми і розмірів вказаних деталей. В підсумку це приведе до зниження собівартість виробів та зробить продукцію конкурентноспроможною. Одним з способів високопродуктивного виготовлення високоточних деталей є холодне видавлювання, при якому кругла заготовка з діаметром більшим за зовнішній діаметр колеса або вала деформується в матриці відповідного профілю. Спосіб дозволяє отримувати заготовки зубчастих коліс та валів [1]. Однак наявність значних питомих зусиль при холодному формоутворенні в такій матриці приводить до низької її стійкості. Тому холодне видавлювання при такому підході малоефективне і до теперішнього часу не знайшло широкого розповсюдження. Спосіб холодного видавлювання з роздачею різноманітних профілів, коли діаметр вихідної заготовки менший за максимальний розмір

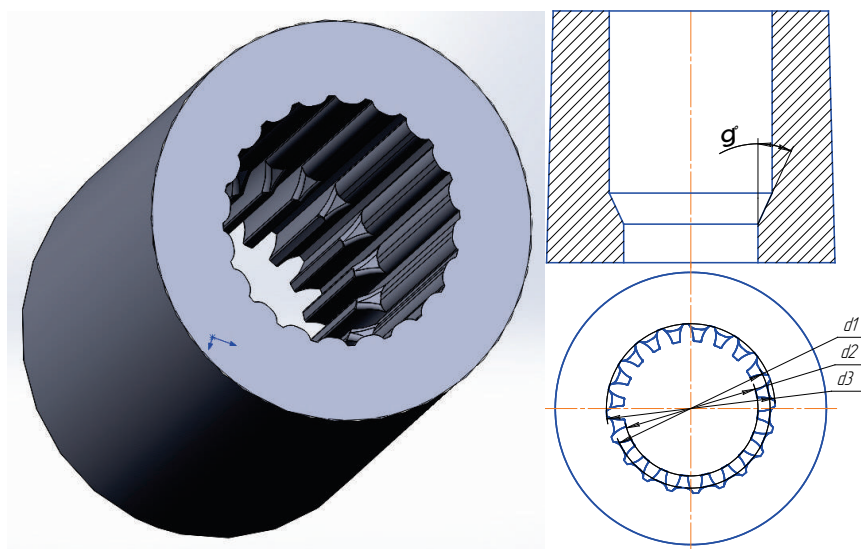


Рис.1. Матриця для видавлювання з роздачею

профілю, дозволяє суттєво зменшити зусилля та питомі зусилля видавлювання, підвищити стійкість інструменту та отримати готовий виріб з необхідними фізико-механічними властивостями [2,3]. Тому можна використати такий спосіб для холодного видавлювання заготовок зубчастих коліс та валів. Для цього була розроблена конструкція матриці, яка зображена на рис. 1. Вихідна заготовка встановлюється по діаметру d_1 на виступи, діаметр d_2 яких виконаний по розміру діаметру впадин майбутніх коліс або валів. Виступи розташовані під кутом γ . В матриці розмір d_3 відповідає діаметру виступів. При деформуванні по конічних виступах проходить формоутворення зубчастого колеса чи вала, при цьому діаметр виступів d_3 більший за зовнішній діаметр d_1 вихідної заготовки.

люється по діаметру d_1 на виступи, діаметр d_2 яких виконаний по розміру діаметру впадин майбутніх коліс або валів. Виступи розташовані під кутом γ . В матриці розмір d_3 відповідає діаметру виступів. При деформуванні по конічних виступах проходить формоутворення зубчастого колеса чи вала, при цьому діаметр виступів d_3 більший за зовнішній діаметр d_1 вихідної заготовки.

Метою роботи є визначення з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) раціональної формозміни металу та встановлення силових режимів, напружено-деформованого стану заготовок в процесах прямого традиційного видавлювання та видавлювання з роздачею зубчастого профілю.

Чисельні експерименти проводилися з використанням скінченно-елементної програми DEFORM3D. Об'ємний напружено-деформований стан заготовки визначався в пластичній постановці з урахування комплексного впливу конструктивних, технологічних та фізико-механічних факторів на формозміну металу.

Для отримання профілю колеса видавлюванням з роздачею, на відміну від традиційного видавлювання, була використана заготовка, діаметр якої менше за зовнішній діаметр колеса. Для видавлювання з роздачею проведено вивчення впливу діаметра вихідної заготовки та кута конусу матриці на формозміну металу, силові режими, питомі зусилля та напружено-деформований стан заготовок.

Розміри зубчастого колеса, які треба отримати видавлюванням: модуль $m=3$, число зубів $z=20$; діаметр колеса $d=66$ міліметрів (мм); ділильний діаметр $d_d=60$ мм; діаметр впадин $d_v=52,5$ мм; висота колеса $h=12$ мм.



Рис. 2. Заповнення зубчастого профілю при видавлюванні з різними кутами конусу матриці

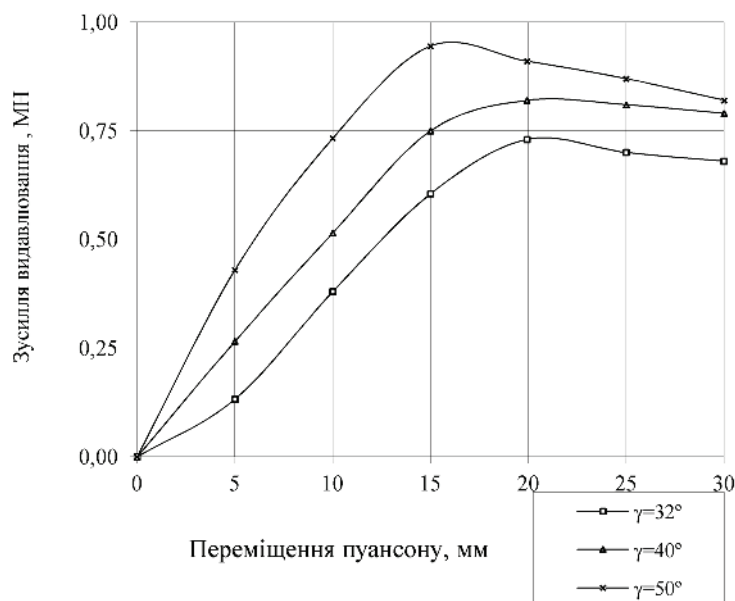


Рис. 3. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

Діаметр вихідної заготовки із сталі 45 $d_1=62$ мм, висота заготовки $h_3=30$ мм. Процес видавлювання здійснювався по схемі «заготовка за заготовкою». Коефіцієнт тертя на кон-

такуючих поверхнях приймали $\mu=0.08$. Чисельне моделювання проводили для таких кутів конусу матриці $\gamma=32^\circ, 40^\circ$ та 50° .

Геометрична форма отриманого профілю показана на рис. 2. Аналіз формозміни показує, що повне заповнення зубчастого профілю спостерігається при великих кутах конусу матриці. При найменшому куті метал більш інтенсивно витікає в осьовому напрямку. Залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансону при деформуванні в матриці з різними кутами конусу показані на рис. 3.

Найбільшу величину зусилля (945 кН) отримано для видавлювання з роздачею через матрицю з кутом конусу $\gamma=50^\circ$.

Зміцнення матеріалу zdeформованого металу можна оцінити по розподілу інтенсивності напружень σ_i , що виникає в осередку деформації до моменту виходу заготовки з калібруючого пояса (рис. 4).

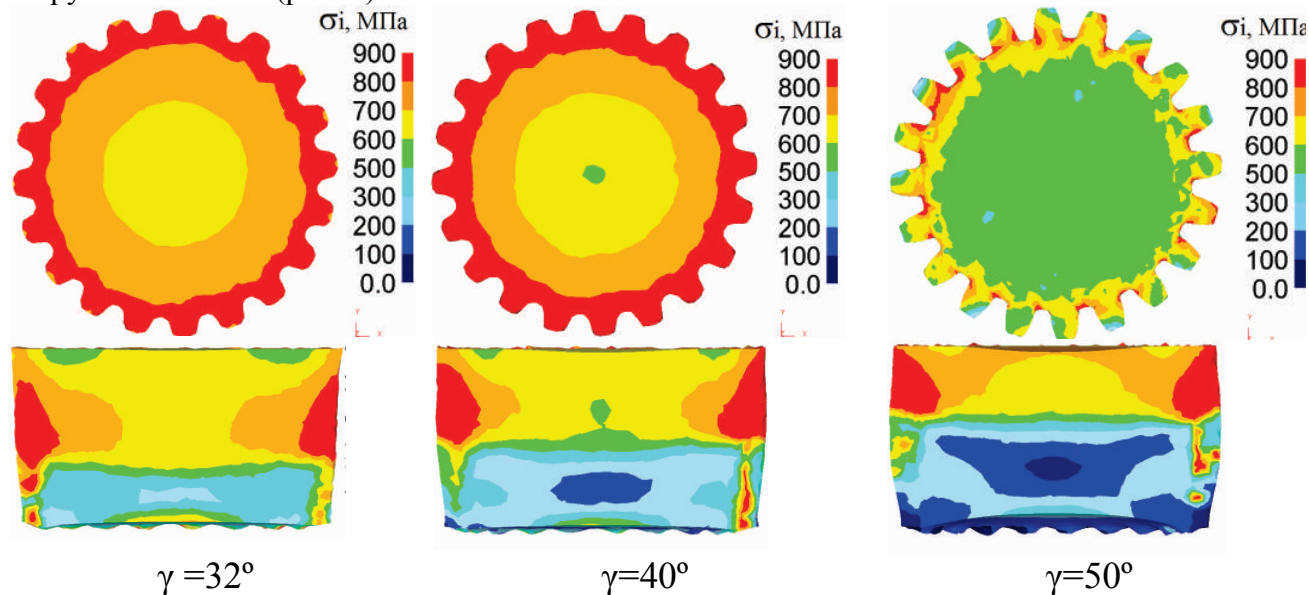


Рис. 4. Розподіл інтенсивності напружень в осередку деформації при видавлюванні зубчастих коліс з роздачею

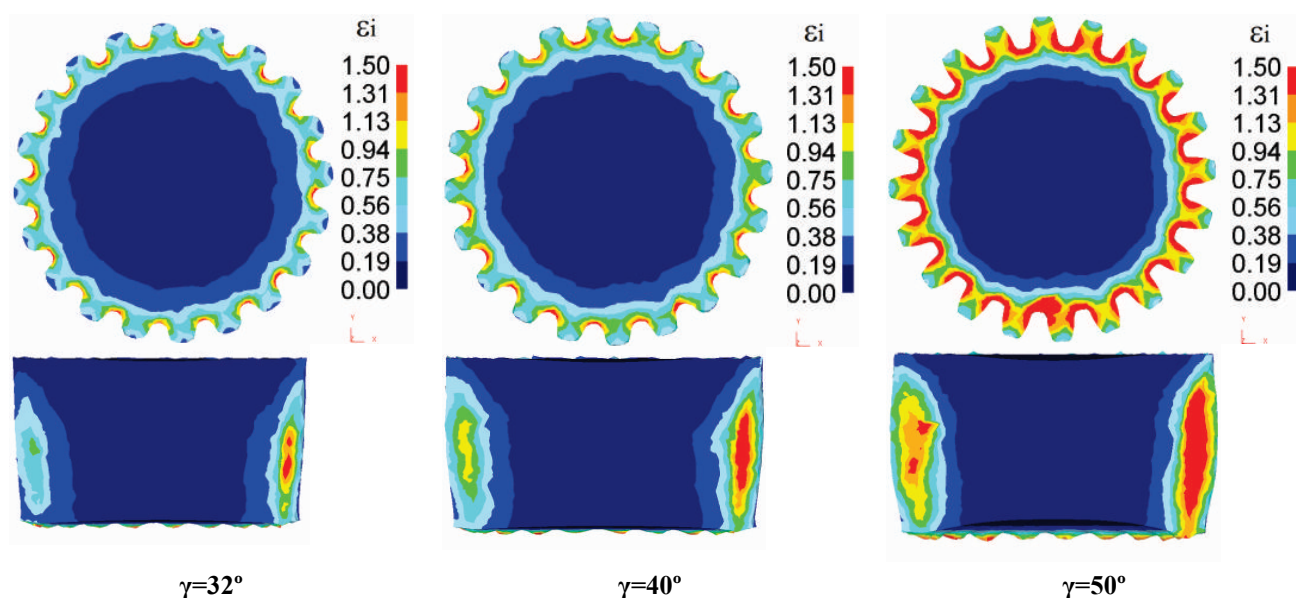


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформацій в осередку деформації при видавлюванні при видавлюванні зубчастих коліс з роздачею.

Розподіл показано в поперечному перетині та повздовжньому. Збільшення кута конуса матриці призводить до зменшення осередку деформації та більш інтенсивному зміц-

ненню саме зубців колеса. Середина профілю отримує незначне зміцнення, що дозволить провести подальшу пластичну обробку для отримання отвору.

Розподіл інтенсивності деформацій в осередку деформації при видавлюванні з роздачею представлено на рис. 5. Розподіл представлено в двох перетинах: поперечному та повздовжньому. Збільшення кута конуса матриці призводить до збільшення деформації в радіальному напрямку, що призводить до повного заповнення зубчастого профілю.

Враховуючи отримані результати, для отримання зубчастого колеса холодним видавлюванням з роздачею через конічну матрицю з кутом конуса 40° було спроектоване технологічне оснащення. Загальний вигляд штамп показаний на рис. 6. Штамп складається з верхньої та нижньої частин. Верхня плита штамп 9 кріпиться до повзуна 7 пресу за допомогою болтів 19. До верхньої плити прикручується болтами 17 обойма 10, в якій встановлений вузол кріплення пуансона 3, що має опорну конічну поверхню. Пуансон 3 спирається на підкладну плиту 12 з сферичною поверхнею, яка в свою чергу спирається на сферичну опору 11. За допомогою гайки 14 і кільця 13 здійснюється кріплення пуансона 3. На нижній плиті 5, яка кріпиться до столу пресу 8 за допомогою болтів 16, встановлена бандажована матриця 1 і контейнер 2. Контейнер і матриця притискним кільцем 6 прижимаються за допомогою шпильок 15 та гайок 18 через підкладну опору 20 до нижньої плити 5. Перед видавлюванням в контейнер 2 на матрицю встановлювались одна або декілька заготовок. При прикладенні навантаження пуансон 3 діє на верхню заготовку в контейнері 2 і проходить видавлювання заготовки 4 через фільт'єру матриці 1. Повний вихід готового виробу 21 з матриці починається при здійснюванні видавлювання наступної заготовки. Процес видавлювання продовжується по схемі "заготовка за заготовкою". Штамп встановлюється гідравлічний прес ДБ 2432 зусиллям 1,6МН.

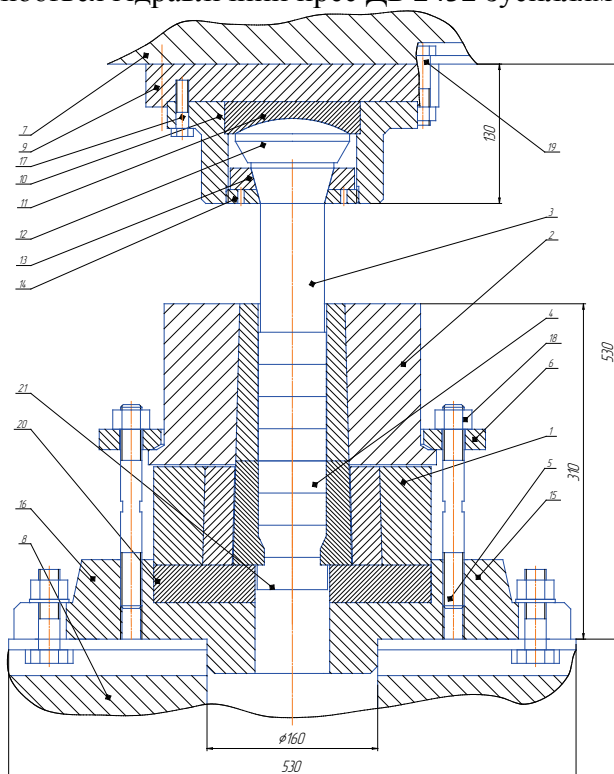


Рис. 6. Загальний вигляд штамп для прямого видавлювання зубчастого профілю з роздачею

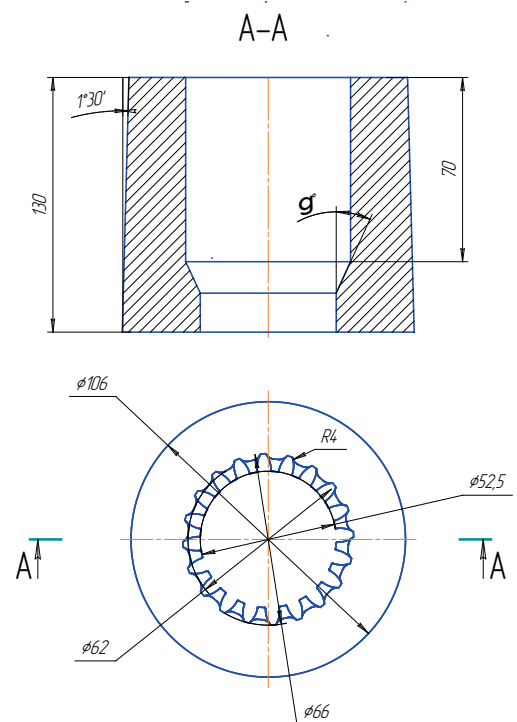


Рис. 7. Креслення матриці

Висновки: 1. Проведено чисельні розрахунки холодного видавлювання зубчастих коліс з роздачею через конічну матрицю із сталі 45 з різними кутами конуса. Визначені силові режими, напружено-деформований стан та кінцева форма виробу. 2. Розроблена

технологія та спроектовано технологічне оснащення для отримання зубчастого профілю із сталі 45, що дозволяє підвищити продуктивність виготовлення та коефіцієнт використання металу і практично виключити подальшу механічну обробку.

Література

1. Белошенко В.А. Теория и практика гидроэкструзии. [Текст] / Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Спусканюк В.З. - Киев. Наукова думка, 2007. – 247 с
2. Черный Ю.Ф. Способ выдавливания фасонных изделий. [Текст] / Черный Ю.Ф., Калюжный В.Л., Фоменко В.А., Воронин Н.И. // А.с. СССР. № 1738409. –Опубл. в Бюл. № 21, 1992г.
3. В.Л. Калюжный. Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів [Текст] / В.Л. Калюжный, О.В. Калюжный, В.М. Горноста́й, І.Я. Крижанівська. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, № 1(20)-2009, Краматорск, ДГМА. с. 23-27.
4. В.Л. Калюжный. Безвідхідні технології виготовлення профілів із сталей [Текст] / В.Л. Калюжный, О.В. Калюжный, В.М. Горноста́й, В.В.Піманов // Наукові нотатки Міжвузівський збірник. Луцький національний технічний університет. Вип. 25, частина 1, 2009.с. 107-111.
5. В.Л. Калюжный. Розрахунковий аналіз холодного прямого видавлювання прямокутних профілів з високовуглецевих сталей [Текст] / В.Л. Калюжный, М.В. Орлюк, В.М. Горноста́й, О.С. Запорожченко // Вісник НТУУ “КПІ” Машинобудування, випуск 60 – Київ.-2010. с. 77-81.

© Калюжный В.Л., Горноста́й В.М

УДК 621.777.4

*Калюжный В.Л., д.т.н., проф.; Горноста́й В.М., к.т.н., старший преподаватель.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина.*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННОГО ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ И ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С РАЗДАЧЕЙ ЗАГОТОВОК ЗУБЧАСТЫХ КОЛЕС И ВАЛОВ

Методом конечных элементов определены силовые режимы, напряженно-деформированное состояние заготовки и конечная форма изделия. Предложена технология и спроектирована штамповую оснастку для получения зубчатых колес холодным выдавливанием с раздачей.

Ключевые слова: *холодное выдавливание с раздачей, зубчатое колесо, профиль, силовые режимы, технология изготовления, штамповая оснастка.*

УДК 621.777.4

*Kaljuzhnij V.L., d.t.n., prof.; Gornostaj V.M., k.t.n., starshij vkladach.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL COLD SQUEEZING OUT AND COLD SQUEEZING OUT WITH DISTRIBUTION OF PURVEYANCES OF COG-WHEEL OF WHEELS AND BILLOWS

Abstract. *The article discusses the possibility of obtaining tooth profile on the outer surface of the preform cold extrusion with direct distribution . Numerical calculations of the process. The influence of structural factors on the process of forming tooth profile , power modes , the stress- strain state . The influence of the cone angle on the properties of the matrix material in the process of cold plastic deformation. Based on these studies was proposed technology for producing tooth profiles on the outer surfaces of the preforms , die tooling is designed and selected technological equipment .*

Keywords: *toothed profile , cold extrusion with the distribution , power modes , the stress-strain state, technology for producing , die tooling .*

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ОБТИСКУ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК В КОНУСНІЙ МАТРИЦІ

Методом скінченних елементів створені моделі та проведено розрахунковий аналіз відкрито обтиску, прямого закритого обтиску в традиційній конусній матриці та конусній матриці спеціального профілю. Формоутворенню підлягали трубчасті заготовки з нержавіючої сталі. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність створених моделей. Визначені зусилля обтиску, кінцеві форми та розміри zdeформованих заготовок та напружено-деформований стан в них. Використання матриці спеціального профілю привело до значного підвищення коефіцієнта обтиску в порівнянні з відкритим обтиском та закритим обтиском в традиційній конусній матриці. Встановлені необхідні дані для проектування технології обтиску трубчастих заготовок, конструювання штампного оснащення та вибору ковально-пресового обладнання.

Ключові слова: обтиск відкритий та закритий, трубчаста заготовка, конусна матриця спеціального профілю, метод скінченних елементів, зусилля обтиску, коефіцієнт обтиску

Вступ. Обтиск трубчастих заготовок та порожнистих заготовок з дном використовують при виготовленні балонів, ємностей для нагрівання види, перехідників для трубопровідної арматури, виробів спеціального спорядження та інших деталей. В теперішній час використовують схеми обтиску, які приведені на рис. 1 [1-3]. На схемах ліворуч від вісі симетрії зображений вихідний стан, праворуч – в процесі формоутворення виробів. Схема відкритого обтиску показана на рис. 1а. Трубчасту заготовку 1 діаметром D_3 , висотою H_3 та товщиною стінки S_0 встановлюють з центруванням на опорі 2 і zdeформують зусиллям P_D за допомогою конусної матриці 3 з одностороннім кутом α до отримання отвору діаметром d . При обтиску має місце потовщення zdeформованої частини до величини S_k на торці. Можливість формоутворення виробу за один перехід визначається коефіцієнтом обтиску $k = D_3 / d$, який залежить від співвідношення S_0 / d , кута α та коефіцієнта тертя μ . При відкритому обтиску (ВО) виникають дефекти у вигляді поперечних гофр в місці переходу циліндричної частини заготовки в zdeформовану або на циліндричній частині заготовки, а також меридіональних гофр на zdeформованій частині [3]. Для зменшення вірогідності втрати стійкості циліндричної частини заготовки широко використовують зворотній закритий обтиск (рис. 1б), при якому формоутворення відбувається в зворотному напрямку переміщенню zdeформуючого інструменту та на бокову поверхню заготовки діє жорсткий упор 3, що зв'язаний з матрицею 3 або верхньою плитою штампу.

Це збільшує коефіцієнт обтиску k , однак він також обмежений, тому що відбувається потовщення стінки в місці переходу zdeформованої частини заготовки в циліндричну, а також при

обтиску потовщується стінка заготовки біля опори 2. При переміщенні жорсткого упору виникають сили тертя між ним та циліндричною частиною заготовкою, які збільшують зусилля обтиску. Використання схеми прямого закритого обтиску заготовки 1 в традиційній конічній матриці 2 за допомогою опори 3 виключає дію сил тертя між заготовкою 1 та

жорстким упором 4 (рис. 1в). Остання схема приводить до збільшення коефіцієнта обтиску в порівнянні з попередньою схемою.

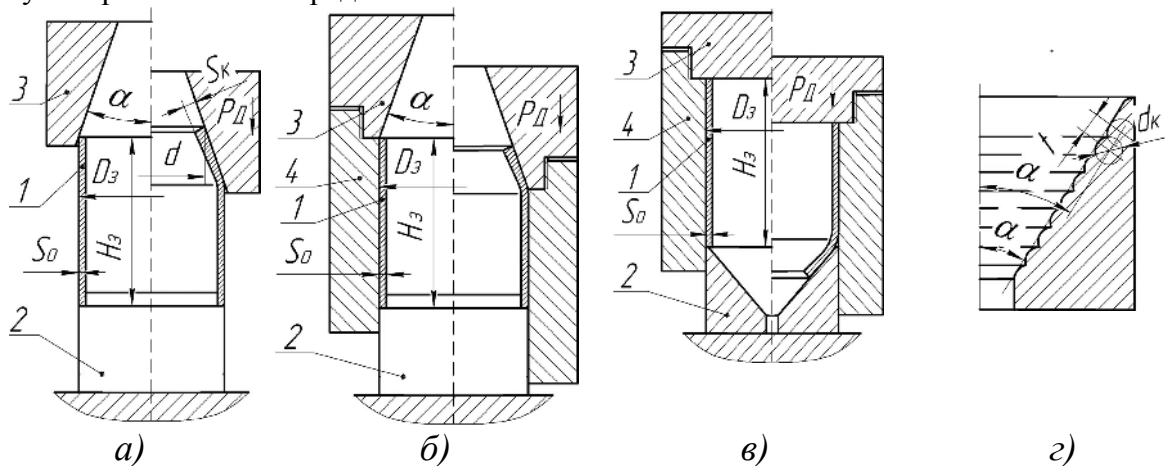


Рис. 1. Способи обтиску трубчастих заготовок в традиційній конусній матриці

(а – відкритий обтиск, б – зворотний закритий обтиск, в – прямий закритий обтиск, г – конічна матриця спеціального профілю

Застосування закритого обтиску в конусній матриці спеціального профілю, в якій деформуюча поверхня утворена перетином кіл діаметром d_k , що розташовані з кроком t під кутом α зменшує площу контактуючої поверхні матриці та сили тертя при формоутворенні обтиском (рис. 1г) [4]. Це додатково знижує зусилля обтиску та збільшує коефіцієнт обтиску. Аналіз силових режимів та якості виробів при обтиску трубчастих заготовок в конічній матриці розглянуто в роботі [5]. Однак, актуальними на теперішній час є задачі вивчення впливу прямого закритого обтиску трубчастих заготовок та форми деформуючої поверхні матриці на силові режими деформування та закономірності формоутворення виробів.

Постановка завдання. Метою роботи є проведення порівняльного розрахункового аналізу впливу схеми обтиску та форми деформуючої поверхні конусної матриці на силові режими та закономірності формоутворення виробів із трубчастої заготовки.

Вказану задачу можна вирішити шляхом створення математичних моделей з використанням чисельного методу скінченних елементів (МСЕ). МСЕ дозволяє комплексно враховувати конструктивні фактори (геометричну форму матриці), технологічні фактори (форму вихідної заготовки, коефіцієнт обтиску, тип змащення, швидкість деформування) та фізико-механічні фактори (пружні властивості металу, діаграму істинних напружень і діаграму пластичності металу, що деформується). Створені моделі обтиску та результати розрахунків необхідно перевіряти експериментальними даними, що дозволить використати результати моделювання для удосконалення існуючих та розробки нових технологій обтиску. По наведених схемах обтиску в розрахунках з використанням МСЕ і експериментальних дослідженнях деформуванню підлягали трубчасті заготовки із сталі 12Х18Н10Т діаметром $D_3 = 42$ міліметри (мм), висотою $H_3 = 100$ мм і товщиною стінки $S_0 = 1$ мм. При використанні матриці спеціального профілю моделюванням МСЕ необхідно було встановити діаметри кіл d_k та крок їх розташування t , які забезпечують рівну по довжині zdeформовану частину заготовки. Кут нахилу в конічних матрицях був $\alpha = 30^\circ$. Експериментальні дослідження проводили на випробувальній машині TIRA test 2300, яка дозволяє фіксувати залежність зусилля обтиску від переміщення деформуючого інструменту.

Основний матеріал та результати. Розрахунковим шляхом проведений аналіз відкритого обтиску (ВО), прямого закритого обтиску в традиційній конічній матриці (ЗО в ТКМ) та прямого закритого обтиску в конічній матриці спеціального профілю (ЗО в КМСП). Експериментальні дослідження проводили по схемах ВО та ЗО в ТКМ. Вихідна заготовка з матрицею, які встановлені на випробувальній машині наведені на рис. 2.

На рис. 3 показані розрахункові та експериментальні залежності зусилля обтиску від переміщення деформуючого інструменту. Для розглянутих варіантів обтиску зусилля пос-

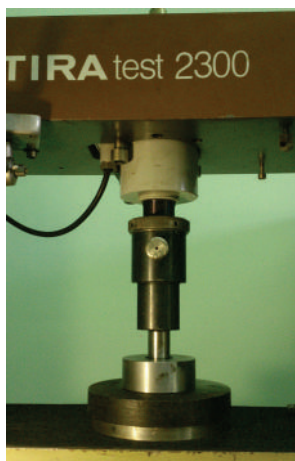


Рис. 2. Заготовка з матрицею на випробувальній машині

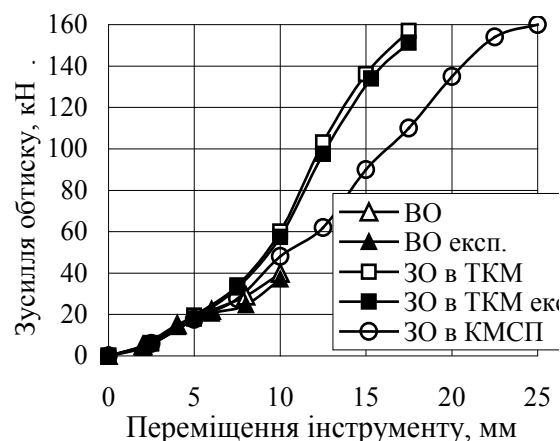


Рис. 3. Залежності зусилля обтиску від переміщення деформуючого інструменту

тупово збільшується і досягає максимального значення в кінці обтиску. Формоутворення виробу по схемі ВО закінчували в момент втрати стійкості стінки заготовки, яка мала місце в місці переходу циліндричної частини заготовки в здеформовану. Деформування по інших схемах обмежували на початку потовщення стінки заготовки в зоні переходу циліндричної частини в здеформовану частину заготовки. Максимальні величини зусилля P_D при ВО, які отримані МСЕ та експериментом склали відповідно 40 і 38 кН. Розбіжність результатів складала 5%. При ЗО в ТКМ розрахункові та експериментальні величини досягають відповідно значень 157 та 150 кН. Відмінність даних досягає 4,4%. Для схеми ЗО в КМСП моделюванням встановлені величини діаметрів кіл ($d_k = 6$ мм) та крок їх розташування ($t = 3$ мм), які забезпечили рівну по довжині здеформовану частину заготовки. Остання схема приводить до деформування заготовки при менших силових режимах, в порівнянні з ЗО в ТКМ, а потовщення стінки починається при зусиллі $P_D = 160$ кН. При цьому переміщення інструменту досягає 25 мм. Наведені на графіках переміщення деформуючого інструменту в розглянутих схемах обтиску приводять до різних значень діаметрів d торців здеформованих частин заготовок та коефіцієнта обтиску k . Використання матриці спеціального профілю суттєво зменшує вплив сил тертя на силовий режим обтиску та формоутворення виробів. Таким чином, створені за допомогою МСЕ моделі різних схем обтиску достатньо точно відповідають реальним процесам обтиску і результати розрахунків можуть бути використані для удосконалення існуючих та розроблення нових технологій обтиску трубчастих заготовок та порожнистих заготовок з дном.

На рис. 4 приведені загальні вигляди вихідних та здеформованих заготовок, які отримані розрахунком МСЕ та експериментом. Розрахункові вихідна заготовка в розрізі та здеформована заготовка показні на рис. 4а і 4б. Відповідні експериментальні дані приведені на рис. 4в та 4г. При відкритому обтиску стінка заготовки втрачає стійкість в місці переходу циліндричної частини заготовки в здеформовану частину.

Здеформована заготовка в розрізі в момент втрати стійкості, яка отримана моделюванням МСЕ, зображена на рис. 4д. Таку ж форму має експериментальна заготовка (рис. 4ж). Втрата стійкості стінки має місце в місці переходу циліндричної частини заготовки в zdeформовану.

На рис. 5 приведені zdeформовані заготовки, які отримані моделюванням та експериментом в розглянутих схемах закритого обтиску. На рис. 5а і 5б відповідно наведені

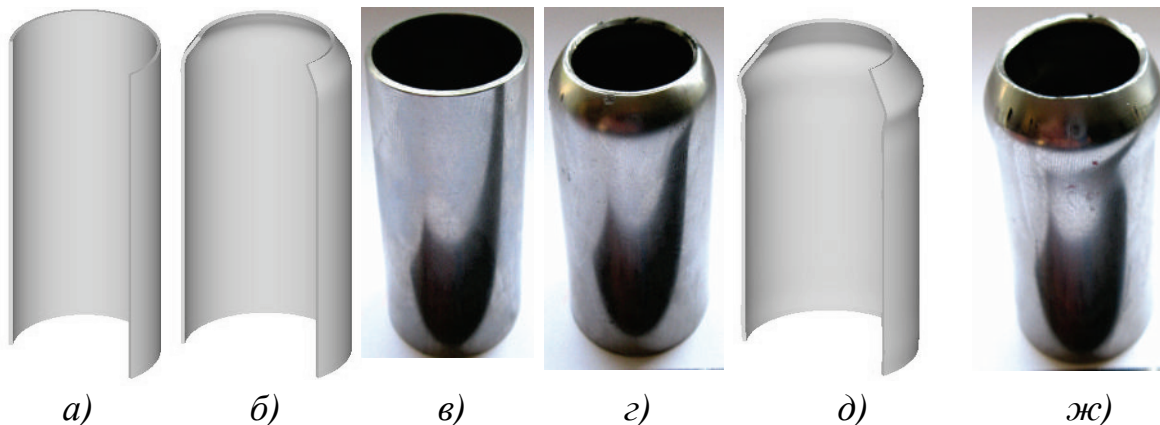


Рис. 4. Вихідні та zdeформовані заготовки, які отримані розрахунком МСЕ та експериментом при обтиску по схемі ВО: а і б – вихідна та zdeформована заготовки в розрізі, які отримані МСЕ, в і г – вихідна і zdeформовані заготовки, які отримані експериментом, д і ж – розрахункова в розрізі та експериментальна zdeформовані заготовки при втраті стійкості стінки

загальні вигляди розрахункової та експериментальної zdeформованих заготовок по схемі ЗО в ТКМ. Загальний вигляд розрахункової zdeформованої заготовки по схемі ЗО в КМСП обрaжений на рис. 5в. Як видно з рисунку, діаметр отвору d після обтиску в останньому випадку суттєво відрізняється від попереднього.

В результаті моделювання встановлені кінцеві форми і розміри zdeформованих частин заготовок, які зображені на рис. 6. Тонкими лініями зображений деформуючий інструмент. При схемі ВО (рис. 6а) діаметр торця zdeформованої частини складає $d=32$ мм, а стінка потовщується з $S_0=1$ мм до

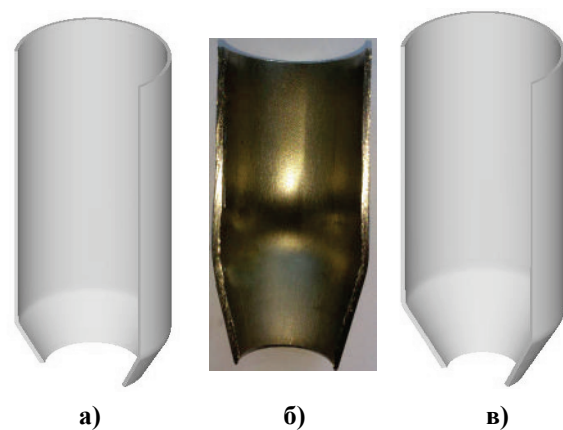


Рис. 5. Здеформовані заготовки, які отримані розрахунком МСЕ та експериментом при ЗО в ТКМ (а і б) та розрахунком при ЗО в КМСП (в)

$S_k=1,16$ мм. Отримана величина коефіцієнта обтиску $k=1,3$. Деформування по схемі ЗО в ТКМ (рис. 6б) приводить до наступних розмірів та величини коефіцієнта обтиску: $d=26,4$ мм, $S_k=1,27$ мм та $k=1,6$.

Збільшення коефіцієнта k , в порівнянні з ВО, склало 18,7 %. Застосування схеми ЗО в КМСП привело до отримання наступних розмірів та коефіцієнта обтиску (рис.6в): $d=20,8$ мм, $S_k=1,46$ мм та $k=2,02$. В порівнянні з ВО коефіцієнт обтиску k зріс на 35,6 %, а в порівнянні з ЗО в ТКМ – на 20,8 %.

Подальше деформування по останній схемі приводить до потовщення стінки в області переходу zdeформованої частини в циліндричну (рис. бг). Таким чином, використання матриці спеціального профілю дозволяє суттєво інтенсифікувати процеси обтиску.

Моделюванням МСЕ встановлений напружено-деформований стан в zdeформованих заготовках. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією та змі-

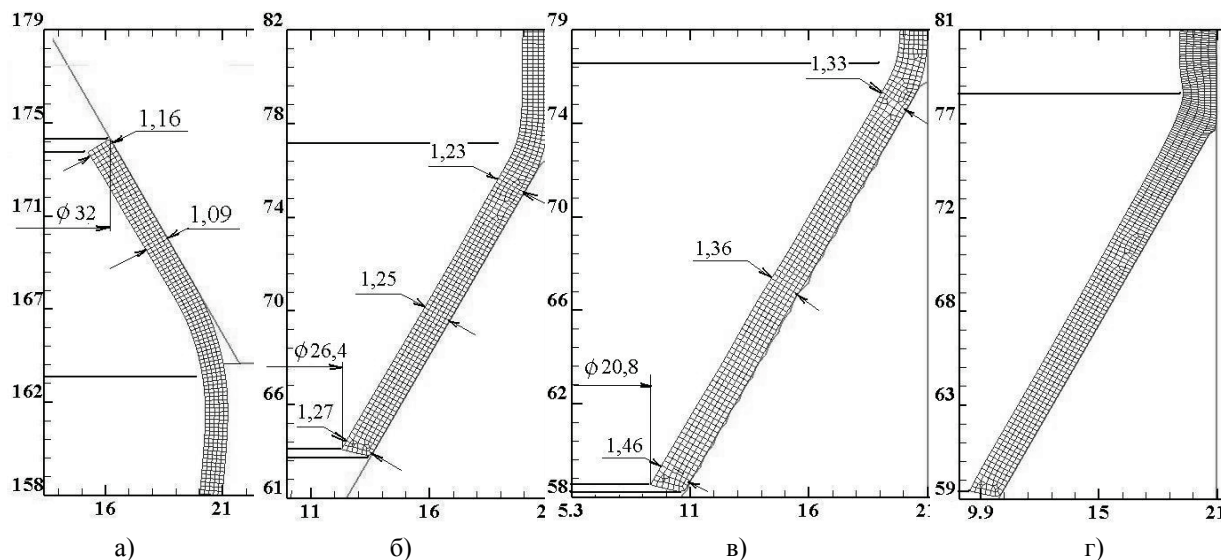


Рис. 6. Форма та розміри в міліметрах zdeформованих частин заготовок: а – заготовка після ВО, б – заготовка після ЗО в ТКМ, в і г – заготовки після ЗО КМСП в момент потовщення стінки

цнення zdeформованого металу можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ϵ_i та інтенсивності напружень σ_i . Розподіл ϵ_i в zdeформованих частинах заготовок, які отримані по різних схемах обтиску, приведений на рис. 7.

Досягнуті величини ϵ_i залежать від отриманого коефіцієнту обтиску. Найбільші значення величини ϵ_i зосереджені в області торців zdeформованих частин заготовок з по-

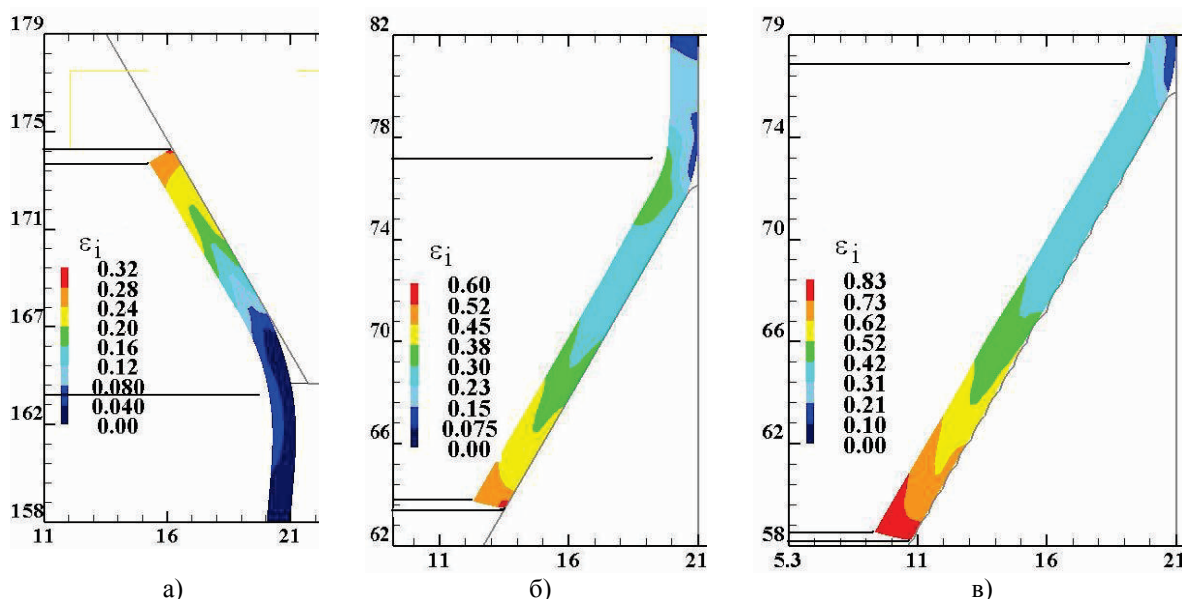


Рис. 7. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в zdeформованих частинах заготовки, які отримані при різних схемах обтиску: а – по схемі ВО, б – по схемі ЗО в ТКМ, в – по схемі ЗО в КМСП

ступовим зменшенням до місця переходу zdeформованої частини в циліндричну. При ВО (рис. 7а) в області торців $\varepsilon_i = 0,28-0,32$, при ЗО в ТКМ (рис. 7б) - $\varepsilon_i = 0,52-0,6$, а при ЗО в КМСП - $\varepsilon_i = 0,73-0,83$.

На рис. 8 зображені розподіли інтенсивності напружень σ_i в zdeформованих частинах заготовок при різних схемах обтиску. Вигляд розподілів аналогічний розподілу інтенсивності деформацій.

В циліндричних частинах заготовок величини σ_i відрізняються. При ВО (рис. 8а) в стінці циліндричної частини $\sigma_i = 360$ МПа, що відповідає умовній межі течії металу. Пода-

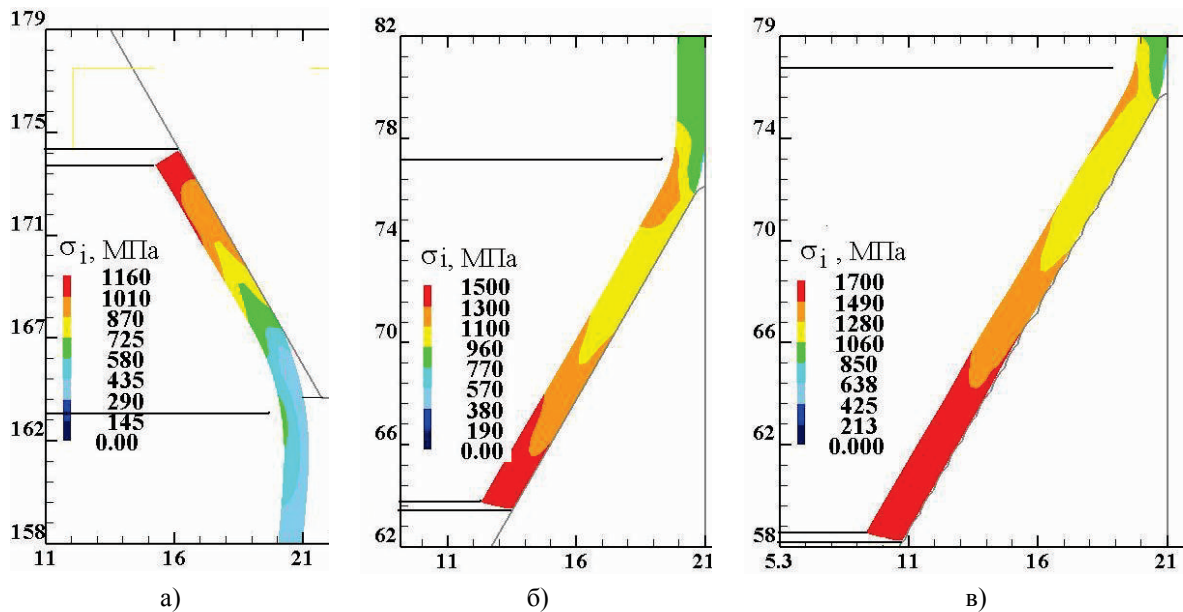


Рис. 8. Розподіл інтенсивності напружень σ_i в zdeформованих частинах заготовок, які отримані при різних схемах обтиску: а – по схемі ВО, б – по схемі ЗО в ТКМ, в – по схемі ЗО в КМСП

льше деформування, як було показано вище (див. рис. 4д) приводить до втрати стійкості стінки заготовки. При обтиску по схемах ЗО в ТКМ та ЗО в КМСП у вказаних місцях заготовок виникають інтенсивності напружень величиною $\sigma_i = 860$ МПа та $\sigma_i = 900$ МПа відповідно. Подальше деформування приводить до потовщення стінки в області переходу zdeформованої частини в циліндричну (див. рис. 6г).

По напружено-деформованому стану був визначений ступінь використання ресурсу пластичності ψ zdeформованого металу в заготовках після обтиску. Розподіл величин ψ в zdeформованих частинах, які отримані при різних схемах обтиску, приведений на рис. 9. Ресурс пластичності найбільше вичерпується на внутрішніх та зовнішніх шарах металу стінок zdeформованих частин. У вказаних місцях величини використаного ресурсу становлять $\psi = 0,6-0,7$. Такі значення ψ дозволяють виконувати наступні переходи обтиску без проміжного відпалу zdeформованих заготовок. В zdeформованих заготовках, які отримані по схемі ВО та схемі ЗО в КМСП максимальні значення використаного ресурсу практично однакові, хоча при обтиску по схемі ЗО в КМСП отриманий коефіцієнт обтиску більший в 1,55 раз.

Таким чином, в результаті проведених розрахунково-експериментальних досліджень отримані всі необхідні дані для проектування технології закритого обтиску в конусній матриці спеціального профілю, конструювання штампового оснащення та вибору ковально-пресового обладнання.

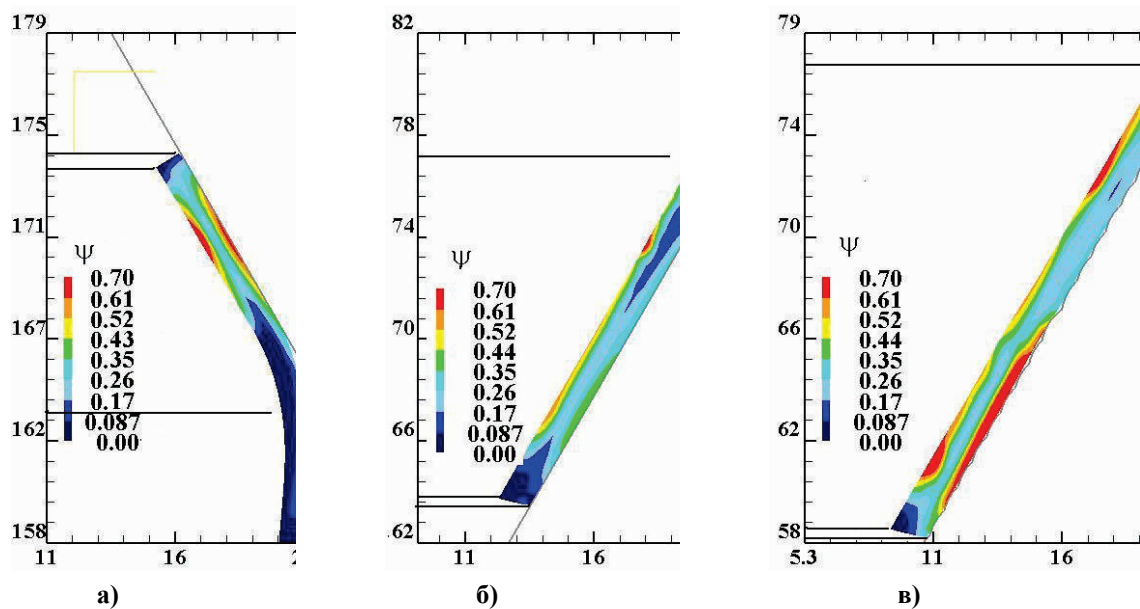


Рис. 9. Розподіл ступеню використання ресурсу пластичності ψ в деформованих частинах заготовок, які отримані при різних схемах обтиску: *а* – по схемі ВО, *б* – по схемі ЗО в ТКМ, *в* – по схемі ЗО в КМСП

Висновки. 1. Методом скінченних елементів розроблені математичні моделі та проведений розрахунковий аналіз процесів обтиску трубчастих заготовок з нержавіючої сталі по схемі відкритого обтиску, прямого закритого обтиску в традиційній конусній матриці та прямого закритого обтиску в конусній матриці спеціального профілю; 2. Розрахунком встановлені енерго-силові режими формоутворення при обтиску, кінцеві форми та розміри деформованих заготовок та напружено-деформований стан в них. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність створених моделей реальним процесам обтиску. 3. Показано, що використання закритого обтиску в конусній матриці спеціального профілю, дозволяє суттєво інтенсифікувати обтиск трубчастих заготовок в напрямку збільшення коефіцієнта обтиску. Деформуюча поверхня такої матриці утворена перетином кіл, що розташовані під кутом з відповідним кроком. Коефіцієнт обтиску в порівнянні з відкритим обтиском зріс на 35,6 %, а в порівнянні з прямим закритим обтиском в традиційній конусній матриці – на 20,8 %. Отримані дані можуть бути використані для проектування технології обтиску, штампового оснащення та вибору пресового обладнання.

Література

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., пераб. и доп. [Текст] / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка [Текст] / Под ред.. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с.
3. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка [Текст] / Ю.А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. - 288 с.
4. Калюжний О.В. Аналіз методом скінченних елементів відкритого та закритого обтиску в зпрофільованій сферичній матриці трубчастих заготовок з нержавіючої сталі [Текст] / О.В. Калюжний, М.П. Прядко // Тези доповідей 5 Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми обробки матеріалів тиском та якості фахової освіти» Київ, 2014. - С. 67-68.
5. Калюжний О.В. Аналіз силових режимів та якості виробів при обтиску трубчатих заготовок в конусній матриці [Текст] / О.В. Калюжний // Вісник НТУУ «КПІ», серія Машинобудування, 2011, вип. 62. - С. 63-67

© В.Л. Калюжний, Вихованець І.В., Чувільов Є.Ю.

В. Л. Калюжный, д.т.н., профессор

И.В. Выхованец, магистр

Е.Ю. Чувилев, магистр

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОБЖИМА ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В КОНУСНОЙ МАТРИЦЕ

Методом конечных элементов разработаны модели и проведен расчетный анализ открытого обжима, прямого закрытого обжима в традиционной конусной матрице и конусной матрице специального профиля. Формообразованию подвергали трубчатые заготовки из нержавеющей стали. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанных моделей. Определены усилия обжима, конечные формы и размеры сдеформированных заготовок и напряжено-деформированное состояние в них. Использование матрицы специального профиля привело к значительному повышению коэффициента обжима в сравнении с открытым обжимом и закрытым обжимом в традиционной конусной матрице. Установлены необходимые данные для проектирования технологии обжима, конструирования штамповой оснастки и выбора кузнечнопрессового оборудования.

Ключевые слова: *обжим открытый и закрытый, трубчатая заготовка, конусная матрица специального профиля, метод конечных элементов, усилие обжима, коэффициент обжима.*

V.L. Kaljuzhny, D.Sc., professor

I.V. Vychovanets, Graduate

E.U. Chuvilev, Graduate

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

INTENSIFICATION OF THE TUBULAR BLANKS BLOCK PRESSING PROCESSES IN THE CONE MATRIX

By FEM developed models and analysis conducted open block pressing, direct closed block pressing in the traditional cone and cone matrix with special profile. Shaping was carried out for tubular workpieces made of stainless steel. The experimental results confirmed the adequacy of the developed models. Determined efforts block pressing end shapes and sizes of deformed blanks and tense-deformed state in them. Using special profile matrix resulted in a significant increase in the block pressing ratio compared to the open and closed block pressing in a conventional cone matrix. Defined necessary data for the design of the block pressing technology die tooling design and selection forging equipment.

Keywords: *open and closed block pressing, the tubular blank, special profile cone matrix, finite element method, block pressing pressure, block pressing coefficient.*

УТОЧНЕНА ТЕОРІЯ КОМБІНОВАНОГО ВИТЯГУВАННЯ В ДВОКОНУСНІЙ МАТРИЦІ

Методом спільного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги з наближеною умовою пластичності проведений аналіз п'яти стадій комбінованого витягування в двоконусній матриці. Отримані аналітичні залежності для визначення напружень та зусилля деформування на стадії гнуття заготовки в верхньому конусу матриці, витягування заготовки в верхньому конусі матриці, згинання заготовки на радіусі заокруглення верхнього конусу в нижній, витягування в нижньому конусі та потоншення стінки на кінцевій стадії. В рішенні враховане потовщення стінки заготовки при формоутворенні, тертя на контактуючих поверхнях та зміцнення здеформованого металу.

Ключові слова: комбіноване витягування, рівняння рівноваги, умова пластичності, тертя, зміцнення здеформованого металу, зусилля деформування

Вступ. Комбіноване витягування в двоконусній матриці дозволяє збільшити висоту, підвищити точність форми та розмірів виробів в порівнянні з традиційним витягуванням. Основи теорії комбінованого витягування через одно- і двоконусних матрицях викладені в джерелі [1]. Отримані аналітичні залежності для визначення напружень на стадіях деформування по конічним поверхням матриці без врахування історії навантаження та потовщення заготовки при формоутворенні. На рис. 1 зображена схема комбінованого витягування через двоконусну матрицю з позначеннями в вихідному стані та стадії формоутворення виробу. Задача вісесиметрична, наведено половину схеми (рис.1а). Листова заготовка 1 діаметром $D_3 = 2R_0$ та товщиною S_0 деформується в матриці 2 за допомогою пуансону 3. Матриця має два конуси з кутами α і β , в яких проходить витягування, та конус з кутом λ , в якому виконується потоншення стінки. Процес формоутворення виробу для аналізу методом спільного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності можна розділити на 5 стадій: 1 стадія – гнуття вихідної заготовки в верхньому конусі матриці на кут α (рис. 1б); 2 стадія – деформування заготовки по верхньому конусу матриці (рис. 1в); 3 стадія – згинання заготовки на радіусі заокруглення матриці R_2 (рис. 1г); 4 стадія – деформування заготовки по нижньому конусу матриці з кутом β (рис. 1д); 5 стадія – потоншення стінки по конічній поверхні (кут конусу λ), яка замінює радіус заокруглення матриці (рис. 1ж). При цьому, величина зазору між пуансоном і матрицею може бути меншою товщини стінки вихідної заготовки. Тому для більш точного визначення напружено-деформованого стану та зусилля витягування необхідно послідовно розглянути формоутворення виробу по вказаних стадіях. В теперішній час проведені розрахункові дослідження з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) традиційного витягування [2] та комбінованого витягування [3-5]. В наведених джерелах використання МСЕ дозволило виконати оптимізацію геометричної форми матриці для забезпечення зменшення розтягувальних напружень в небезпечному перерізі заготовки та збільшення ступеню деформації за один перехід. Однак, актуальною задачею є отримання аналітичних залежностей для інженерних розрахунків напружено-деформованого стану заготовки та визначення зусилля деформування по стадіях комбінованого витягування.

Постановка завдання. Метою роботи є отримання аналітичних залежностей для визначення напружень та деформацій, а також зусилля витягування на стадіях комбіновано-

го витягування. Вказану задачу можна вирішити методом спільного вирішення наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності (інженерним методом – ІМ).

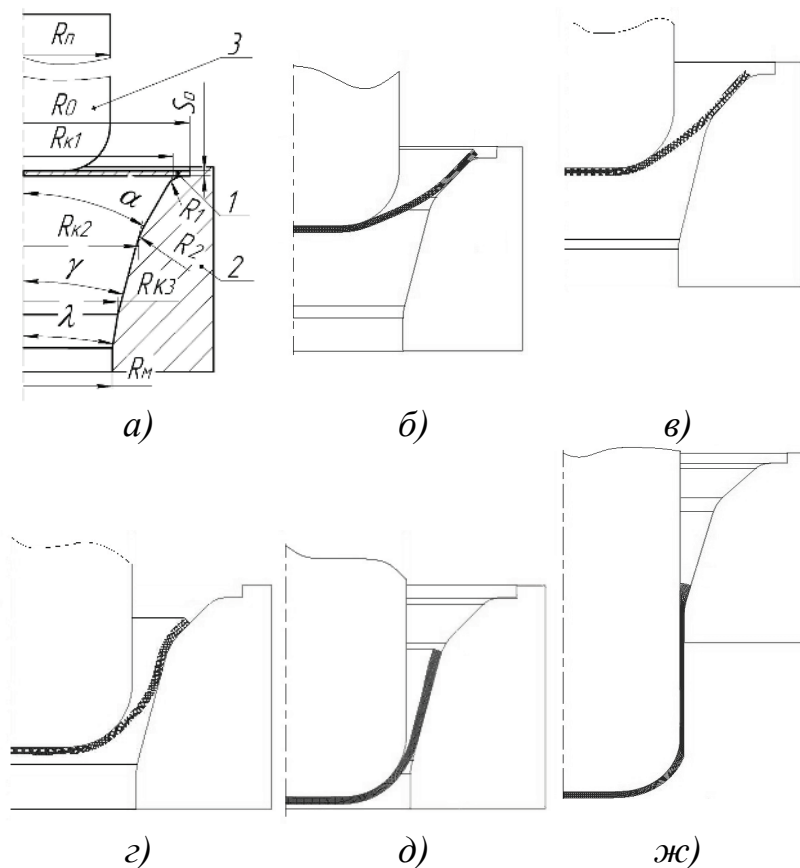


Рис. 1. Схема комбінованого витягування через двоконусну матрицю з позначеннями (а) та стадії формоутворення виробу (б-ж)

конусі матриці. Для отримання диференціального рівняння

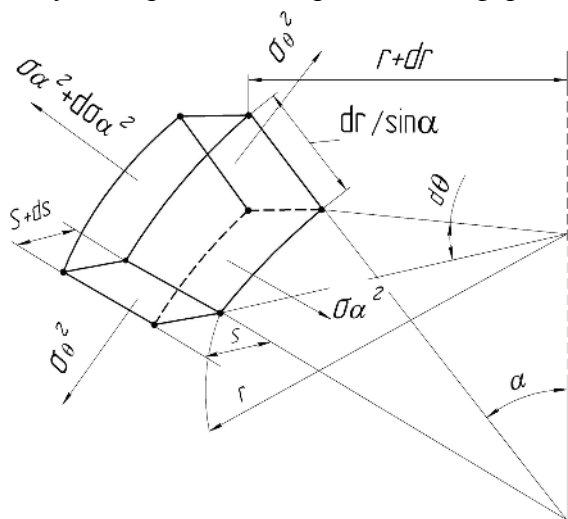


Рис. 2. Елементарний об'єм в здеформованій заготовці на стадії гнуття

рівноваги розглядаємо елементарний об'єм в здеформованій заготовці з діючими напруженнями на його поверхнях, який виділений в заготовці на цій стадії (рис. 2). Напруження σ_α^2 направлене паралельно твірній верхнього конусу матриці, а напруження σ_θ^2 діє в тангенційному напрямку. Записуємо суму проєкцій сил від діючих напружень на направлення, яке паралельне верхньому конусу матриці:

$$(\sigma_\alpha^2 + d\sigma_\alpha^2)(r + dr)d\theta(S + dS) - \sigma_\alpha^2 S r d\theta - 2\sigma_\theta^2 S \frac{dr}{\sin \alpha} \sin \frac{d\theta}{2} \sin \alpha = 0$$

Нехтуючи величинами другого порядку малості і враховуючи, що для малих кутів $\sin d\theta / 2 \approx d\theta / 2$, отримуємо:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_\alpha^2 S r) - \sigma_\theta^2 S = 0 \quad (1)$$

Допущення, які прийняті при рішенні: метал заготовки жорстко-пластичний зі зміцненням; товщина стінки S мала в порівнянні з діаметром, тому зміною напружень по товщині нехтуємо. В рішенні необхідно врахувати напруження та потовщення заготовки, які виникають на попередніх стадіях. Також необхідно встановити постадійне зміцнення здеформованого металу та тертя на контактуючих поверхнях між заготовкою та матрицею. Особливу увагу необхідно приділити визначенню товщини торця стінки перед потоншенням та розтягувальних напружень стінці на останній стадії потоншення стінки, які можуть привести до відриву донної частини заготовки.

Основний матеріал та результати. Аналіз 1 стадії гнуття заготовки в верхньому

Наближена умова пластичності по різниці крайніх напружень має вигляд:

$$\sigma_{\alpha}^2 - \sigma_{\theta}^2 = \beta \sigma_s \quad (2)$$

Тут $\beta \approx 1,1$ - коефіцієнт Луде. Якщо підставити σ_{θ}^2 з (1) в (2), розділити змінні та з допущенням $S \approx const$ отримуємо:

$$d\sigma_{\alpha}^2 = -\beta \sigma_s \frac{dr}{r} \quad (3)$$

Після інтегрування (3) та знаходження довільної постійної з граничної умови, що на торці заготовки при $r = R_{\kappa 1}$ напруження $\sigma_{\alpha}^2 = 0$, отримуємо вираз для напруження σ_{α}^2 , а з (2) - для σ_{θ}^2 :

$$\sigma_{\alpha}^2 = \beta \sigma_s \ln(R_{\kappa 1} / r); \quad \sigma_{\theta}^2 = \sigma_{\alpha}^2 - \beta \sigma_s = -\beta \sigma_s [1 - \ln(R_{\kappa 1} / r)] \quad (4)$$

Максимальні величини напружень σ_{α}^2 і σ_{θ}^2 будуть відповідно при радіусах $r = R_{\kappa 2}$ та $r = R_{\kappa 1}$:

$$\sigma_{\alpha, \max}^2 = \beta \sigma_s \ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2}); \quad \sigma_{\theta, \max}^2 = -\beta \sigma_s \quad (5)$$

Максимальне зусилля деформування P_{\max}^2 на стадії гнуття заготовки, яке треба прикласти вертикально до пуансону з урахуванням

величини $\beta = 1,1$, можна визначити по формулі:

$$P_{\max}^2 = 2\pi R_{\kappa 2} S_0 \sigma_{\alpha, \max}^2 / \cos \alpha - 6,9 R_{\kappa 2} S_0 \sigma_s \ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2}) / \cos \alpha \quad (6)$$

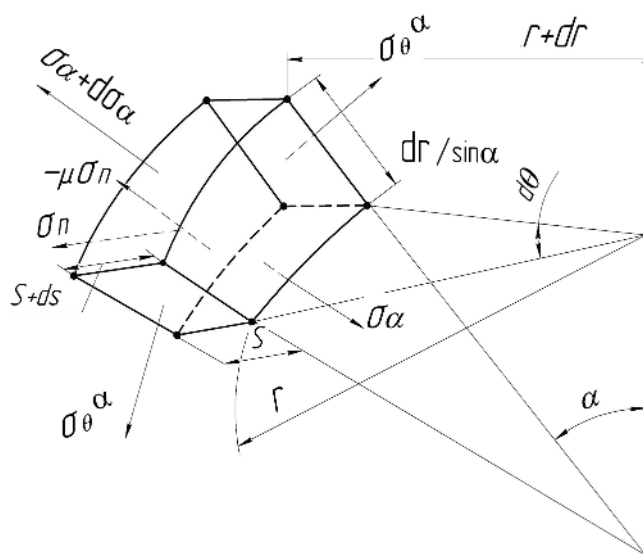


Рис. 3. Елементарний об'єм з діючими напруженнями і позначеннями в zdeформованій заготовці на 2 стадії деформування

су матриці:

$$\sigma_n r d\theta dr / \sin \alpha - 2\sigma_{\theta}^{\alpha} S (dr / \sin \alpha) \sin(d\theta / 2) \cos \alpha = 0$$

Після перетворень і урахуванням, що $\sin d\theta / 2 \approx d\theta / 2$, отримуємо:

$$\sigma_n = \sigma_{\theta}^{\alpha} (S / r) \cos \alpha \quad (7)$$

Тут величину істинного напруження σ_s , нехтуючи зміцненням, можна взяти у вигляді $\sigma_s = \sigma_{0,2}$ ($\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості матеріалу заготовки).

Далі розглядаємо другу стадію - деформування заготовки по поверхні верхнього конусу з утворенням чашки (рис. 1в). Елементарний об'єм з діючими напруженнями для отримання диференціальних рівнянь рівноваги має вигляд, який зображений на рис. 3. На контактуючій поверхні між матрицею та заготовкою від тертя виникають дотичні напруження $\mu \sigma_n$ (μ - коефіцієнт тертя, σ_n - нормальне напруження).

Записуємо суму проєкцій сил на напрямок, що перпендикулярний кону-

Далі проектуємо сили на напрям, що паралельний конусу матриці:

$$\begin{aligned} & (\sigma_\alpha + d\sigma_\alpha)(r + dr)d\theta(S + dS) - \sigma_\alpha S r d\theta - \\ & - 2\sigma_\theta S (dr / \sin \alpha) \sin(d\theta / 2) \sin \alpha - \mu \sigma_n r d\theta (dr / \sin \alpha) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Після перетворень в рівнянні (8), нехтування величинами другого порядку малості та підстановки σ_n з (7) отримуємо з урахуванням постійності товщини S :

$$r d\sigma_\alpha / dr + \sigma_\alpha - \sigma_\theta^\alpha (1 + \mu \cdot ctg \alpha) = 0 \quad (9)$$

Наближена умова пластичності при деформуванні на 2 стадії має вигляд $\sigma_\alpha - \sigma_\theta^\alpha = \beta \sigma_s$. Підставляємо σ_θ^α з умови пластичності в (9):

$$d\sigma_\alpha / [\sigma_\alpha - \beta \sigma_s (1 + 1 / \mu \cdot ctg \alpha)] = \mu \cdot ctg \alpha (dr / r) \quad (10)$$

Після інтегрування та знаходження довільної постійної з умови, що на торці здеформованої заготовки (при $r = R_{\kappa 1}$) напруження $\sigma_\alpha = 0$ і проведення перетворень маємо:

$$\sigma_\alpha = \beta \sigma_s (1 + 1 / \mu \cdot ctg \alpha) \left[1 - (r / R_{\kappa 1})^{\mu \cdot ctg \alpha} \right] \quad (11)$$

Зробимо зпрощення в (11). Для цього запишемо:

$$\left(r / R_{\kappa 1} \right)^{\mu \cdot ctg \alpha} = \exp \left[\mu \cdot ctg \alpha \ln \left(r / R_{\kappa 1} \right) \right] = 1 - \mu \cdot ctg \alpha \ln \left(R_{\kappa 1} / r \right)$$

Тоді вираз для напруження σ_α приймає вигляд:

$$\sigma_\alpha = \beta \sigma_s (1 + 1 / \mu \cdot ctg \alpha) \ln \left(R_{\kappa 1} / r \right) \quad (12)$$

З умови пластичності знаходимо вираз для напружень σ_θ^α :

$$\sigma_\theta^\alpha = \sigma_\alpha - \beta \sigma_s = -\beta \sigma_s \left[1 - (1 + \mu \cdot ctg \alpha) \ln \left(R_{\kappa 1} / r \right) \right] \quad (13)$$

До напружень σ_α та σ_θ^α необхідно прибавити максимальні значення напружень $\sigma_{\alpha, \max}^e$ і $\sigma_{\theta, \max}^e$ з формули (5), які виникли в заготовці на 1 стадії гнуття. Тоді результуючі напруження σ_α^p і $\sigma_\theta^{\alpha, p}$, що виникають в заготовці на 2 стадії, можна визначити по формулах:

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha^p &= \beta \sigma_s \left[(1 + \mu \cdot ctg \alpha) \ln \left(R_{\kappa 1} / r \right) - \ln \left(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} \right) \right] \\ \sigma_\theta^{\alpha, p} &= -\beta \sigma_s \left[2 - (1 + \mu \cdot ctg \alpha) \ln \left(R_{\kappa 1} / r \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

Максимальні значення напружень $\sigma_{\alpha, \max}^p$ та $\sigma_{\theta, \max}^{\alpha, p}$ на 2 стадії витягування виникають відповідно при величинах радіусів $r = R_{\kappa 2}$ і $r = R_{\kappa 1}$. Після підстановки радіусів та проведення перетворень знаходимо:

$$\sigma_\alpha^p = \beta \sigma_s \left[(1 + \mu \cdot ctg \alpha) \ln \left(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} \right) - \ln \left(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} \right) \right]; \sigma_{\theta, \max}^{\alpha, p} = -2\beta \sigma_s \quad (15)$$

Для визначення зміни товщини заготовки при деформуванні на 2 стадії запишемо співвідношення Леві-Мізеса між прирощеннями деформацій $d\varepsilon_n$ в напрямку товщини і прирощеннями тангенційних деформацій $d\varepsilon_\theta$ та девіаторними напруженнями для жорстко-пластичного стану металу:

$$d\varepsilon_n / d\varepsilon_\theta = (ds / s) / (dr / r) = (\sigma_n - \sigma_{cp}) / (\sigma_\theta^\alpha - \sigma_{cp}), \quad (16)$$

де: $\sigma_{cp} = (\sigma_\alpha + \sigma_\theta^\alpha + \sigma_n) / 3$ - гідростатичний тиск.

Вважаємо, що напруження σ_n мале в порівнянні з σ_α та σ_θ^α і приймаємо, що $\sigma_n = 0$. Тоді вираз (16) має вигляд:

$$ds/s = \left[\left(\sigma_\alpha \quad \sigma_\theta^\alpha \right) / \left(\sigma_\alpha \quad 2\sigma_\theta^\alpha \right) \right] / (dr/r) \quad (17)$$

Для розрахунку товщини торця заготовки при витягуванні на 2 стадії необхідно встановити напруження в ньому по виразах (15) при радіусі $r = R_{\kappa 1}$. Після перетворень отримуємо:

$$\sigma_\alpha^m = \beta \sigma_s \ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2}); \quad \sigma_\theta^{\alpha, m} = -2\beta \sigma_s \quad (18)$$

Підставляємо вирази напружень з (18) в (16). Після перетворень отримуємо:

$$ds/s = \left\{ \left[\ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2}) - 2 \right] / \left[\ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2}) + 4 \right] \right\} dr/r \quad (19)$$

Після інтегрування виразу (10) та визначення довільної постійної з граничної умови, що при $r = R_3$, товщина стінки заготовки $s = S_o$. Тоді:

$$\ln(s/S_o) = \ln(r/R_3) \left(\ln R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} - 2 \right) / \left(\ln R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} + 4 \right) \quad (20)$$

Останню формулу можна зпростити. Величина $\ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2})$ при комбінованому витягуванні не перевищує значення 1,3. Тому її можна замінити першим членом при розкладанні в ряд: $\ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2}) \approx R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} - 1$. Після перетворень та з урахуванням $r = R_{\kappa 1}$ отримуємо вираз для визначення товщини торця заготовки S_2^m після гнуття, або на початку 2 стадії:

$$S_2^m = S_o \left(R_{\kappa 1} / R_3 \right) \left(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} \right)^2 - 9 \quad (21)$$

Аналогічно можна отримати формулу для визначення кінцевої товщини торця заготовки S_α^m після 2 стадії. Для цього необхідно визначити величини напружень по виразах (14) при $r = R_{\kappa 2}$. Якщо підставити отримані вирази в рівнянні (17), після інтегрування та визначення довільної постійної з умови, що при $r = R_{\kappa 1}$ товщина $S = S_2^m$, після перетворень можна знайти:

$$S_\alpha^m = S_2^m \left(R_{\kappa 2} / R_{\kappa 1} \right) \left[\left(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} \right)^{(3+2\mu \operatorname{ctg} \alpha) - 7} \right] \left[6 - \mu \operatorname{ctg} \alpha \left(1 + R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2} \right) \right] \quad (22)$$

Для врахування зміцнення на величини напружень та зусилля при деформуванні заготовки на 2 стадії використаємо відому апроксимацію діаграми дійсних напружень [6]:

$$\sigma_s = \left[\sigma_s / (1 - \psi_u) \right] (\psi / \psi_u)^{\psi / (1 - \psi_u)}, \quad (23)$$

де: σ_s - межа міцності, ψ - текуче значення відносного потоншення, ψ_u - відносне потоншення, яке відповідає моменту утворення шийки на зразку при випробуванні на розтяг. В якості деформації ψ беремо середнє значення відношення різниці довжин кіл здеформованої заготовки на вході і виході верхнього конусу матриці до довжини кола на вході:

$$\psi^{cp} = (2\pi R_{\kappa 1} - 2\pi R_{\kappa 2}) / 2\pi R_{\kappa 1} = (R_{\kappa 1} - R_{\kappa 2}) / R_{\kappa 1}$$

Тоді формула для визначення середньої величини дійсного напруження σ_{s2}^{cp} в здеформованій заготовці на 2 стадії із (23) має вигляд :

$$\sigma_{s2}^{cp} = [\sigma_a / (1 - \psi_{ui})] [(R_{k1} - R_{k2}) / 2R_{k1}\psi_{ui}]^{\psi_{ui}/(1-\psi_{ui})} \quad (24)$$

Тоді максимальне зусилля деформування P_{D2}^{\max} на 2 стадії, яке треба прикласти вертикально до пуансону, можна визначити по формулі:

$$P_{D2}^{\max} = 2\pi R_{k2} S_z^m \sigma_{a,\max}^p / \cos \alpha \times 2\pi R_{k2} S_z^m \beta \sigma_{s2}^{cp} (2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \times \ln(R_{k1} / R_{k2}) \approx 6,9 R_{k2} S_z^m \sigma_{s2}^{cp} (2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \ln(R_{k1} / R_{k2}) \quad (25)$$

Прирошення напруження $\Delta\sigma_\gamma$, яке виникає при гнутті на 3 стадії визначаємо по методиці Є.О. Попова [6]. Кут згину складає приблизно $\pi/3$. Тоді природження напруження можна визначити наступним чином:

$$\Delta\sigma_\gamma = \sigma_s S_{cp2} / (6R_2 + 3S_{cp2})$$

Тут $S_{cp2} = (S_z^m + S_a^m) / 2$ - середнє значення товщини здеформованої заготовки на 2 стадії. Як видно із наведеної формули, величина природження $\Delta\sigma_\gamma$ не вносить суттєвий вклад в напружений стан здеформованої заготовки, тому в подальшому рішенні його можна не враховувати.

Переходимо до аналізу 5 стадії – деформування на нижньому конусі матриці (кут конусу γ). Елементарний об'єм у здеформованій заготовці на цій стадії аналогічний 2 стадії (див. рис. 3). Тому напруження σ_γ , які діють в заготовці паралельно конічній поверхні матриці, можна визначити по формулі (12), замінивши індекс α на γ , а радіус R_{k1} на R_{k2} :

$$\sigma_\gamma = \beta \sigma_s (1 + \mu \operatorname{ctg} \gamma) \ln(R_{k2} / r) \quad (26)$$

З наближеної умови пластичності $\sigma_\gamma - \sigma_\theta^\gamma = \beta \sigma_s$ знаходимо:

$$\sigma_\theta^\gamma = \sigma_\gamma - \beta \sigma_s = -\beta \sigma_s [1 - (1 + \mu \operatorname{ctg} \gamma) \ln(R_{k2} / r)] \quad (27)$$

До напружень σ_γ і σ_θ^γ необхідно прибавити максимальні

напруження, які отримані в заготовці на другій стадії та визначаються формулами (15).

Тоді вирази для результуючих значень вказаних напружень мають вигляд:

$$\sigma_\gamma^p = \beta \sigma_s \left\{ (1 + \mu \operatorname{ctg} \gamma) \ln(R_{k2} / r) + [(2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) / \cos(\alpha - \gamma)] \ln(R_{k1} / R_{k2}) \right\}$$

$$\sigma_\theta^{p,\gamma} = -\beta \sigma_s [3 - (1 + \mu \operatorname{ctg} \gamma) \ln(R_{k2} / r)]$$

В формулі для напруження σ_γ^p врахована проекція напруження σ_a^p на напрямок, який паралельна нижньому конусу матриці. Максимальні величини напружень σ_γ^p і $\sigma_\theta^{p,\gamma}$ будуть відповідно при $r = R_{k3}$ і $r = R_{k2}$:

$$\sigma_{\gamma,\max}^p = \beta \sigma_s \left[(1 + \mu \operatorname{ctg} \gamma) \ln(R_{k2} / R_{k3}) + \frac{2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \ln(R_{k1} / R_{k2}) \right] \quad (28)$$

$$\sigma_{\theta,\max}^{p,\gamma} = -\beta \sigma_s [3 - (1 + \mu \operatorname{ctg} \gamma) \ln(R_{k2} / R_{k2})] = 3\beta \sigma_s$$

Кінцеву товщину торця заготовки S_γ^m в кінці 4 стадії визначаємо аналогічно 2 стадії:

$$S_\gamma^m = S_a^m \left(R_{k3} / R_{k2} \right)^A \quad (29)$$

Тут величина A має вигляд:

$$A = \left[2(1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \gamma) \left(\frac{R_{\kappa 2}}{R_{\kappa 3}} - 1 \right) + \frac{2 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \left(\frac{R_{\kappa 1}}{R_{\kappa 2}} - 1 \right) \right] \cdot 3 \Bigg/ \left[\frac{2 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \left(\frac{R_{\kappa 1}}{R_{\kappa 2}} - 1 \right) - (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \gamma) \left(\frac{R_{\kappa 2}}{R_{\kappa 3}} - 1 \right) + 6 \right] \quad (30)$$

Врахувати зміцнення на 4 стадії також можна аналогічно 2 стадії:

$$\sigma_{s4}^{cp} = [\sigma_B H(1 - \psi_{us})] \left[(R_{\kappa 2} - R_{\kappa 3}) / 2R_{\kappa 2} \psi_{us} \right]^{\psi_{us} / (1 - \psi_{us})} \quad (31)$$

Максимальне зусилля деформування на 4 стадії, яке треба прикласти вертикально до пуансона по аналогії з 2 стадією, можна визначити по наступній формулі:

$$P_{Д4}^{\max} = 2\pi S_{\gamma}^m R_{\kappa 3} \sigma_{\gamma, \max}^p / \cos \gamma \approx 6,9 S_{\gamma}^m R_{\kappa 3} \sigma_{s4}^{cp} \times \left[(1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \gamma) \ln(R_{\kappa 2} / R_{\kappa 3}) + \frac{2 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \ln(R_{\kappa 1} / R_{\kappa 2}) \right] / \cos \gamma \quad (32)$$

Далі проводимо аналіз 5 стадії формоутворення виробу – витягування з потоншенням. Схема для аналізу вказаної стадії по наближеним рівнянням рівноваги і умові пластичності зображена на рис. 4. Показано осередок деформації в заготовці, який обмежений радіусами R_n і r_e . В осередку виділений елементарний об'єм, на поверхнях якого показані діючі напруження в сферичних координатах r , φ і θ : σ_r - розтягувальні напруження; $\sigma_{\theta}^{\lambda}$ та σ_{φ} - стискаючі напруження; $\mu\sigma_{\varphi}$ - дотичні напруження від тертя на контактуючих поверхнях.

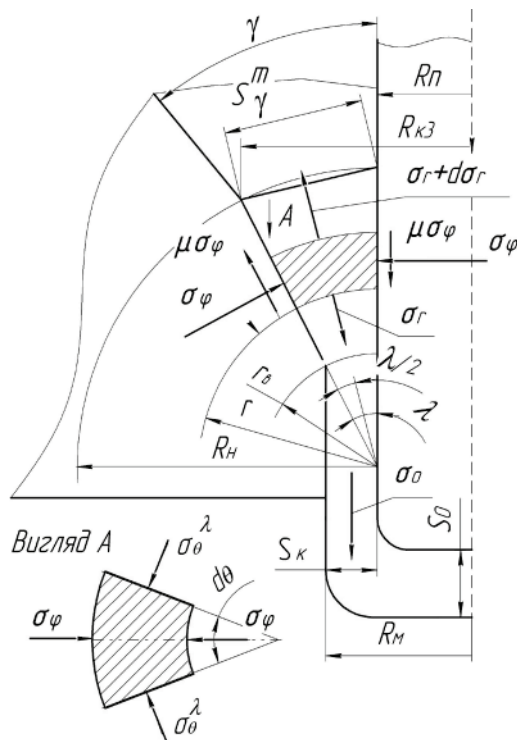


Рис. 4. Схема для аналізу 5 стадії – витягування з потоншенням

У частині здеформованої заготовки товщиною S_{κ} виникають розтягувальні напруження σ_o . В результаті аналізу необхідно отримати вираз для визначення напруження σ_o та зусилля витягування з потоншенням.

Записуємо одне із двох рівнянь рівноваги у вказаних координатах:

$$d\sigma_r / dr + d\tau_{r\varphi} / rd\varphi + \left[2\sigma_r - (\sigma_{\varphi} + \sigma_{\theta}^{\lambda}) + \tau_{r\varphi} \operatorname{ctg} \varphi \right] / r = 0 \quad (33)$$

Потоншення виконується при малих кутах ($\lambda \leq 16^\circ$), тому $\operatorname{ctg} \varphi \approx 1 / \varphi$. Крім того, робимо допущення, що $\sigma_{\varphi} \approx \sigma_{\theta}^{\lambda}$. Розподіл дотичних напружень в осередку деформації беремо у вигляді: $\tau_{r\varphi} = -2\mu\sigma_{\varphi} / \lambda$ (тут кут φ змінюється в межах $\mp \lambda / 2$). Тоді рівняння (33) приймає вигляд:

$$rd\sigma_r / dr - 4\mu\sigma_{\varphi} / \lambda + 2(\sigma_r - \sigma_{\theta}^{\lambda}) = 0 \quad (34)$$

З наближеної умови пластичності для цієї стадії $\sigma_r - \sigma_{\varphi} = \beta\sigma_s$ визначаємо σ_{φ}

та підставляємо в (34):

$$rd\sigma_r / dr - 4\mu\sigma_r / \lambda + \beta\sigma_s(2 + 4\mu / \lambda) = 0 \quad (35)$$

Після інтегрування (35) та знаходження довільної постійної з граничної умови, що при $r = R_{\kappa 3}$ напруження $\sigma_r = 0$, отримуємо:

$$\sigma_r = \beta \sigma_s (1 + \lambda / 2\mu) \left[1 - (r / R_{\kappa 3})^{4\mu / \lambda} \right] \quad (36)$$

Для зпрощення виразу (36) по аналогії з формулою (11) отримуємо вираз для σ_r , а з умови пластичності - σ_φ :

$$\sigma_r = \beta \sigma_s \left(\frac{4\mu}{\lambda} + 2 \right) \ln \left(\frac{R_{\kappa 3}}{r} \right); \sigma_\varphi = \beta \sigma_s \left[1 + \left(\frac{4\mu}{\lambda} + 2 \right) \ln \left(\frac{R_{\kappa 3}}{r} \right) \right] \quad (37)$$

В виразах (37) необхідно врахувати максимальні напруження з 4 стадії з формули (29). До напруження σ_r необхідно прибавити проекцію $\sigma_{\gamma, \max}^p$ на напрямок, який проходить через середину кута λ . Зважаючи на невеликі величини кутів γ і λ при комбінованому витягуванні приймаємо, що $\cos(\gamma - \lambda / 2) \approx 1$. Тоді вирази для результуючих величин напружень на 5 стадії мають вигляд:

$$\sigma_r^p = \beta \sigma_s \left[\left(\frac{4\mu}{\lambda} + 2 \right) \ln \left(\frac{R_{\kappa 3}}{r} \right) + (1 + \mu \cdot \text{ctg} \gamma) \ln \frac{R_{\kappa 2}}{R_{\kappa 3}} + \frac{2 + \mu \cdot \text{ctg} \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \ln \frac{R_{\kappa 1}}{R_{\kappa 2}} \right] \quad (38)$$

$$\sigma_\varphi^p = \beta \sigma_s \left[4 + \left(\frac{4\mu}{\lambda} + 2 \right) \ln \left(\frac{R_{\kappa 3}}{r} \right) \right]$$

Максимальні значення напружень σ_r^p та σ_φ^p з (38) будуть відповідно при $r = R_m$ і $r = R_{\kappa 3}$

$$\sigma_{r, \max}^p = \beta \sigma_s \left[\left(\frac{4\mu}{\lambda} + 2 \right) \ln \left(\frac{R_{\kappa 3}}{R_m} \right) + (1 + \mu \cdot \text{ctg} \gamma) \ln \frac{R_{\kappa 2}}{R_{\kappa 3}} + \frac{2 + \mu \cdot \text{ctg} \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \ln \frac{R_{\kappa 1}}{R_{\kappa 2}} \right] \quad (39)$$

$$\sigma_{\varphi, \max}^p = -4\beta \sigma_s$$

Для визначення середнього значення істинного напруження σ_{s5}^{cp} в якості деформації ψ^{cp} беремо середнє значення відношення різниць довжин дуг на вході і виході осередку деформації до довжини дуги на вході (див. рис. 4): $\psi^{cp} = (\lambda R_n - \lambda r_g) / 2\lambda R_n = (R_n - r_g) / 2R_n$.

Радіуси R_n і r_g можна виразити через розміри інструменту і заготовки: $R_n = (R_{\kappa 3} - R_n) / \sin \lambda$; $r_g = (R_m - R_n) / \sin \lambda$. Тоді: $\psi^{cp} = (R_{\kappa 3} - R_m) / 2(R_{\kappa 3} - R_n)$

Формула для σ_{s5}^{cp} має вигляд:

$$\sigma_{s5}^{cp} = \sigma_b / (1 - \psi_w) \left[(R_{\kappa 3} - R_m) / 2(R_{\kappa 3} - R_n) \psi_w \right]^{\psi_w (1 - \psi_w)} \quad (40)$$

Перед 5 стадією метал вже отримав зміцнення σ_{s2}^{cp} на 2 стадії та σ_{s4}^{cp} на 4 стадії, які визначаються формулами (24) та (31) відповідно. Тоді результуюче істинне напруження на 5 стадії σ_{s5}^p визначається так:

$$\sigma_{s5}^p = \sigma_{s2}^{cp} + \sigma_{s4}^{cp} + \sigma_{s5}^{cp} \quad (41)$$

Для розрахунку максимального зусилля деформування на 5 стадії $P_{Д5}^{\max}$ необхідно встановити напруження σ_o в стінці товщиною S_k :

$$\sigma_o = \sigma_{r,\max}^p / \cos \lambda = \beta \sigma_s \left[(4\mu / \lambda + 2) \ln(R_{k3} / R_m) + (1 + \mu \cdot ctg \gamma) \ln(R_{k2} / R_{k3}) + \frac{2 + \mu \cdot ctg \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \ln \frac{R_{k1}}{R_{k2}} \right] / \cos \lambda \quad (42)$$

Тоді зусилля деформування на 5 стадії, яке треба прикласти до пуансону, можна визначити по наступній формулі:

$$P_{Д5}^{\max} = 2\pi R_n S_k \sigma_o = 6,9 R_n S_k \sigma_s^p \left[(4\mu / \lambda + 2) \ln(R_{k3} / R_m) + (1 + \mu \cdot ctg \gamma) \ln \frac{R_{k2}}{R_{k3}} + \frac{2 + \mu \cdot ctg \alpha}{\cos(\alpha - \gamma)} \ln \frac{R_{k1}}{R_{k2}} \right] / \cos \lambda \quad (43)$$

Радіуси R_{k1} , R_{k2} та R_{k3} можна визначити наступним чином:

$$R_{k1} \approx 0,45 D_3 [1]; R_{k2} = \sqrt{R_{k1}^2 \sin^2 \alpha + R_m^2}; R_3 = D_3 / 2; R_{k3} = R_m + S_\gamma^m$$

Висновки. Методом спільного вирішення наближених рівнянь рівноваги та умови пластичності проведений аналіз п'яти стадій формоутворення виробу комбінованим витягуванням в двоконусній матриці. Отримані аналітичні залежності для визначення напружень та зусилля деформування. На кожній наступній стадії враховані напруження, які виникають на попередній стадії. В рішенні враховане тертя та зміцнення здеформованого металу.

Література

1. Валиев С.А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых заготовок [Текст] / С.А.Валиев. – М: Машиностроение, 1973. – 176 с.
2. Калюжний О.В. Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю [Текст] / О.В. Калюжний // Обработка материалов давлением. Сб. научн. тр., Краматорськ, ДГМА, 2013. №4 (37). - С. 93-97.
3. Калюжний В.Л. Визначення оптимального кута вхідного конусу двоконусної матриці для комбінованого витягування вісесиметричних виробів [Текст] / В.Л. Калюжний, А.С. Запорожченко // Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: Полт. НТУ, 2013, Вип. 2(37). - С. 99-105.
4. Калюжний О.В. Зменшення зусилля та підвищення продуктивності формоутворення при комбінованому витягуванні вісесиметричних виробів [Текст] / О.В. Калюжний // Вісник НТУ «ХП», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» Харків, № 42'2013. - С. 126-131.
5. Калюжний О.В. Порівняльний аналіз ефективності процесу комбінованого витягування в двоконусній матриці та матриці спеціального профілю [Текст] / О.В. Калюжний // Обработка материалов давлением. Сб. научн. тр., Краматорск, ДГМА, 2014, № 1(38). – С. 32-37
6. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. Изд. 2-е перераб и доп.. М: Машиностроение, 1977. – 278 с.

© Калюжний О.В.

А.В. Калюжный, к.т.н., доцент
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

УТОЧНЕННАЯ ТЕОРИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ В ДВОКОНУСНОЙ МАТРИЦЕ

Методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия с приближенным условием пластичности проведенный анализ пяти стадий комбинированной вытяжки в двуконусной матрице. Получены аналитические зависимости для определения напряжений и усилия деформирования на стадии гибки заготовки в верхнем конусе матрицы, вытяжки заготовки в верхнем конусе матрицы, гибки заготовки на радиусе перехода верхнего конуса в нижний, вытяжки в нижнем конусе та утонения стенки на конечной стадии. В решении учтено утолщение заготовки при формоизменении, трение на контактных поверхностях и упрочнение сдеформированного металла.

Ключевые слова: *комбинированная вытяжка, уравнения равновесия, условие пластичности, трение, упрочнение сдеформированного металла, усилие деформирования*

UDK 621.983

A. V. Kalyuzhny Ph.D., Associate Professor,
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

REFINED THEORY OF THE COMBINED DRAWING PROCESS IN THE DOUBLECONE MATRIX

Common method of solving differential equations with approximate equilibrium condition plasticity analysis of five stages combined drawing in doublecone matrix. The analytical dependence for the determination of stresses and deformation force at the stage of bending the workpiece in the upper cone matrix, drawing blanks in the upper cone matrix bending radius of the workpiece on the upper cone, pulling the bottom cone and wall thinning in the final stage. In the decision was addressed thickening of the wall of the workpiece during forming, friction at the contacting surfaces and strengthen the deformed metal.

Keywords: *combined drawing, equilibrium equation, condition of plasticity, friction, enhancing deformed metal, deformation force*

КОЛЕБАНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ КОНСОЛЬНЫХ БОРШТАНГ ПРИ ТОНКОМ РАСТАЧИВАНИИ

В статье изучены динамические взаимодействия при растачивании двухступенчатых отверстий консольными борштангами, обнаруживается важная закономерность: при заданных полной длине борштанги и диаметрах ступеней минимальная амплитуда колебаний в случае работы более удаленным резцом и двумя резцами возникает при некотором соотношении длин ступеней, не соответствующим максимальной жесткости

Ключевые слова: вынужденные колебания, двухступенчатая борштанга, коэффициенты влияния, собственная частота.

Введение. Обработка точных отверстий деталей машин в настоящее время остается одним из наиболее сложных и трудоемких процессов. Применение этого процесса в значительной мере определяется возможностями операции тонкого растачивания, которое выгодно отличается от других методов обработки высокой точностью размеров и формы обработанных отверстий, правильным их расположением и высоким качеством расточенных отверстий.

Следует отметить, что большинство исследований по тонкому растачиванию проводилось в условиях одноступенчатой обработки отверстий одной шпиндельной головкой [1].

Обзор литературы. В литературе отсутствуют достаточно полные данные о влиянии многорезцовой и многошпиндельной обработки на точность формы поперечного сечения при тонком растачивании. Недостаточно изучены вопросы об оптимальных режимах резания и о динамических процессах, происходящих в станках в условиях концентрации операций и совмещения рабочих ходов.

Подробный анализ и классификация деталей, обрабатываемых на отделочно-расточных станках, в том числе по типам растачиваемых отверстий, приведены в работах [1, 2]. Результаты этих исследований и практика конструкторских бюро позволяют установить распределение растачиваемых отверстий по количеству ступеней обработки (табл. 1).

Таблица 1. Распределение отверстий, обрабатываемых на ОРС, по количеству ступеней.

Количество ступеней	1 (гладкое)	2	3	Более 3-х
Количество отверстий, %	81	15	3,5	0,5

Из обзора данных следует также, что двухступенчатыми борштангами оснащены ≈ 21 % станков для тонкого растачивания.

Цель работы. В настоящей работе изучены особенности колебаний двухступенчатых борштанг при одновременной и раздельной работе резцов. На рисунке 1 представлены технологические схемы растачивания двухступенчатыми борштангами, изучаемые в настоящей работе.

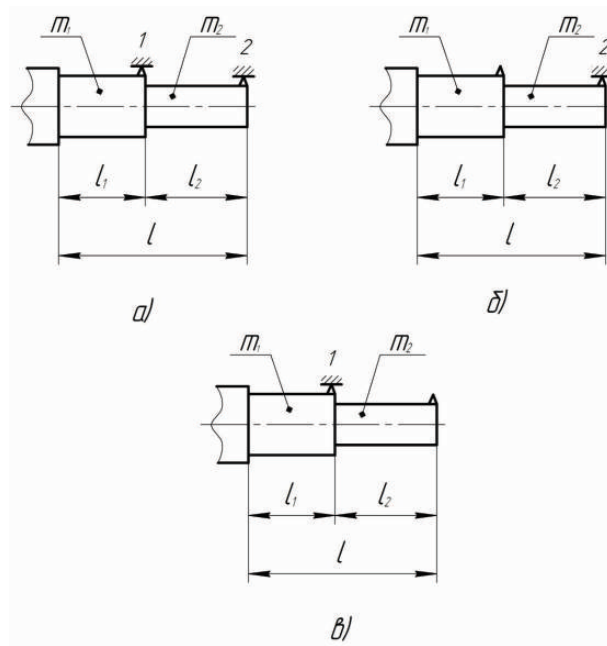


Рис. 1. Технологические схемы обработки

а) одновременная работа резцов №1 и №2; б) работает резец №2; в) работает резец №1.

Основной материал. Известные расчетные схемы шпиндельных узлов отражают вклад податливости шпинделя в перемещение у резца, а также влияние инерционных характеристик шпинделя на собственную частоту системы. Следует отметить, что при изучении влияния параметров консольных борштанг на характеристики подсистемы шпиндель – борштанга приходим к необходимости некоторых упрощений элементов расчетной схемы, отражающих параметры шпиндельной головки, т.к. они отражены в известных схемах [3] с излишней детализацией. Таким образом, расчетная модель подсистемы станка шпиндель – борштанга отражает:

зависимость параметров упругой системы от параметров борштанги;

результаты расчетов по расчетной схеме должны соответствовать экспериментальным данным по жесткости и собственной частоте упругой системы;

расчетная схема должна содержать внешние воздействия характерные для отделочно-расточного станка.

Поэтому для изучения вынужденных колебаний системы шпиндель – борштанга в зависимости от параметров борштанги, нами предложена расчетная модель (рис.2).

Здесь упругие характеристики шпинделя описываются параметрами EI_0 , ($н \cdot м^2$), l_0 , ($м$) – изгибная жесткость и длина консольной части шпинделя. C , ($н \cdot м$) – приведенная жесткость защемления в среднем сечении передней опоры, отображающая сопротивление изгибу опор и пролетной части шпинделя, m_0 , ($кг$) – инерционная характеристика шпинделя, задаваемая массой, приведенной к сечению фланца.

Характеристика борштанги:

EI_1 , ($н \cdot м^2$) – жесткость поперечного сечения первой ступени;

EI_2 , ($н \cdot м^2$) – жесткость поперечного сечения второй ступени;

v_0 , ($м$) – сумма толщин фланцев шпинделя и борштанги;

m_{np} , ($кг$) – инерционная характеристика борштанги, задаваемая

массой, приведенной к сечению второго резца;

v – характеристика демпфирования в упругой системе. Будем считать, что на упругую систему действует внешнее возмущение $P_0 \sin \omega t$ (ω – частота возмущения).

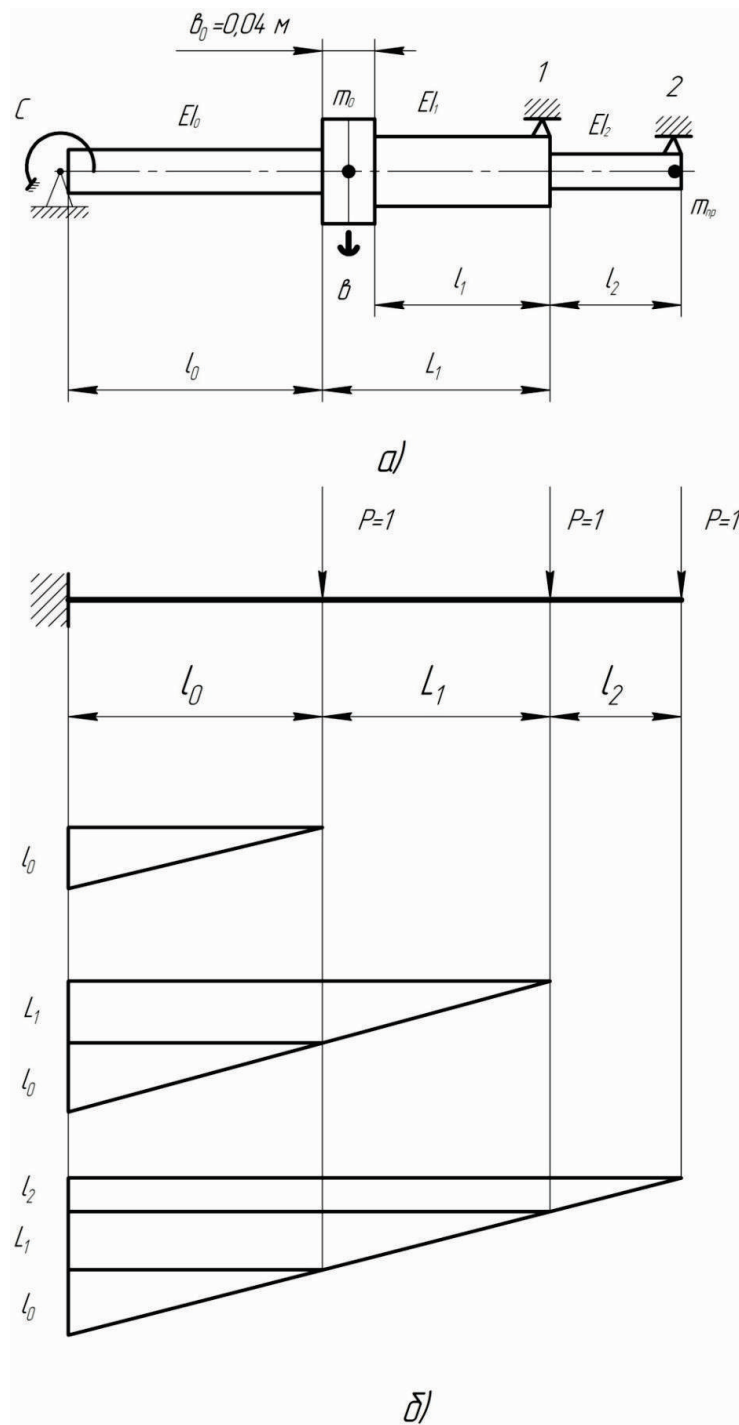


Рис. 2. а – схема расчетной модели; б – эпюры изгибающих моментов к расчету коэффициентов влияния

При расчете амплитуд колебаний учитывались максимальные возмущения $P_0 \sin \omega t$, действующие на борштангу от опор, вызванные погрешностями формы тел качения и дорожек наружного и внутреннего колец подшипника. Наиболее интенсивная гармоника имеет максимальную амплитуду A при силовом воздействии $P_0 = 4H$, которое в дальнейшем учитывается при расчете амплитуд вынужденных колебаний.

Уравнения для УДИС (универсальная диссипативно-инерционная система) составлены по методу сил и после элементарных преобразований представлены в прямой форме. Уравнения замкнутой динамической системы станка, учитывающие динамические характеристики процесса резания при одновременной работе двух резцов (рис. 1 а) имеют вид:

$$\begin{cases}
m_0 \ddot{y}_0 + b \dot{y}_0 + \frac{\delta_{22}}{\delta} y_0 - \frac{\delta_{02}}{\delta} y_2 = P_0 \sin \omega t + \frac{\delta_{01} \cdot \delta_{22} - \delta_{02} \cdot \delta_{12}}{\delta} P_{z1}; \\
m \ddot{y}_2 + \frac{\delta_{00}}{\delta} y_2 + \frac{\delta_{02}}{\delta} y_0 = P_{z2} + \frac{\delta_{00} \cdot \delta_{12} - \delta_{01} \cdot \delta_{02}}{\delta} P_{z1}; \\
T_p \dot{P}_{z1} + P_{z1} = -K_{p1} y_2 \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}}; \\
T_p \dot{P}_{z2} + P_{z2} = K_{p2} y_2, \\
\delta = \delta_{00} \cdot \delta_{22} - \delta_{02}^2, \\
m = m_{np} = 0,243 \cdot \left[m_1 \frac{l_1^3}{l^3} + m_2 \right].
\end{cases} \quad (1)$$

где: y_0 – колебательное перемещение массы m_0 ;

\ddot{y}, \dot{y} – вторая и первая производные по времени;

P_{z1}, P_{z2} – силы резания на соответствующих резцах;

T_p – инерционная постоянная стружкообразования;

K_{p1}, K_{p2} – коэффициенты резания на соответствующих резцах;

δ_{iK} – коэффициенты влияния определяемые по правилу Верещагина (рис. 2 б) с учетом угловых перемещений.

Коэффициенты влияния для всех случаев работы резцов имеют вид:

$$\begin{aligned}
\delta_{00} &= \frac{l_0^3}{3EI_0} + \frac{l_0^2}{c}; \\
\delta_{01} &= \frac{l_0^3}{3EI_0} + \frac{l_0^2}{c} + \left(\frac{l_0}{c} + \frac{l_0^2}{2EI_0} \right) \cdot L_1; \\
\delta_{11} &= \frac{l_0^3}{3EI_0} + \frac{(l_0 + L_1)^2}{c} + \frac{L_1 \cdot l_0^2}{EI_0} + \frac{L_1^2 \cdot l_0}{EI_0} + \frac{l_1^3}{3EI_1}; \\
\delta_{02} &= \frac{1}{EI_0} \cdot \left[\frac{l_0^2}{2} \cdot \left(l_2 + L_1 + \frac{2}{3} l_0 \right) \right] + \frac{l_0 (l_0 + L_1 + l_2)}{c}; \\
\delta_{22} &= \frac{1}{EI_0} \cdot \left[(L_1 + l_2) \cdot l_0 \cdot \left(L_1 + l_2 + \frac{l_0}{2} \right) + \frac{l_0^2}{2} \cdot \left(L_1 + l_2 + \frac{2}{3} l_0 \right) \right] + \\
&+ \frac{1}{EI_1} \left[l_2 \cdot l_1 \left(l_2 + \frac{l_1}{2} \right) + \frac{l_1^2}{2} \left(l_2 + \frac{2}{3} l_1 \right) \right] + \frac{l_2^3}{3EI_2} + \frac{(l_0 + L_1 + l_2)^2}{c}; \\
\delta_{12} &= \frac{1}{EI_0} \left[L_1 \cdot l_0 \left(l_2 + L_1 + \frac{l_0}{2} \right) + \frac{l_0^2}{2} \left(l_2 + L_1 + \frac{2}{3} l_0 \right) \right] + \\
&+ \frac{1}{EI_1} \left[\frac{l_1^2}{2} \left(l_2 + \frac{2}{3} l_1 \right) \right] + \frac{(l_0 + L_1) \cdot (l_0 + L_1 + l_2)}{c}.
\end{aligned}$$

Индексы коэффициентов влияния соответствуют номерации резцов и масс.

Решение системы уравнений (1) ищем в виде:

$$y_0 = a_{11} \cos \omega t + a_{12} \sin \omega t,$$

$$y_2 = a_{11} \cos \omega t + a_{12} \sin \omega t,$$

$$\begin{aligned}
y_0 &= a_{11} \cos \omega t + a_{12} \sin \omega t, \\
P_{z2} &= a_{41} \cos \omega t + a_{42} \sin \omega t.
\end{aligned}
\tag{2}$$

После подстановки (2) в (1) система алгебраических уравнений, для двух одновременно работающих резцов примет вид:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\delta_{22}}{\delta} - \omega^2 m_0 \right) \cdot a_{11} + b \cdot \omega \cdot a_{12} - \frac{\delta_{02}}{\delta} \cdot a_{21} - \frac{\delta_{01} \cdot \delta_{22} - \delta_{02} \cdot \delta_{12}}{\delta} \cdot a_{31} &= 0, \\
\left(\frac{\delta_{22}}{\delta} - \omega^2 m_0 \right) \cdot a_{12} - b \cdot \omega \cdot a_{11} - \frac{\delta_{02}}{\delta} \cdot a_{22} - P_0 - \frac{\delta_{01} \cdot \delta_{22} - \delta_{02} \cdot \delta_{12}}{\delta} \cdot a_{32} &= 0, \\
\left(\frac{\delta_{00}}{\delta} - \omega^2 m \right) \cdot a_{21} - \frac{\delta_{02}}{\delta} \cdot a_{11} - a_{41} - \frac{\delta_{00} \cdot \delta_{12} - \delta_{01} \cdot \delta_{02}}{\delta} \cdot a_{31} &= 0, \\
\left(\frac{\delta_{00}}{\delta} - \omega^2 m \right) \cdot a_{22} - \frac{\delta_{02}}{\delta} \cdot a_{12} - a_{42} - \frac{\delta_{00} \cdot \delta_{12} - \delta_{01} \cdot \delta_{02}}{\delta} \cdot a_{32} &= 0, \\
T_p \cdot \omega \cdot a_{32} + a_{31} &= -K_{p1} \cdot \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}} \cdot a_{21}, \\
-T_p \cdot \omega \cdot a_{31} + a_{32} &= -K_{p1} \cdot \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}} \cdot a_{22}, \\
T_p \cdot \omega \cdot a_{42} + a_{41} &= -K_{p2} \cdot a_{21}, \\
T_p \cdot \omega \cdot a_{41} + a_{42} &= -K_{p2} \cdot a_{22}, \\
\delta &= \delta_{00} \cdot \delta_{22} - \delta_{02}^2, \\
m = m_{np2} &= 0,243 \cdot \left[m_1 \frac{l_1^3}{l} + m_2 \right].
\end{aligned}
\tag{3}$$

Дифференциальные уравнения замкнутой динамической системы станка при работе наиболее удаленного от фланца резца (резец №2, рис 1 б) имеют вид:

$$\begin{cases}
m_0 \ddot{y}_0 + b \dot{y}_0 + \frac{\delta_{22}}{\delta} y_0 - \frac{\delta_{02}}{\delta} y_2 = P_0 \sin \omega t; \\
m \ddot{y}_2 + \frac{\delta_{00}}{\delta} y_2 + \frac{\delta_{02}}{\delta} y_0 = P_{z2}; \\
T_p \dot{P}_{z2} + P_{z2} = K_{p2} y_2,
\end{cases}
\tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\delta &= \delta_{00} \cdot \delta_{22} - \delta_{02}^2, \\
m &= m_{np2} = 0,243 \cdot \left[m_1 \frac{l_1^3}{l} + m_2 \right].
\end{aligned}$$

В случаи работы резца №1 (рис. 1 в) дифференциальные уравнения имеют вид:

$$\begin{cases}
m_0 \ddot{y}_0 + b \dot{y}_0 + \frac{\delta_{22}}{\delta} y_0 - \frac{\delta_{02}}{\delta} y_2 = P_0 \sin \omega t; \\
m \ddot{y}_2 + \frac{\delta_{00}}{\delta} y_2 + \frac{\delta_{02}}{\delta} y_0 = P_{z2}; \\
T_p \dot{P}_{z2} + P_{z2} = K_{p2} y_2,
\end{cases}$$

$$\delta = \delta_{00} \cdot \delta_{11} - \delta_{01}^2,$$

$$m = m_{np2} = 0,243 \cdot \frac{\left(m_1 \frac{l_1^3}{l^3} + m_2 \right) \cdot \delta_{22}}{\delta_{11}}. \quad (5)$$

Алгебраические уравнения для выражений (4) и (5) получаются аналогично случаю одновременной работы резцов №1 и №2.

Для решения системы алгебраических уравнений, соответствующих разным случаям тонкого растачивания двухступенчатыми борштангами составлена программа расчета для реализации на ПК. Расчеты проведены для двух глубин резания $t = 0,1$ мм и $t = 0,2$ мм. Расчитаны значения первой собственной частоты колебаний системы ω и резонансные значения амплитуд вынужденных колебаний в замкнутой динамической системе станка.

$$A(\omega_1) = \sqrt{a_{21}^2 + a_{22}^2}.$$

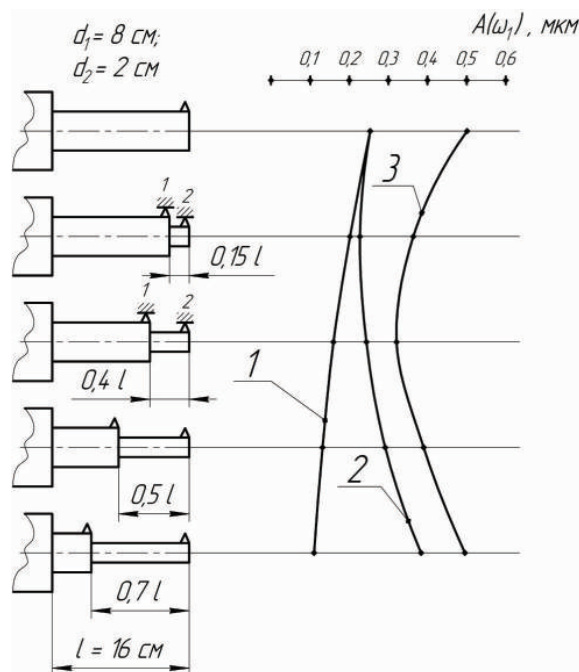


Рис. 3. Амплитуды колебаний резцов

Часть результатов расчетов представлена на рис. 3, 4 в виде зависимостей амплитуд вынужденных колебаний от размеров борштанги. Показаны амплитуда колебаний наиболее удаленного от фланца работающего резца при раздельной (ломанные 1, 2) и одновременной работе (ломанная 3) резцов. Рост амплитуд вынужденных колебаний с увеличением податливости отражает хорошо известное из опыта явление. При анализе результатов расчетов обнаруживается важная закономерность: при заданных полной длине борштанги и диаметрах ступеней минимальная амплитуда колебаний в случае работы более удаленным резцом и двумя резцами возникает при некотором соотношении длин ступеней, не соответствующим максимальной жесткости. Увеличение амплитуды колебаний с ростом длин ступеней, несущих резец №2 понятно, поскольку при этом уменьшается жесткость и собственная частота системы. Требуется специальных пояснений рост амплитуд при стремлении длины второй ступени к нулю. Этот эффект можно объяснить двумя причинами: убыванием собственной частоты системы и ростом коэффициента влияния, определяющего передачу возмущений с первого резца в сечение второго резца.

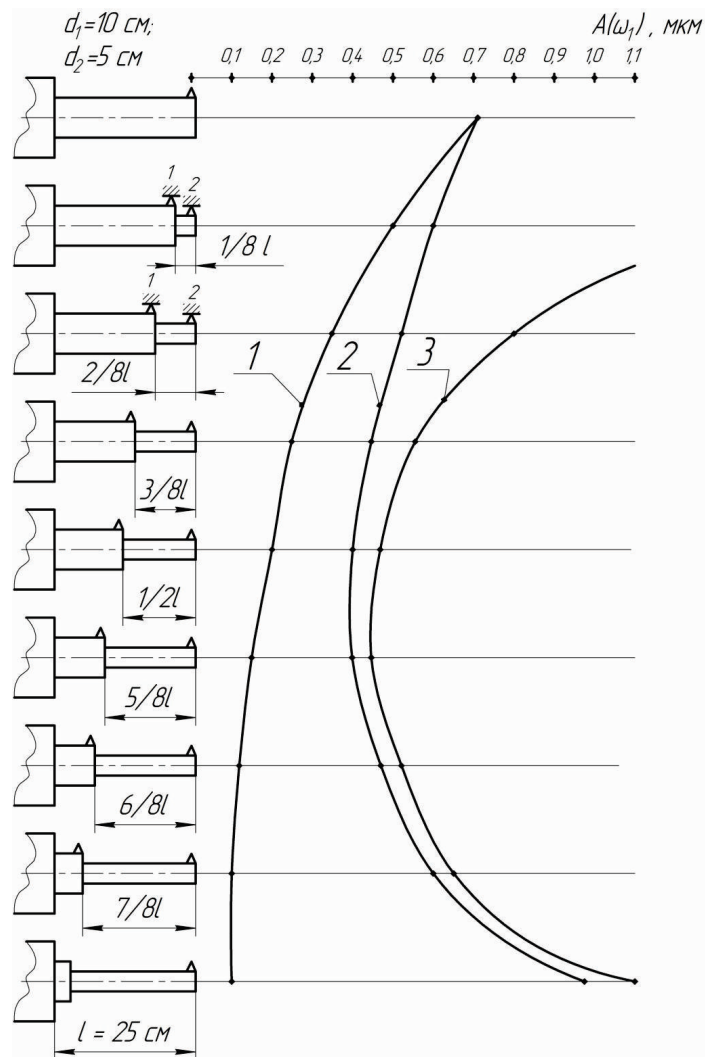


Рис. 4. Амплитуды колебаний резцов

Зависимость частоты от соотношения длин ступеней немонотонна. Изменение коэффициентов влияния, в частности, δ_{12} – также немонотонно зависит от соотношения длин ступеней. Увеличении значения δ_{12} при уменьшении длины l_2 приводит к тому, что влияние первого резца на второй значительно снижает запас устойчивости системы.

Выводы:

Анализ результатов расчетов амплитуд вынужденных колебаний консольных двухступенчатых борштанг показывает, что минимальная амплитуда колебаний при работе наиболее удаленного от фланца шпинделя резца, а также при одновременной работе двух резцов реализуется при некотором соотношении длин ступеней, не соответствующих максимальной жесткости борштанги.

С изменением соотношения длины ступеней собственная частота УДИС и коэффициенты влияния, характеризующих передачу возмущений от одного резца к другому, изменяются немонотонно, что приводит к снижению запаса устойчивости замкнутой динамической системы станка.

В условиях, когда запас устойчивости УДИС невелик, выбор технологической схемы обработки ступенчатого отверстия следует осуществлять с учетом результатов расчета колебаний, сопоставляя амплитуды колебаний при совместной и раздельной обработках ступеней отверстия.

Литература

1. П.А. Лінчевський та ін.. Обработка деталей на обробно-розточувальних верстатах / П.А. Лінчевський, Т.Г. Джугурян, О.А. Оргіян, за заг. ред.. П.А. Лінчевського. – К.: Техніка, 2000. – 300с. ISBN 966-575-048-8
2. Нормативы режимов резания и геометрия резцов для тонкого растачивания. Обработка на отделочно-расточных станках. Крупносерийное и массовое производство. НИИМаши., Москва 1979. – 93с.
3. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199с.
4. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1965.
5. Линчевский П.А., Оргиан А.А., Коболев В.М. Задачи динамики в технологии машиностроения // Вісн. інж. акад. України. – 2001. – №3 (Ч.2). – с. 32–36.

©А.В. Баланюк

УДК 621.952

А.В. Баланюк, асистент

Одеський національний політехнічний університет

КОЛИВАННЯ ДВОСТУПЕНЕВИХ КОНСОЛЬНИХ БОРШТАНГ ПРИ ТОНКОМУ РОЗТОЧУВАННІ

У статті вивчені динамічні взаємодії при розточуванні двоступеневих отворів консольними борштангами, виявляється важлива закономірність: при заданих повній довжині борштанги і діаметрах ступенів мінімальна амплітуда коливань в разі роботи понад віддаленим різцем і двома різцями виникає при деякому співвідношенні довжин ступенів, що не відповідає максимальній жорсткості

Ключові слова: *вимушені коливання, двоступенева борштанга, коефіцієнти впливу, власна частота.*

UDC 621.952

A.V. Balanyuk assistant

Odessa National Polytechnic University

VIBRATIONS TWO-STAGE CANTILEVER BORSHTANG AT THIN BORING

In this paper we study the dynamic interactions in boring holes-stage cantilever boring bar, revealed important pattern: for a given total length of the boring bar and the diameters of the steps the minimum amplitude of oscillations in the case of more distant cutter and two incisors occurs when a ratio of the lengths of the steps that do not meet the maximum hardness

Keywords: *forced vibrations, two-boring bar, the influence coefficients, the natural frequency*

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ
КОМБІНОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ДЕТАЛІ ТИПУ
ВАЛУ**

Стаття присвячена розробці технологій поверхневого зміцнення деталей машин типу валів шляхом створення комбінованих багатошарових зносостійких покриттів з заданими властивостями. Отримані результати представляють практичний інтерес для технологічних розробок, що забезпечують формування покриттів з необхідними експлуатаційними властивостями для різних умов роботи деталей машин, а також інформацію про можливість зміни властивостей покриттів. Нанесення електроіскрових покриттів збільшує експлуатаційну стійкість деталей машин в 3–6 разів.

Ключові слова: *поверхнєве зміцнення, деталі машин, електроіскрове легування, поверхнєве пластичне деформування, зносостійкі покриття.*

Постановка проблеми. Підвищення ефективності використання сучасної техніки в різних галузях промисловості можна досягнути продовженням її експлуатаційного ресурсу шляхом поверхневого зміцнення робочих поверхонь, а також її швидкий і якісний ремонт та відновлення деталей. Значний інтерес для практики становить метод електроіскрового легування (ЕІЛ), який відноситься до групи електрофізичних методів поверхневого зміцнення деталей машин. Основні переваги методу полягають в можливості переносу на поверхню, що обробляється, матеріалів високої твердості (твердих сплавів), в високій міцності зчеплення зміцненого прошарку з основою, нанесенні покриття без помітної деформації деталей. Значного ефекту можна досягти, використовуючи технології комбінованого зміцнення деталей машин з поєднанням ЕІЛ та поверхневого пластичного деформування (ППД). За допомогою комбінованого зміцнення з'являється можливість створення багатошарових зносостійких покриттів на робочих поверхнях деталей машин. При цьому вдається в значній мірі подолати недоліки кожного методу зміцнення, а також керувати властивостями покриття.

Режим обробки обкочуванням повинен бути оптимальним. В першу чергу це відноситься до зусилля обкочування (тиску кульки на деталь), подачі та кількості проходів. Визначення режимів обкочування ускладнюється тим, що залежність між ним та ступенем зміцнення та шорсткістю нелінійна. Деяка оптимізація по зусиллю для кульки 10 мм проведена в роботі [2]. Встановлено, що оптимальним для пластичних сталей є навантаження 200...350 кг. Збільшення тиску на поверхню приводить до порушення цілісності металу на поверхні та виникненню лущення поверхні. Твердість деталей при обкочуванні не повинна перевищувати 50 HRC.

По запропонованій технології формується зміцнений поверхневий шар, твердість якого на поверхні досягає 1200 HV. Його припрацювання супроводжується полірувальним ефектом.

Роль твердих часток, які знаходяться на робочій поверхні деталі або на поверхні ріжучої кромки штампу, не вичерпується їх високою зносостійкістю. Можна припустити, що вони блокують пластичну течію металу із зони контакту, де створюється високий тиск. Важливе значення має міцність з'єднання твердих часток з основним матеріалом. Матеріал деталі та тверді частки повинні працювати як єдине ціле, що можливо забезпечити комбінованими методами нанесення зносостійких покриттів. При ЕІЛ поверхні деталі твердим сплавом утворені структурні елементи, їх кількість та характер розташу-

вання залежить також від початкового структурного стану поверхневого шару, точніше від енергетичного стану атомів на поверхні. Він може бути змінений методами поверхневого пластичного деформування. Густина дислокацій, наприклад в сталі 45 після обкочування кулькою, збільшується на порядки. Якщо розглянути простір біля дислокації як простір з атомами підвищеної активності, то число зон підвищеної активності на поверхні збільшується в тисячі разів, що значно збільшує дифузійні процеси. По мірі збільшення пластичної деформації в металі відбувається створення блоків та їх розворот [3]. При дії електричного розряду в металі протікають процеси, які пов'язані з високошвидкісним нагрівом локальних зон до температур фазових перетворень, а можливо і до температур плавлення, з наступною кристалізацією та загартуванням. Відбувається дифузія елементів електроду в поверхневий шар деталі. В поверхневих шарах виникають структури у вигляді лінз, які залишаються білими після травлення [4].

Формулювання цілей. Метою статті є розробка технологій поверхневого зміцнення деталей машин типу валів шляхом створення комбінованих багатошарових зносостійких покриттів з заданими властивостями.

Основний матеріал та результати досліджень. В процесі виконання роботи були досліджені методи нанесення монопокриттів:

1. Електроіскрове легування (ЕІЛ).
2. Поверхнєве пластичне деформування (ППД) — обкатування роликком або кульою.

Окрім того, досліджувались комбіновані методи поверхневого зміцнення:

1. Електрофізичні методи та поверхнєве пластичне деформування:

– ППД + ЕІЛ твердосплавним електродом + ППД;

ППД + ЕІЛ + ППД + ЕІЛ міддю;

– багатократне нанесення покриття ЕІЛ + ППД + ЕІЛ + ППД (до 4 проходів) [1].

2. Поєднання різних видів електроіскрового легування:

– ЕІЛ графітовим електродом, наступне ЕІЛ твердосплавним електродом, ЕІЛ графітовим електродом та ЕІЛ мідним електродом;

– нанесення покриття в декілька прошарків шляхом проведення ЕІЛ різними режимами; – періодична обробка ЕІЛ в процесі зношування ріжучих кромки при роботі штампу.

Для лабораторної оцінки ефективності зміцнення використовували дослідження на машині тертя М-22М за схемою «вал-вкладиш» із охолодженням зразка водою (рис. 1).

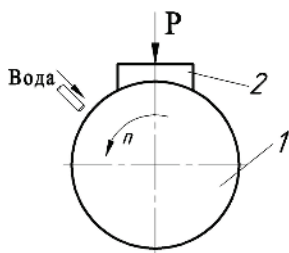


Рис. 1 – Схема випробувань на машині тертя М-22М:

1 – кільцевий зразок-вал; 2 – зразок-вкладиш;

P – сила притискування зразків; n – частота обертів зразка-валу

Дослідження показали збільшення зносостійкості відпаленої сталі У7 (HV 220...240) з комбінованим покриттям після пробігу 25 км — в 4 рази, при пробігу 50 км — в 2,5 рази (рис. 2), а загартованої сталі 45 (HV 337 та HV 420) з комбінованим покриттям після пробігу 22 км в 5 разів (рис. 3). Це свідчить, що на стадії припрацювання зносостійкість покриття значно вища, ніж на усталеній стадії.

Вплив комбінованого зміцнення, яке включає ЕІЛ та обкатування, на зносостійкість кільцевих зразків із сталі 45 приведені у вигляді графічних залежностей (рис. 4), що дозволяє порівняти їх ефективність.

На основі проведених досліджень був зроблений висновок, що зміцнення поверхні комбінованим покриттям за схемою ППД → ЕІЛ → ППД → ЕІЛ → ППД [1] дозволяє створити багатшарову структуру, підвищити твердість робочих поверхонь в 2–2,5 рази та зносостійкість поверхонь в 1,5–5 разів. При нанесенні комбінованого зносостійкого покриття за схемою ППД → ЕІЛ → ППД → ЕІЛ → ППД [1] виникають загартовані ділянки із багатшаровою структурою із загартованих та декілька разів перегагартованих об'ємів, в яких підвищений склад карбідів вольфраму та лінз.

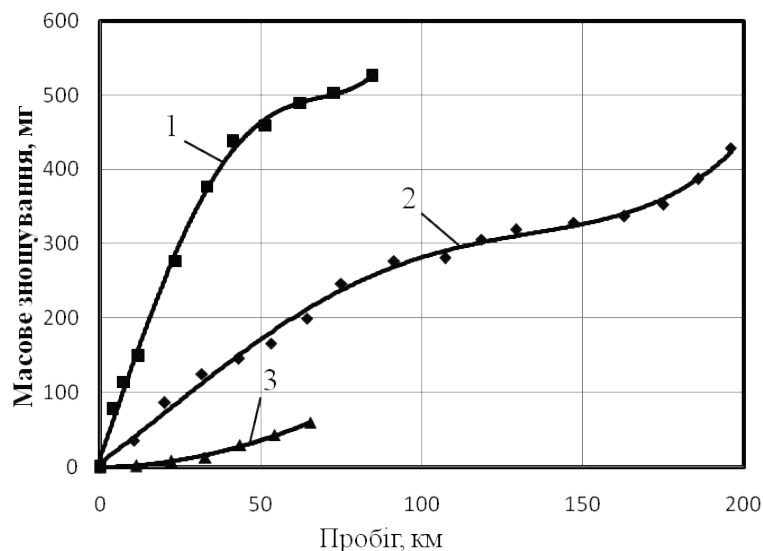


Рис. 2. – Залежність масового зношування зразків зі сталі У7 (HV 220...240) після комбінованої обробки (обкочування кулькою з зусиллям 1,6 кН, ЕІЛ та знову обкочування кулькою) від пробігу:

- 1 – зразок без обробки (P = 400 Н);
- 2 – зразок після обробки (P = 400 Н);
- 3 – зразок після обробки (P = 300 Н)

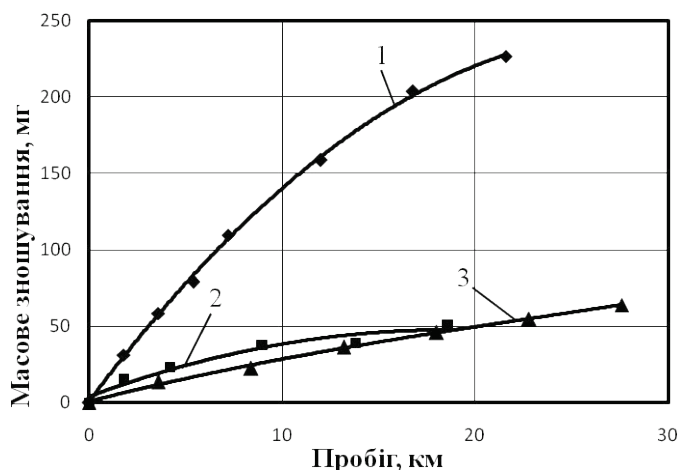


Рис. 3 – Залежність масового зношування зразків із сталі 45 після комбінованої обробки:

- 1 – зразок (HV 337) без обробки після випробувань при P = 500 Н;
- 2 – зразок (HV 337) після обробки та випробувань при P = 500 Н;
- 3 – зразок (HV 420) після обробки (P = 500 Н)

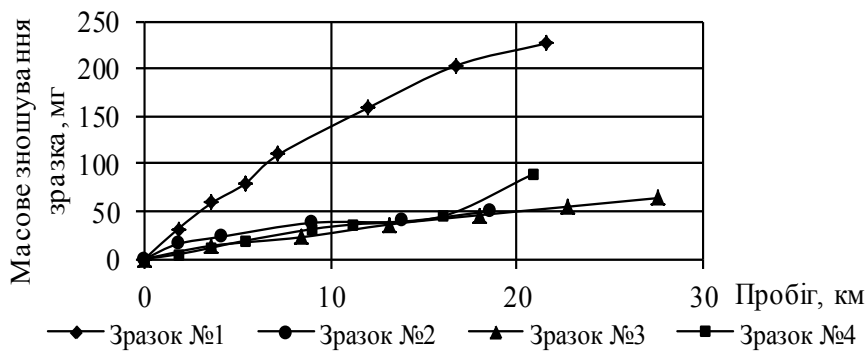


Рис. 4 – Дослідження впливу комбінованого зміцнення (ЕІЛ та обкатування) на зносостійкість кільцевих зразків із сталі 45:

- Зразок № 1 – HV 420; обкатування роликом (1,6 кН, 4 переходи).
 Зразок № 2 – HV 417; обкатування роликом (2,4 кН, 4 переходи) + обробка ЕІЛ механізоване (струм 5–6 А, 63 об/хв) + обкатування кулею (1,6 кН, 4 переходи).
 Зразок № 3 – HV 420; обкатування роликом (1,6 кН, 4 переходи) + обробка ЕІЛ механізоване (струм 7–8 А, 63 об/хв) + обкатування кулею (1,6 кН, 4 переходи).
 Зразок № 4 – HV 400; обкатування роликом (2,4 кН, 4 переходи) + обробка ЕІЛ механізоване + обкатування роликом (1,6 кН, 4 переходи)

В результаті була розроблена технологія підвищення зносостійкості деталей машин типу валів, гребенів колісних пар локомотивів, валів цементних фасувальних машин, яка включає попереднє поверхневе пластичне деформування кулькою за допомогою пристрою, який встановлюється в різцетримач токарно-гвинторізного верстату, механізоване ЕІЛ твердим сплавом за допомогою спеціальної головки, теж розташованої в різцетримачі.

Для механізованої обробки деталей типу тіл обертання розроблена технологія нанесення комбінованих зносостійких покриттів. В загальному вигляді така технологія включає наступні етапи [1]:

- підготовка деталей, що включає механічну обробку до кінцевих розмірів або до розмірів з припуском під шліфування;
- підготовка установки ЕІЛ-2 до роботи, що включає підбір оптимальних струмів, електродів та їх матеріалів;
- підготовка установки для ППД, що включає підбір оптимального зусилля;
- нанесення покриття проводиться пошарово:
 ППД → ЕІЛ → ППД → ЕІЛ → ППД
- робочий режим легування з контролем параметрів процесу та контролем сили притискання електроду;
- контрольні обміри деталі для визначення товщини отриманого покриття;
- остаточне шліфування деталі до отримання розмірів, потрібних по кресленням.

Розроблена технологія здійснюється за допомогою спеціально розробленого устаткування (рис. 5-8).

На рис. 5 представлена схема комплексу пристроїв для формування комбінованого зносостійкого покриття на деталях типу вал, тобто на тілах, що мають поверхню обертання. Основні складові частини цього комплексу (пристрій для обкочування кулькою та пристрій для механізованого нанесення ЕІЛ з обертанням електроду) встановлюються в різцетримач токарного верстату.

На рис. 6 зображена тривимірна модель-схема комплексу пристроїв для формування комбінованого зносостійкого покриття на деталях типу вал.

На рис. 7 та рис. 8 представлені тривимірні модель-схеми складових частин цього комплексу, а саме, пристрою для обкочування кулькою $\varnothing 10$ мм, а також пристрою для механізованого нанесення ЕІЛ з обертанням електроду.

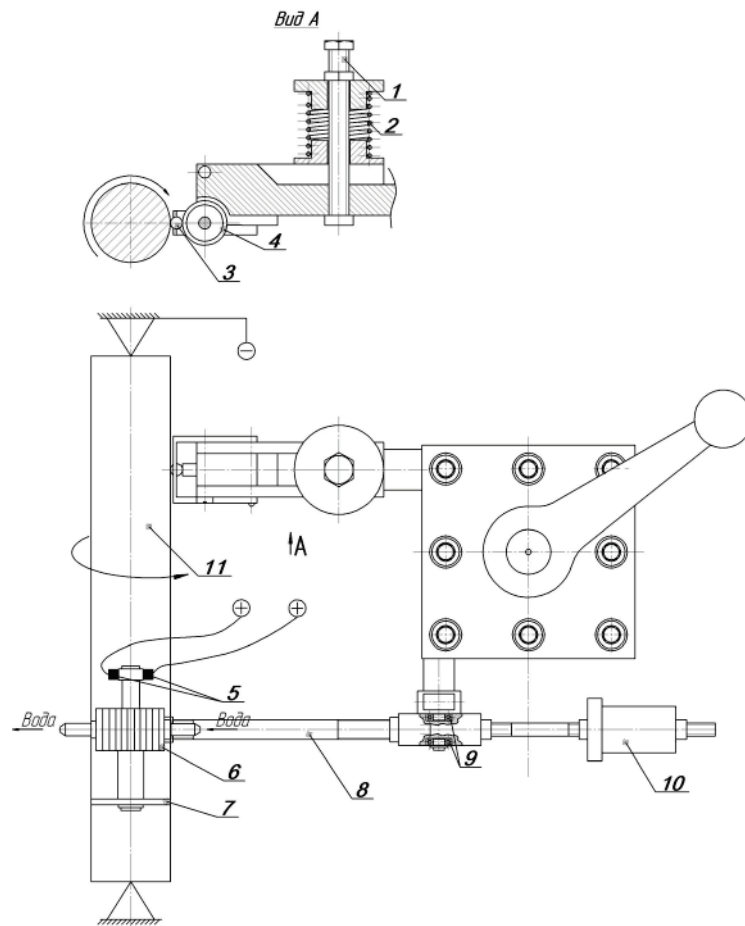


Рис. 5 – Схема установки для формування комбінованого зносостійкого покриття на валах:

- 1 – регулювальний гвинт; 2 – пружина; 3 – кулька; 4 – підшипник;
 5 – графітові щітки; 6 – радіатор; 7 – електрод; 8 – штанга; 9 – підшипники;
 10 – противага; 11 – деталь, що оброблюється (вал)

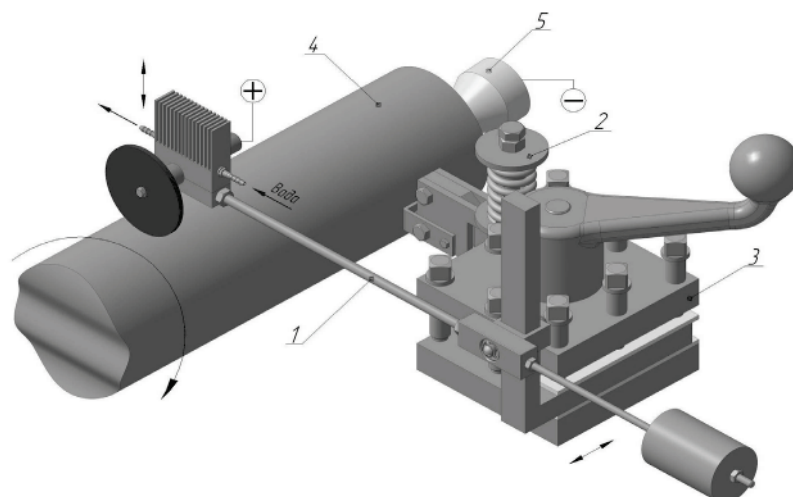


Рис. 6 – Тривимірна модель-схема установки для формування комбінованого зносостійкого покриття на деталях типу вал:

- 1 – пристрій для ЕІЛ; 2 – пристрій для обкочування;
 3 – супорт токарно-гвинторізного верстату; 4 – оброблювана деталь;
 5 – центр з електричним контактом

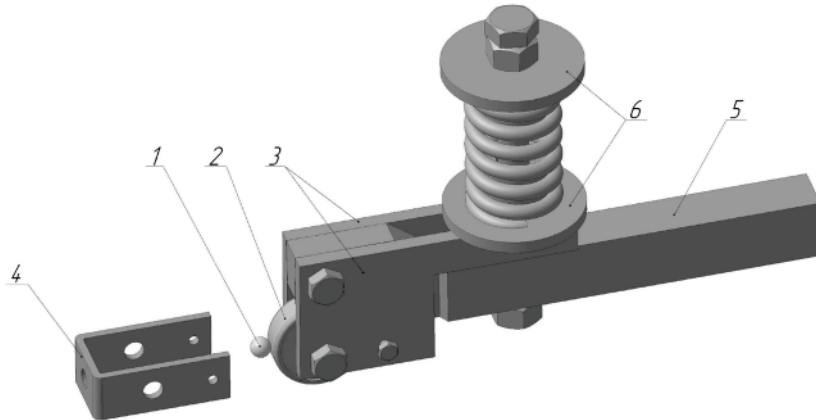


Рис. 7 – Тривимірна модель-схема пристрою для обкочування кулькою $\varnothing 10$ мм:
 1 – кулька; 2 – підшипник; 3 – важелі; 4 – тримач; 5 – корпус; 6 – шайби

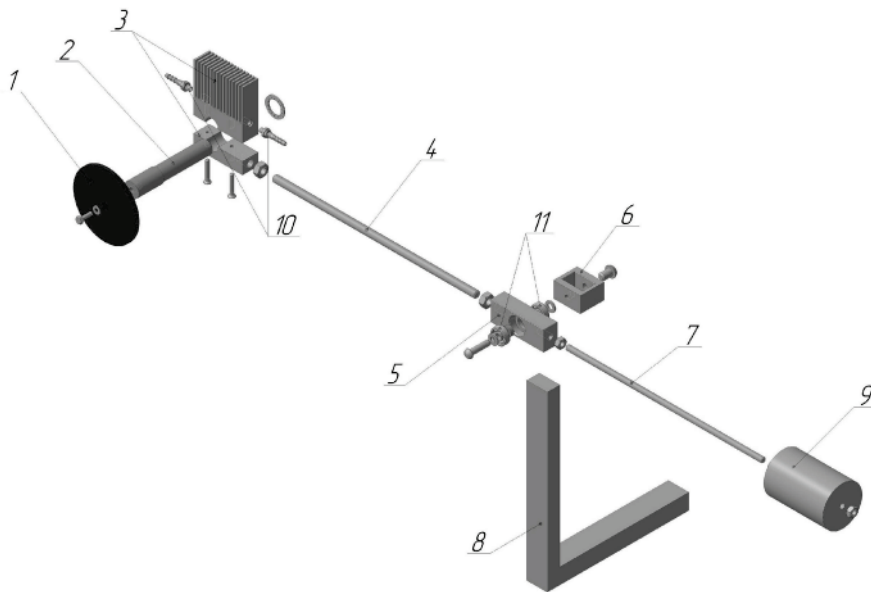


Рис. 8 – Пристрій для механізованого нанесення ЕІЛ з обертанням електроду:
 1 – електрод; 2 – вісь; 3 – радіатор; 4 та 7 – штанги; 5 – корпус;
 6 та 8 – деталі кріплення; 9 – противага; 10 – штуцери; 11 – підшипники

При багаторазовому повторному легуванні по технології: попереднє ППД обкочуванням кулькою – ЕІЛ твердим сплавом – ППД обкочуванням кулькою – ЕІЛ твердим сплавом – ППД обкочуванням кулькою виникають загартовані ділянки із багатошарової структури із загартованих та декілька разів перегагартованих об'ємів, в яких підвищений склад карбідів вольфраму та лінз. При пластичному деформуванні поверхневого шару відбувається деформування, подрібнення та утворення вторинних структур, які складаються з перенесених карбідів та основного матеріалу. Обкочування кулькою після ЕІЛ дає можливість проведення повторного ЕІЛ, збільшує товщину зміцненого шару та його щільність. У випадку високовуглецевих сталей багаторазове ЕІЛ та обкочування кулькою проводять до термообробки.

Для підвищення стійкості деталей машин типу валу в умовах виробництва розроблена технологія створення комбінованих покриттів за наступною схемою (з використанням ЕІЛ різними електродами, з вібрацією електроду):

– підготовка деталей, що включає механічну обробку до кінцевих розмірів або до розмірів з припуском під шліфування;

– підготовка установки ЕІЛ-2 до роботи, що включає підбір оптимальних струмів, розмірів і наступних матеріалів електродів: твердий сплав ВК15 і графітовий стержень з ЕД-75;

– нанесення твердого покриття проводиться пошарово: ВК15 → графіт → ВК15;

– робочий режим легування з контролем параметрів процесу: по струму споживання (0...20А) і напрузі (до 250 В), а також візуально по іскрі;

– електроіскрове шліфування зразка при тих же параметрах процесу із зміною полярності електроду і деталі;

– контрольні обміри деталі для визначення товщини отриманого покриття;

– обкатка роликком циліндричної або обтискання плоскої поверхні деталі до необхідних розмірів і чистоти поверхні не нижче 7 класу;

– остаточне шліфування деталі до отримання розмірів, потрібних за кресленням.

Висновки. 1. Отримані результати представляють практичний інтерес для технологічних розробок, що забезпечують формування покриттів з необхідними експлуатаційними властивостями для різних умов роботи деталей машин, а також інформацію про можливість зміни властивостей покриттів методом варіювання електродними матеріалами.

2. Нанесення електроіскрових покриттів збільшує експлуатаційну стійкість деталей машин в 3–6 разів.

Література

1. Патент на корисну модель № 40858 Україна, МПК В23Н 1/00. Спосіб електроіскрового зміцнення поверхні металів та сплавів / В. О. Маковей, Ю. П. Бородій, В. С. Куріхін (Україна) НТУУ. – № u2008 13977 ; заявл. 04.12.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8

2. Самсонов Г. В. Электроіскровое легування металічних поверхонь [Текст] / Г. В. Самсонов та ін. – К. : Наукова думка, 1976. – 220 с.

3. Шнейдер Ю. Г. Чистовая обработка металлов давлением [Текст] / Ю. Г. Шнейдер. – М. – Л. : ГНТИ машиностроительной литературы, 1963. – 263 с. : ил.

4. Бородій Ю. П. Экспериментальное исследование особенностей формирования поверхностного износостойкого слоя рабочих элементов разделительных штампов [Текст] / Ю. П. Бородій, В. А. Маковей // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – ПолтНТУ, 2013 – Вип. 2 (37). – С. 61-65.

© Ю. П. Бородій

УДК 621.979

Ю. П. Бородій, к.т.н., доцент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ ТИПА ВАЛА /

Статья посвящена разработке технологий поверхностного упрочнения деталей машин типа вала путем создания комбинированных многослойных износостойких покрытий с заданными свойствами. Полученные результаты представляют практический интерес для технологических разработок, которые обеспечивают формирование покрытий с необходимыми эксплуатационными свойствами для разных условий работы деталей машин, а также информацию о возможности изменения свойств покрытий. Нанесение электроискровых покрытий увеличивает эксплуатационную стойкость деталей машин в 3–6 раз.

Ключевые слова: *поверхностное упрочнение, детали машин, электроискровое легирование, поверхностное пластическое деформирование, износостойкие покрытия.*

UDC 621.979

*Yu. P. Borodiy, PhD, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR CAUSING
OF THE COMBINED WEARPROOF COVERAGES ON DETAIL OF TYPE
OF BILLOW**

The article is devoted development of technologies of the superficial strengthening of details of machines as billows by creation of the combined multi-layered wearproof coverages with the set properties. The got results present practical interest for technological developments which provide forming of coverages with necessary operating properties for the different terms of work of details of machines, and also information about possibility of change of properties of coverages. Causing of electro-spark coverages increases operating firmness of details of machines in 3-6 times.

Keywords: *superficial strengthening, details of machines, electro-spark alloying, superficial flowage, wearproof coverages.*

СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА РІЖУЧИХ КРОМКАХ НОЖІВ ДЛЯ РІЗАННЯ ДРОТУ

Метою статті є проведення комплексних досліджень зношування комбінованих зносостійких покриттів, що включають їх натурні випробування при різанні дроту в штампі-автоматі, оцінку ефективності зносостійких покриттів, їх вплив на стійкість ножів, аналіз напружено-деформованого стану ножів та особливостей механізмів зношування ріжучих елементів. Запропонована методика та створена установка для проведення порівняльних випробувань різних зносостійких покриттів на ножках для різання дроту. Натурні дослідження при різанні дроту в автоматичному режимі роботи пресу та вивчення впливу зносостійких покриттів показали підвищення стійкості ножів у 2-3,5 рази. Встановлено співпадання розподілу напружень в верхньому та нижньому ножках з характером їх зношування, що повністю підтверджує достовірність результатів чисельного моделювання та правильність обраних розрахункових схем. Для дослідження особливостей процесу зношування, описання механізмів зношування, визначення параметрів процесу зношування були проведені фрактографічні дослідження ножів.

Ключові слова: ножі, різання дроту, стійкість, комбіновані зносостійкі покриття, завузь, ріжучі кромки, напружено-деформований стан.

Вступ. В сучасних умовах ринкової економіки підвищується попит на конкурентноспроможну промислову продукцію, сучасні технічно досконалі вироби. Це вимагає систематичного і швидкого їх впровадження у виробництво, підвищення продуктивності та якості виробів. Одним з основних шляхів підвищення продуктивності праці в металообробній промисловості є застосування холодного листового та об'ємного штампування – найбільш прогресивних методів обробки металів тиском.

Економічна доцільність застосування холодного штампування тісно пов'язана з вартістю штампів, що припадає на одиницю виробу, величина якої в основному обумовлена їх стійкістю. Висока стійкість штампів – основна умова рентабельності роботи штампувальних цехів. Від неї в значній мірі залежать якість та собівартість штампованих виробів. Початкові витрати на штампувальний інструмент складають близько 15-25 % від загальної собівартості продукції. Потрібно також враховувати тенденцію до здорожчення інструментальних і штампових сталей.

Досягнення високої міцності та зносостійкості поверхні робочих деталей штампів у великій мірі залежить від вихідних властивостей поверхневих прошарків, сформованих при їх виготовленні за допомогою зміцнюючих технологій – термічної, хіміко-термічної, електроіскрової, лазерної та іншими.

Постановка завдання. Метою роботи є проведення комплексних досліджень зношування комбінованих зносостійких покриттів, що включають їх натурні випробування при різанні дроту в автоматичному режимі роботи пресу, оцінку ефективності зносостійких покриттів, їх вплив на стійкість ножів, аналіз напружено-деформованого стану ножів та особливостей механізмів зношування ріжучих елементів.

Основний матеріал та результати. Для проведення експериментальних досліджень стійкості ріжучих елементів була розроблена методика натурних випробувань на стійкість ріжучих кромки розділових штампів при різанні дроту та методика оцінки зносостійкості. У зв'язку з цим виникла необхідність порівняльної оцінки впливу різних способів зміцнюючої обробки при натурних випробуваннях. Для перевірки стійкості ріжучих елементів

штампів з комбінованим зносостійким покриттям була спроектована та виготовлена установка (рис. 1) для різання дроту [1].

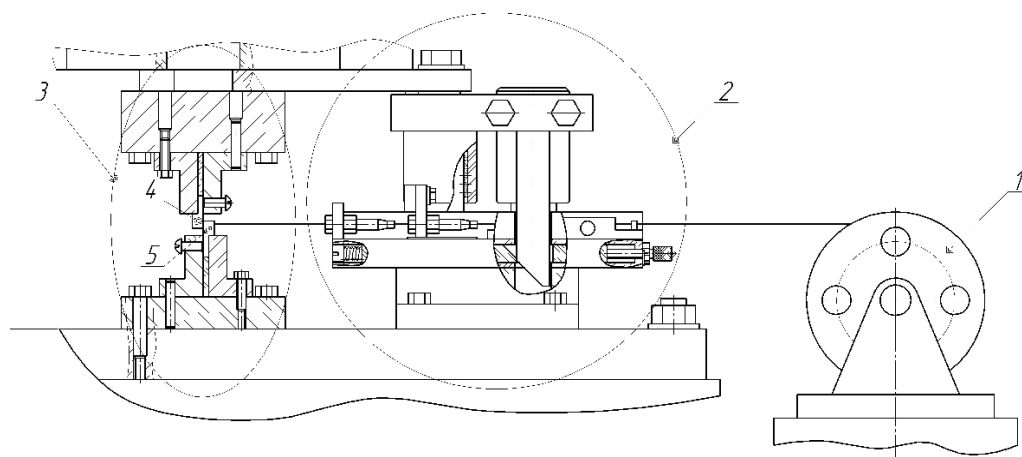


Рис. 1. Схема установки для випробувань на стійкість ножів: 1–бухта з дротом, 2–автоматична подача, 3–штамп для різання дроту, 4–верхній ніж, 5–нижній ніж

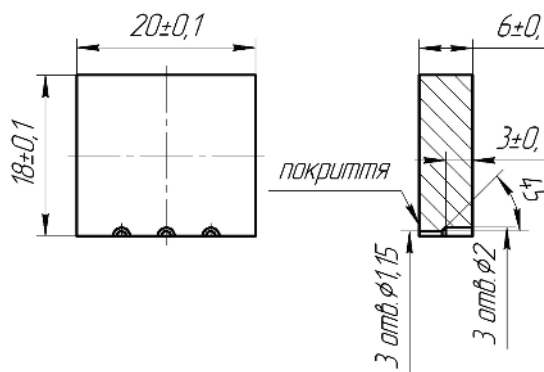


Рис. 2. Конструкція верхнього ножа

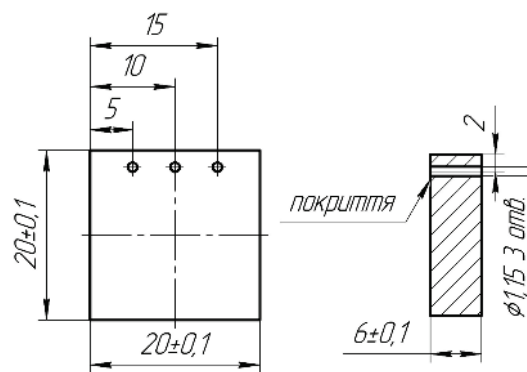


Рис. 3. Конструкція нижнього ножа

Випробувальна установка встановлюється на механічний однокривошипний відкритий прес моделі КД 2322 номінальним зусиллям 160 кН та з номінальним числом ходів 120 ход/хв. Штамп і подача узгоджені в своїй роботі.

Випробування проводились на ножах (рис. 2 та рис. 3) з різних матеріалів, у тому числі із сталі ШХ 15 (HRC 61...63) до та після нанесення комбінованих зносостійких покриттів. Дослідження проводились при різанні сталюго дроту $\varnothing 1$ мм. Основним параметром, за яким оцінювалась стійкість ножів, була величина завусеня на дроті, що відрізається. Величина завусеня вимірювалась на інструментальному мікроскопі в процесі роботи ножів (через 1-3 тис. циклів різання дроту). При досягненні граничної величини завусеня, яка складає 10% від діаметра дроту (0,1 мм) випробування припинялись. Таким чином, за кількістю штампоударів, необхідних для досягнення граничної величини завусеня (0,1 мм), оцінювалась стійкість ножів, зміцнених різними способами [2-3].

За результатами випробувань побудовані графічні залежності (рис. 4) абсолютної величини завусеня (мм) від кількості штампоударів для пари ножів (верхній та нижній), виготовлених із сталі ШХ 15-ШД загартованої. Загартування велось шляхом нагріву до температури 880 градусів Цельсія і зануренням в мастило. Замірювалась мікротвердість ножів після загартування, вона складала HV 674...741 для верхнього ножа та HV 706...733 для нижнього ножа.

Як видно з графіка, завусень повільно зростає при числі циклів до 5 тис. Зростання завусеня носить характер, близький до лінійного. При числі циклів від 5 до 10 тисяч завусень зростає значно швидше, і при третьому та четвертому випробуваннях досягає грани-

чних значень (0,1 мм та більше). При подальшій роботі ножів спостерігалась найбільша інтенсивність росту завусеня, що призвело до закінчення випробувань (завусень досягав 0,12-0,2 мм).

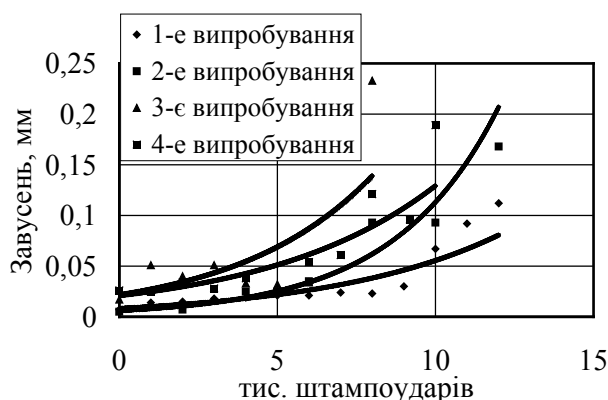


Рис. 4. Результати випробувань ножів із сталі ШХ 15 загартованої (верхній ніж HV 674...741, нижній ніж HV 706...733)

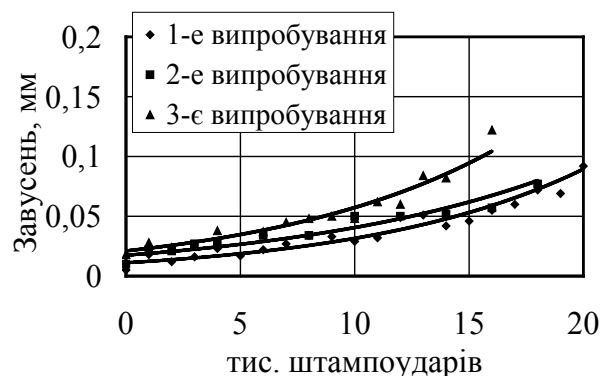


Рис. 5. Результати випробувань ножів із сталі ШХ 15, зміцненої нітридом хрому (верхній ніж HV 883, нижній ніж HV 947)

тродом ВК20, а потім – графітовим електродом. Досягнуто середнє значення твердості ножів HV 1124. В процесі роботи штампу ножі виконали 14 тис. штампоударів на цьому отворі.

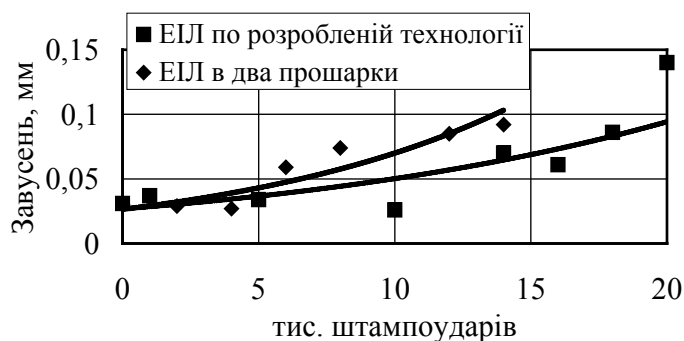


Рис. 6. Результати випробувань ножів із сталі ШХ 15, зміцненої електроіскровим легуванням (HV 1080-1120)

За результатами натурних випробувань побудовані графічні залежності (рис. 5) абсолютної величини завусеня (мм) від кількості штампоударів для пари ножів, виготовлених із сталі ШХ 15-ШД та поверхнево зміцнених нітридом хрому. Середнє значення мікротвердості ножів після зміцнення складо HV 883 для верхнього ножа та HV 947 для нижнього ножа.

Аналізуючи графічну залежність, слід відмітити, що характер росту завусеня близький до лінійного при числі циклів до 15-20 тисяч. Крім того, відсутня стадія інтенсивного росту завусеня. При досягненні 20 тисяч циклів у першому та другому випробуваннях не була досягнута навіть гранична величина завусеня 0,1 мм. Це дає змогу стверджувати, що обробка робочих поверхонь ножів нітридом хрому приводить до підвищення їх стійкості в 2-3 рази у порівнянні із традиційним загартуванням.

Була досліджена стійкість ножів із сталі ШХ 15-ШД (верхній ніж HV 674...741, нижній ніж HV 706...733), зміцнених електроіскровим легуванням (ЕІЛ). Перший отвір обох ножів зміцнений комбінованим способом, що включав проведення електроіскрового легування в два прошарки: спочатку твердосплавним елек-

тродом ВК20, а потім – графітовим електродом. Досягнуто середнє значення твердості ножів HV 1124. В процесі роботи штампу ножі виконали 14 тис. штампоударів на цьому отворі.

Другий та третій отвори цієї пари ножів були зміцнені електроіскровим легуванням твердосплавним електродом ВК20 за розробленою раніше технологією (режим з вібрацією електроду, струм в імпульсі 30-35 А). Середнє значення мікротвердості цих ножів HV 1081. В процесі роботи ножі виконали по 20 тис. штампоударів на другому та третьому отворах.

За результатами цих випробувань побудовані залежності (рис. 6)

абсолютної величини завусеня (мм) від кількості штампоударів для цієї пари ножів, що дозволяє зробити наступні висновки. Швидкість росту завусеня помітно уповільнилась в порівнянні з традиційним загартуванням ножів. Величина завусеня 0,1 мм досягається при 16-18 тисяч циклів роботи ножів.

Це приблизно в два рази менше, ніж при загартуванні, та наближається до показників ножів, зміцнених нітридом хрому. Випробування ножів, зміцнених ЕІЛ за традиційною технологією, показали наявність стадії інтенсивного росту завусеня при 16-20 тис. штампоударів. Разом з тим, слід відмітити достатньо велике значення початкового завусеня (0,03-0,035 мм), що пояснюється підвищенням шорсткості поверхні ножів після ЕІЛ. Для зниження цього явища застосовувалось шліфування поверхні ножів після ЕІЛ.

Результати проведених досліджень дозволили оцінити залежність росту завусеня від ефективності поверхневого зміцнення ножів. За оціночний параметр взята швидкість росту завусеня, що обчислюється в міліметрах абсолютного розміру завусеня, віднесених до кількості циклів (штампоударів), протягом яких цей завусень сформувався.

На рис. 7 показана залежність швидкості росту завусеня від середнього значення твердості ножів, досягнутої різними методами поверхневого зміцнення.

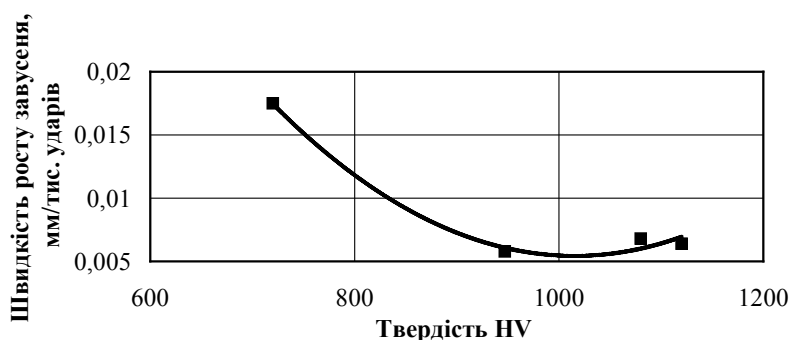
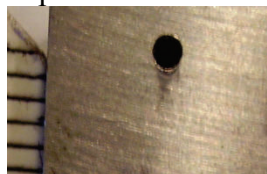


Рис. 7. Залежність швидкості росту завусеня від твердості ножів

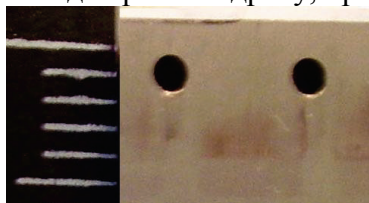
При підвищенні твердості з HV 750 до HV 950 спостерігається стрімке лінійне уповільнення росту завусеня з 0,018 до 0,006-0,007 мм/тис. циклів, тобто у 2,5-3 рази. При твердостях HV 950...1100 швидкість росту завусеня стабілізується на рівні 0,006-0,007 мм/тис. циклів.

Зовнішній вигляд но-

жів, зокрема їх частини з отворами для різання дроту, представлений на рис. 8 (а, б, в).



а) нижній ніж загартований із слідами зношування



б) нижній ніж, зміцнений нітридом хрому, із слідами зношування



в) верхній ніж, зміцнений ЕІЛ, із слідами зношування

Рис. 8. Вигляд ножів для різання дроту

В ході подальших досліджень різні пари ножів для різання дроту були зміцнені наступними способами:

- №1 – комбінованою обробкою ріжучої кромки, яка включає загартування, нанесення нітриду хрому, азотування, повторне загартування.

- №4 – початкова обробка ріжучої кромки методом ЕІЛ за розробленою технологією, а потім періодична обробка методом ЕІЛ по мірі зношування ріжучої кромки (через 2-5 тис. циклів роботи).

На рис. 9 представлені графічні залежності величини завусеня від кількості робочих циклів при різних способах зміцнення ріжучої кромки. Для порівняння на графіку представлені наведені раніше результати (див. рис. 5):

- №2 – ножі із сталі ШХ 15 (HRC61...63), зміцнені комбінованою обробкою, яка включає проведення ЕІЛ в два прошарки спочатку твердосплавним, а потім графітовим електродом;

- №3 – обробка ріжучої кромки методом ЕІЛ за розробленою раніше технологією.

Аналізуючи останні залежності, можна зробити висновок, що вказані вище методи зміц-

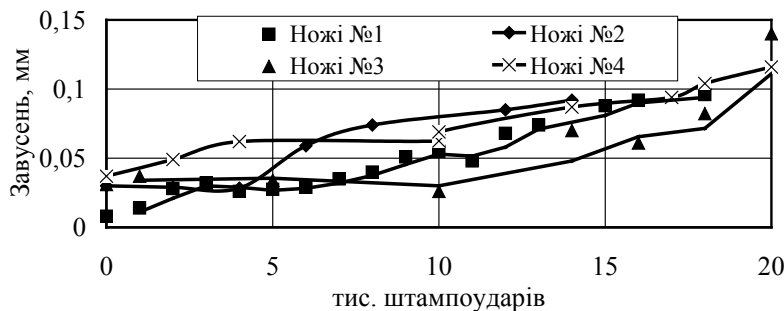


Рис. 9. Вплив зміцнення ріжучої кромки різними методами на стійкість розділових штампів

нення ріжучих кромок дозволяють підвищити стійкість ножів у 2-3 рази у порівнянні з традиційним загартуванням ножів [2-3].

Для підвищення стійкості ріжучих елементів штампів в умовах виробництва розроблена техноло-

гія створення комбінованих покриттів з використанням ЕІЛ спочатку твердим сплавом, потім графітовим електродом, знову ЕІЛ твердим сплавом та графітом.

Результати дослідження стійкості ножів з вказаним покриттям приведені на рис. 10. Проведені дослідження показали збільшення стійкості ножів в 2 рази.

Відомо, що ріжучі кромки ножів для різання дроту експлуатуються в складних умовах циклічного навантаження з концентрацією напружень на кромках. Ці напруження досягають значних значень, що приводить до змінання, зношування та викришування кромок [4-6]. Визначенню розподілу напружень в ріжучих кромках присвячена значна кількість робіт, в яких [7] для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) ріжучих кромок та заготовки використовувались експериментально-розрахункові підходи, які засновані на методі ліній ковзання. При цьому залишалось маловивченим, які діють сили та виникають напруження в процесі різання матеріалу.

З однієї сторони, вважають існування високих розтягуючих напружень в області

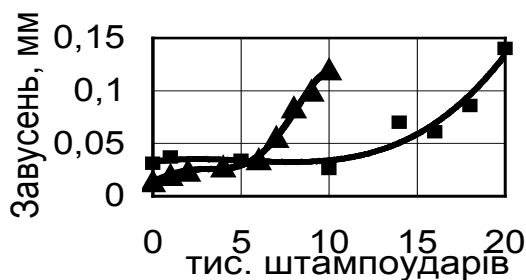


Рис. 10. Стійкість ножів із сталі ШХ-15шд після зміцнення комбінованим електроіскровим легуванням твердим сплавом ВК-15 та графітом: до та після зміцнення

кромки [6], які призводять до руйнування втому, з іншої сторони, вказують [7], що на ріжучі кромки діють високі напруження стиску, які приводять до їх змінання. Знання цих даних необхідне для розробки методів підвищення стійкості ріжучих кромок.

В ході виконання роботи була зроблена оцінка методом скінчених елементів параметрів процесу різання дроту ножами: зусилля, розподілу напружень в ріжучих кромках ножів.

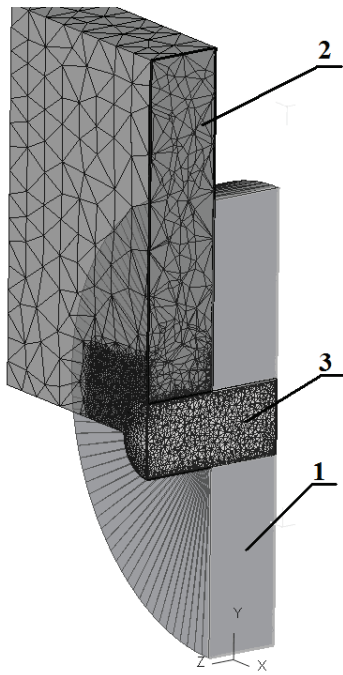


Рис.11. Розрахункова схема системи нерухомий ніж – дрiт – рухомий ніж:

- 1 – нижній (нерухомий) ніж;
- 2 – верхній (рухомий) ніж;
- 3 - дрiт

Дуже важливим є правильний вибір розрахункової схеми, від якої залежать чисельні значення величин, що визначаються, а також достовірність їх визначення. В цьому випадку для моделювання системи нерухомий ніж – дрiт – рухомий ніж (рис. 11) був залучений програмний пакет Deform-2d. Параметрами для дослідження різання дроту ножами виступають: діаметр дроту, рівний 1 мм; коефіцієнт тертя, рівний 0,1; фізико-механічні властивості матеріалу та параметри скінченно-елементної сітки. На кінцевій стадії процесу розділення, коли відбувається руйнування матеріалу, при використанні для моделювання методу скінченних елементів (МСЕ) використовувався критерій руйнування *normalized Cockcroft–Latham*, який передбачений в програмному пакеті Deform – 2d.

На рис. 12 наведено порівняння результатів чисельного моделювання процесу різання дроту ножами (а) з фрактографічними дослідженнями (б) зношування нижнього нерухомого ножа, виготовленого із сталі ШХ15 з покриттям нітридом хрому (HV 947) після 16 тис. штампоударів.

Для дослідження особливостей процесу зношування, описання механізмів зношування, визначення параметрів процесу зношування були проведені фрактографічні дослідження ножів для різання дроту.

В процесі обробки фрактографій досліджувалися геометричні параметри зони зношування ножів. В якості таких параметрів визначались: абсолютні висота та ширина зони зношування в міліметрах, а також площа зони зношування. Вимірювання цих параметрів здійснювалось за допомогою графічних програм. Для прикладу на рис. 13-14 показані результати вимірювань для нижнього ножа, виготовленого із сталі ШХ15 з покриттям нітридом хрому (HV 947).

За результатами досліджень побудовані графічні залежності висоти (рис. 15) та площі (рис. 16) зони зношування від абсолютної величини завусеня.

Оскільки кожен з ножів виконав різну кількість робочих циклів, то для порівняльної оцінки стійкості ножів, зміцнених різними способами, використовувались наступні параметри:

1) Швидкість росту завусеня (мм/тис. ударів) визначалась, як абсолютна величина завусеня, поділена на кількість штампоударів, при якій утворився даний завусень.

2) Питома висота зони зношування (мм/тис. ударів) визначалась як абсолютна висота зони, віднесена до кількості штампоударів.

3) Питома площа зони зношування (мм²/тис. ударів) визначалась як абсолютна величина площі зони зношування, віднесена до кількості штампоударів.

За результатами досліджень та розрахунків побудовані графічні залежності питомої висоти (рис. 17) та питомої площі (рис. 18) зони зношування від середнього значення твердості ножів [3,8].

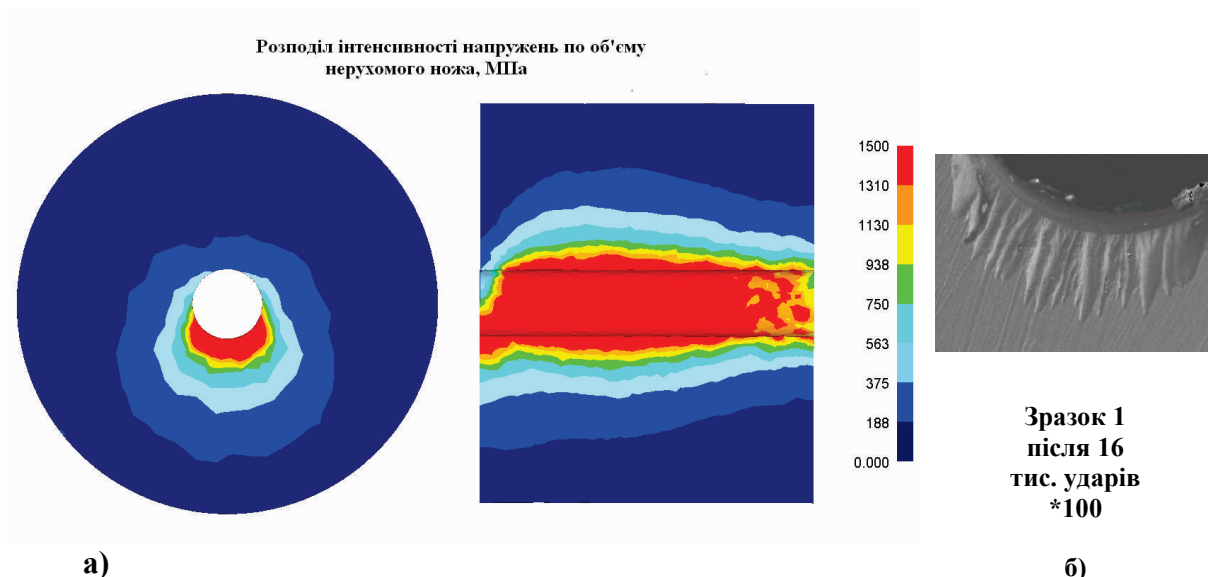


Рис. 12. Порівняння результатів чисельного моделювання процесу різання дроту ножами (а) з фрактографічними дослідженнями, (б) зношування нижнього нерухомого ножа, виготовленого із сталі ШХ15 з покриттям нітридом хрому (HV947) після 16 тис. штампоударів

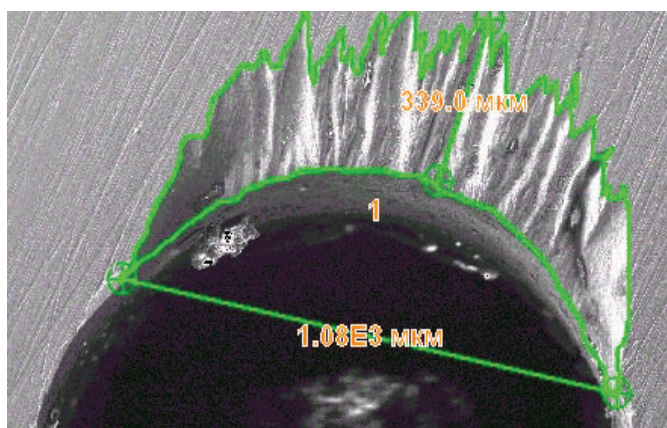


Рис. 13. Параметри зони зношування (висота та ширина) нижнього ножа (отвір 1 після 16 тис. ударів) *40

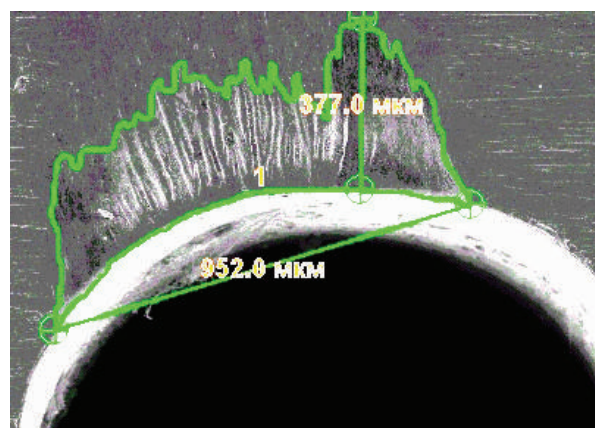


Рис. 14. Параметри зони зношування (висота та ширина) нижнього ножа (отвір 2 після 18 тис. ударів) *40

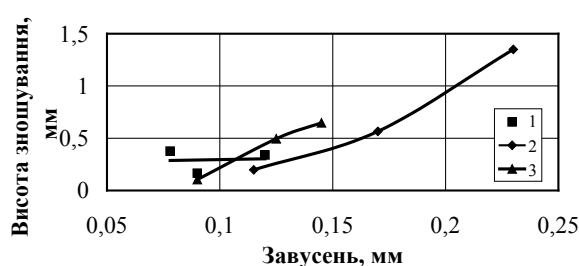


Рис. 15. Залежність висоти зони зношування (мм) від абсолютної величини завусеня

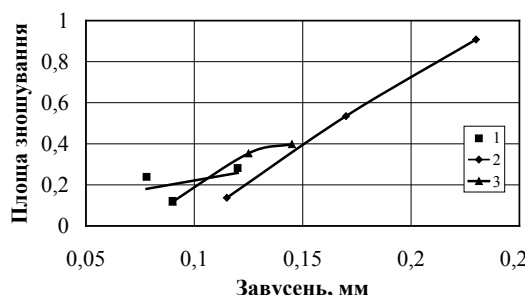


Рис. 16. Залежність площі зони зношування (мм²) від абсолютної величини завусеня

- 1 – нижній ніж, виготовлений із сталі ШХ15 з покриттям нітридом хрому (HV 947);
 2 – нижній ніж із сталі ШХ15 з загартуванням до HV 706...733 (12 тис. штампоударів);
 3 – верхній ніж із сталі ШХ15 з загартуванням до HV 674...741

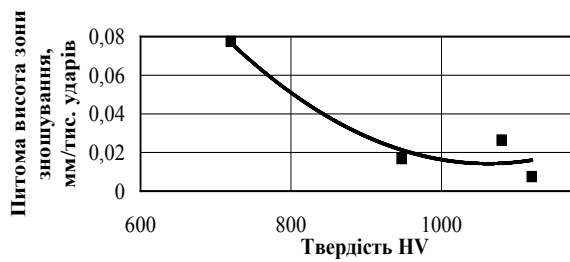


Рис. 17. Залежність питомої висоти зони зношування від твердості ножів

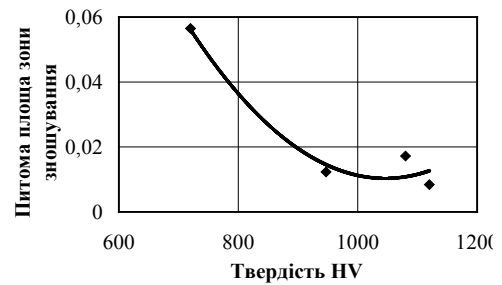


Рис. 18. Залежність питомої площі зони зношування від твердості ножів

Висновки. 1. Запропонована методика та створена установка для проведення порівняльних випробувань різних зносостійких покриттів на ножах для різання дроту; 2. Натурні дослідження при різанні дроту в автоматичному режимі роботи пресу та вивчення впливу зносостійких покриттів показали підвищення стійкості ножів у 2-3,5 рази. Нанесення комбінованих покриттів здійснювалося з використанням різних видів електроіскрового легування, нанесення нітриду хрому, загартування, азотування; 3. Встановлена залежність швидкості росту завусеня на деталях від твердості ножів для різання дроту; 4. Встановлено співпадання розподілу напружень в верхньому та нижньому ножах з характером їх зношування, що повністю підтверджує достовірність результатів чисельного моделювання та правильність обраних розрахункових схем; 5. Для дослідження особливостей процесу зношування, описання механізмів зношування, визначення параметрів процесу зношування були проведені фрактографічні дослідження ножів. Визначена залежність висоти та площі зони зношування від абсолютної величини завусеня. Визначена залежність питомої висоти та питомої площі зони зношування від середнього значення твердості ножів.

Література

1. Патент на корисну модель №47277 Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб для дослідження стійкості ріжучих елементів/ Маковей В.О., Бородій Ю.П., Куріхін В.С., Москаленко В.І. (Україна) НТУУ. – № u2009 07686 Заявл. 21.07.2009; Опубл. 25.01.2010, Бюл. №2.
2. Маковей В.О. Формування та дослідження комбінованих зносостійких покриттів на ріжучих кромках штампів та на деталях машин/ Маковей В.О., Бородій Ю.П., Куріхін В.С.// Вестник НТУУ КПИ. Машиностроение, вып. 55. Київ. - 2009. - С. 256-264.
3. Бородій Ю.П. Підвищення стійкості ріжучих елементів розділових штампів поверхневим зміцненням/ Бородій Ю.П.// Вісник НТУУ КПИ. Машинобудування, вип. 60. Київ. - 2010. - С. 60-63.
4. Леник К.С. О механизме изнашивания и разрушения рабочих частей вырубных штампов при штамповке высоколегированной электротехнической стали/ Леник К.С., Фукс-Рабинович Г.С., Кузнецов А.Н.// Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. - № 12. – С. 15-17.
5. Георгиев М.Н. Роль трещиностойкости в изнашивании гетерофазных штамповых сталей при вырубке/ Георгиев М.Н., Фукс-Рабинович Г.С.// ФХММ. – 1987. - № 3. – С. 63-66.
6. Степанский Л.Г. Усталостная прочность режущих кромок вырубных и пробивных пуансонов и матриц/ Степанский Л.Г., Чемерис Е.И.// Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. - № 8. – С. 7-8.
7. Дьоміна Н.А. Наукове обґрунтування конструювання робочих деталей розділових штампів/ Дьоміна Н.А., Євстратов В.О., Ткачук М.А.// Вісник Національного технічного університету «ХП». Х.: – 2011. - № 45. – С. 13-22.
8. Бородій Ю.П. Підвищення стійкості розділових штампів комбінованим поверхневим зміцненням/ Бородій Ю.П. // : Дис. канд. наук: 05.03.05 - 2013.

© Ю. П. Бородій

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩИХ КРОМКАХ НОЖЕЙ ДЛЯ РЕЗКИ ПРОВОЛОКИ

Целью статьи является проведение комплексных исследований износа комбинированных износостойких покрытий, включающее их натурные испытания при резке проволоки в штампе-автомате, оценку эффективности износостойких покрытий, их влияние на стойкость ножей, анализ напряженно-деформированного состояния ножей и особенностей механизмов износа режущих элементов. Предложена методика и создана установка для проведения сравнительных испытаний различных износостойких покрытий на ножах для резки проволоки. Натурные исследования при резке проволоки в автоматическом режиме работы прессы и изучение влияния износостойких покрытий показали повышение стойкости ножей в 2-3,5 раза. Установлено совпадение распределения напряжений в верхнем и нижнем ножах с характером их износа, что полностью подтверждает достоверность результатов численного моделирования и правильность выбранных расчетных схем. Для исследования особенностей процесса износа, описания механизмов износа, определения параметров процесса износа были проведены фрактографические исследования ножей.

Ключевые слова: ножи, резка проволоки, стойкость, комбинированные износостойкие покрытия, заусенец, режущие кромки, напряженно-деформированное состояние.

CREATING AND STUDY COMBINED WEAR-RESISTANT COATINGS ON CUTTING EDGE KNIVES FOR CUTTING WIRE

The purpose of this article is to conduct comprehensive studies combined wear wear-resistant coatings, including their full-scale tests at cutting the wire in the stamp box, assess the effectiveness of wear-resistant coatings, their influence on the stability of the blades, the analysis of the stress-strain state and knives Features of the wear of cutting elements. The method and installation created for comparative testing of various wear-resistant coating on the blades for cutting wire. Full-scale research in cutting wire in automatic mode, press and study the effect of wear-resistant coatings showed increasing stability knives in 2-3,5 times. Established phrase stress distribution in the upper and lower blades of the nature of their wear, fully verifies the results of numerical simulation and correctness of selected design schemes. To investigate the characteristics of the process of wear, a description of the mechanisms of wear, deterioration determining process parameters were held fraktografical studies knives.

Keywords: knives, cutting wire, resistance, wear-resistant composite coating, burr, cutting edge, the stress-strain state.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ М. КРЕМЕНЧУК

Наведено аналіз структури рухомого складу, який здійснює пасажирські перевезення, пасажиропотоків на маршрутах та характеристик маршрутів м Кременчук. Наведено результати обстеження пасажиропотоків на маршрутах. Сформульовані нові технічні рішення удосконалення транспортної системи міста, проведені розрахунки раціональної структури парку рухомого складу.

Ключові слова: транспортна система, маршрут, пасажиропотік, структура рухомого складу.

Вступ. Характерною особливістю ринку пасажирських перевезень є те, що існуюча структура рухомого складу не відповідає вимогам, у першу чергу за класом автобусів міського типу, а це значно погіршує якість обслуговування населення та екологічну ситуацію регіону.

Перед працівниками транспортної галузі стоїть першочергове завдання відновити транспортну мережу міста та пристосувати її до сучасних умов. Вирішенням є розробка ефективної програми розвитку міського транспорту, яка б враховувала як загальні тенденції розвитку галузі, так і нагальні проблеми. Водночас варто взяти до уваги й міжнародний досвід вирішення таких проблем.

Аналізуючи спільні риси розвитку пасажирського транспорту у економічно розвинених країнах, можна визначити наступні кроки:

- переймання сучасних методів регулювання дорожнього руху, аби підвищити його ефективність;
- визначення окремих міських магістралей для окремих видів руху, відновлюючи їх відповідно до загальноприйнятих стандартів;
- планування зручних маршрутів згідно з реальними потребами населення, забезпечуючи чіткий графік їхнього курсування містом;
- поповнення транспортного парку більш економічними та сучасними транспортними засобами;
- покращення системи технічного обслуговування та ремонту, підвищення швидкості та безпеки руху;
- розрахунок єдиного загального економічно-обґрунтованого тарифу на міські перевезення.

У таких умовах проблема збалансованого та найбільш ефективного використання та розвитку міського пасажирського транспорту здобуває виключну актуальність, а її рішення потребує застосування сучасних підходів і методів дослідження.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. В останні роки галузь автомобільних пасажирських перевезень перетерпіла значні зміни. Державні АТП замінили у великій кількості підприємства різних форм власності та господарські суб'єкти з власними транспортними засобами.

На даний момент парк великих автобусів, транспорту загального користування на 90% вичерпав свій ресурс і підлягає заміні на більш комфортабельні, місткі і якісні. Відсутність засобів на закупівлю нових автобусів привело до зміни структури автобусного парку в гіршу сторону, особливо в містах. Сьогодні 90% перевезень у містах здійснюється мікроавтобусами, що в основному належать господарським суб'єктам [1].

Робота в ринкових умовах змушує перевізників шукати шляхи зменшення витрат, максимального використання рухомого складу.

Однією з основних задач організації міських автобусних перевезень є визначення потреби маршрутів в рухомому складі. Ця задача складається з двох задач: вибору типу та кількості автобусів і розподіл їх по маршрутам. Від рішення загальної задачі залежать як економічні результати роботи автотранспортних підприємств, так і показники якості обслуговування пасажирів, тобто витрати часу на очікування пасажирами посадки, наповнення автобусів пасажирами, ймовірність відмови пасажирам у посадці.

При визначенні потреби маршрутів в рухомому складі [2] пропонується виходити з наявних ресурсів і можливостей інформаційного забезпечення. Методи визначення потреби в рухомому складі повинні забезпечувати цілісність вихідної та отриманої інформації, а також поєднання критеріїв оптимальності даної задачі з іншими задачами організації перевезень.

Задача вибору типу та кількості автобусів виникає при відкритті нових маршрутів, при заявці на поповнення парку транспортних засобів, а також як допоміжна при розподілі автобусів по маршрутам. Задача розподілу автобусів за маршрутами вирішується при розробці більш досконалих планів перевезень, змін умов експлуатації маршрутів, уточненні даних про пасажиропотоки та зміни в структурі автобусного парку, викликаних поповненням або списанням частини рухомого складу. Крім того, ця задача вирішується при оперативному перерозподілі автобусів між маршрутами в процесі диспетчерського управління перевезеннями.

На вибір місткості та кількості автобусів і на розподіл їх за маршрутами впливає велика кількість факторів, які умовно можна розділити на п'ять груп:

- економічні (капітальні витрати на придбання автобусів та на створення матеріально-технічної бази для їх ремонту, зберігання, поточні експлуатаційні витрати, а також витрати часу пасажирів у вартісному вираженні);
- соціальні (вартісна оцінка втрати пасажиро-годин, рухливість міського населення, наявність достатньої кількості водіїв);
- технічні (динамічні показники автобусів, технічний стан доріг і дорожніх споруд, пропускна спроможність вулиць і зупиночних пунктів);
- експлуатаційні (закономірності формування пасажиропотоків, максимально допустимий інтервал руху, наявність матеріальних ресурсів, кліматичні умови);
- нормативні (гранично допустиме наповнення рухомого складу, вимоги щодо забезпечення безпеки руху, екологічні вимоги).

Зовнішні параметри системи міських автобусних перевезень виступають вихідними даними для подальших розрахунків, а характеристики цієї системи дозволяють оцінити ефективність отриманих результатів.

Першорядним за важливістю чинником, який необхідно враховувати при вирішенні розглянутих завдань, є пасажиропотік, так як він об'єктивно відображає потребу населення в перевезеннях. Вихідним фактором, що формує пасажиропотоки на перегоні, є інтенсивність підходу пасажирів до зупинок.

З урахуванням цього [2] пропонується аналітичний метод визначення ймовірності відмови пасажирів в посадці. Таким чином, даний показник являє собою частку пасажирів, що не сіли в автобус через його переповнення, від загального числа пасажирів, що підійшли.

У роботі [3] вирізняють три методи розрахунку потрібного числа автобусів на маршруті: за продуктивністю автобусів, за пасажиропотоком і за інтервалом руху автобусів.

У ряді випадків потрібна кількість автобусів на маршруті визначається на основі дорожніх умов, витрат на перевезення, провізної здатності автобусів і т.д.

Одночасно з виконанням подібних розрахунків мають бути вирішені питання повного і своєчасного задоволення потреби населення в перевезеннях, забезпечення культури

обслуговування пасажирів та безпеки перевезень, ефективного використання рухомого складу.

У роботі [4] пропонують обирати тип автобуса по місткості шляхом графоаналітичного порівняння наявних моделей рухомого складу (що задовольняють іншим вимогам міських перевезень) по собівартості перевезень і інтервалу руху (якість обслуговування населення).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Вибір типу автобуса за місткістю та визначення їх кількості для будь-якого маршруту є одним з основних завдань при організації руху.

Для забезпечення раціонального наповнення рухомого складу, відповідно до коливань пасажирських потоків, змінюється кількість, місткість і розподіл рухомого складу по транспортній мережі. Ідеальним було б неприривне коригування розподілу рухомого складу за маршрутами в часі відповідно до неприривно змінного попиту на пасажирські перевезення, щоб на будь-якому перегоні будь-якого маршруту постійно витримувати рівність між запитами на перевезення та їх забезпеченням. Але в даний час для всіх систем маршрутизованого транспорту застосовують випереджувальне дискретне планування розподілу рухомого складу за маршрутами, тому умови рівності запитів на перевезення та їх задоволення можуть бути виконані тільки з тією чи іншою мірою наближення, хоча і згладжуються диференційованим випуском на лінію і регулюванням руху.

Для перевезення пасажирів можуть бути використані автобуси різних моделей і місткості. Однак ефективність використання їх далеко не однакова, якщо номінальна місткість не буде відповідати фактичній потужності пасажиропотоків на маршруті. Використання автобусів малої місткості при великій потужності пасажиропотоків збільшує необхідну кількість транспортних засобів, підвищує завантаження вулиць і потребу у водіях. Застосування ж автобусів великої місткості на напрямках з пасажиропотоками малої потужності призводить до значних інтервалів руху автобусів і до зайвих витрат часу пасажирів на очікування.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є удосконалення транспортної системи міста Кременчука шляхом заміни існуючого рухомого складу новим рухомих складом у відповідності з раціональною структурою автобусного парку.

Основний матеріал і результати. Основними видами міського пасажирського транспорту м. Кременчук є автобусний (АО АТП-15307), тролейбусний (комунальне підприємство «Тролейбусне управління») та 8 автотранспортних приватних підприємств, а саме: ПП «Ямщик», ПП «Євротранс-сервіс», ПП «Кремінсьзовніштранссервіс», ТОВ «Союз-Авто-Експрес», ПП «Авто-Крона», ТОВ «Авто-комплект», ПП Фірма «Грація-Транссервіс», МКП «Фірма Адела».

На даний час в місті Кременчуці 25 діючих міських автобусних маршрутів. Загальна довжина автобусної маршрутної мережі міста становить 311,7 км. Основним міським видом транспорту є рейсові мікроавтобуси.

Згідно проведених конкурсів з перевезення пасажирів підприємства обслуговують такі маршрути:

- АТП – 15307: 4, 9, 9А, 12, 13, 26, 28;
- ПП «Ямщик»: 15Б, 18, 30;
- ПП «Євротранс-сервіс»: 1, 10, 16Б, 17, 20;
- ПП «Кремінсьзовніштранссервіс»: 16, 16А;
- ТОВ «Союз-Авто-Експрес»: 3А, 3Б, 21, 25;
- ПП «Авто-Крона»: 2В;
- ТОВ «Авто-комплект»: 11;
- ПП Фірма «Грація-Транссервіс»: 15;
- МКП «Фірма Аделія»: 2.

Основні характеристики цих маршрутів наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики маршрутів

№ маршруту	Кількість рухомого складу	Час оборотного рейсу $T_{об}$, хв.	Пасажиропотік на найбільш завантаженому перегоні Q_{max} , пас	Перевезення пасажирів за добу, пас.	Довжина маршруту L_M , км
2	3	4	5	6	7
1	2 кл. 1	60	66	746	10,0
2	8 кл. 1 12 кл. А	35	737	10024	7,7
2В	1 кл. 1 9 кл. А	45	461	4911	8,0
3А	2 кл. 1 12 кл. А	60	504	11554	15,0
3Б	4 кл. 1 21 кл. А	105	313	4385	12,7
3В	1 кл. 1 3 кл. А	60	–	–	12,0
4	1 кл. 1 2 кл. А	65	57	437	9,2
9А	6 кл. 1	65	187	1174	10,0
9	12 кл. А	65	267	4123	10,0
10	2 кл. 1	60	43	680	10,5
11	4 кл. 1 16 кл. А	90	397	8988	13,9
12	2 кл. 1	60	36	2220	8,9
13	1 кл. 1 3 кл. А	60	81	862	10,0
15	2 кл. 1 23 кл. А	95	423	10844	15
15Б	2 кл. 1 16 кл. А	100	283	5032	14
16	3 кл. 1 10 кл. А	70	309	5591	11,2
16А	3 кл. 1 10 кл. А	70	315	4014	11,2
16Б	1 кл. 1 4 кл. А	70	106	2546	12,1
17	5 кл. 1 15 кл. А	80	381	8524	15,4
18	2 кл. 1 16 кл. А	60	313	6734	10,0
20	2 кл. 1 12 кл. А	110	–	–	16,0
21	2 кл. 1	60	36	145	10,1
25	1 кл. 1 6 кл. 2	105	107	1286	21,4
28	3 кл. 1 20 кл. А	110	393	5518	15
30	2 кл. 1 14 кл. А	60	355	3939	9

З метою удосконалення транспортної системи міста необхідно визначити раціональну структуру транспортних засобів. Для цього на маршрутах максимальний

інтервал руху в години «пік» приймається 5 – 8 хв. Також враховується кількість виконаних рейсів за годину і необхідна кількість автобусів.

Таблиця 2 – Орієнтовні інтервали руху автобусів

Розмір пасажиропотоку, пас/год.	Інтервал руху автобусів, хв.
До 750	8
От 750 до 1500	4
От 1500 до 2250	2,7
От 2250 до 3000	2
От 3000 до 3750	1,6
От 3750 до 4500	1,3
Більше 4500	1

Таблиця 2.4 – Діючі та запропоновані інтервали руху автобусів

Номер маршруту	Діючий інтервал, хв.	Запропонований інтервал, хв.
1	30	30
2	1,75	5
2В	4,5	6
3А	4,5	7,5
3Б	4,5	7
3В	15	20
4	22	33
9А	11	22
9	5,5	6,5
10	30	35
11	4,5	7
12	30	30
13	15	20
15	3,8	8
15Б	5,5	8
16	5,5	7
16А	5,5	7
16Б	14	18
17	4	7
18	3,5	7,5
20	8	7,5
21	30	25
25	15	21
28	5	8
30	3,75	7

На кожному з маршрутів можуть використовуватись автобуси різної місткості в залежності від величини пасажиропотоку. Використання автобусів малої місткості при великій потужності пасажиропотоків збільшує необхідну кількість автобусів, підвищує завантаження вулиць і збільшує собівартість перевезень. Експлуатація автобусів великої місткості з пасажиропотоком малої потужності призводить до великих інтервалів руху, великих витрат часу пасажирів на пересування.

Основним критерієм для вибору раціональної місткості автобусів на певному маршруті є інтервал руху [5] представлені у табл. 2.

Результати розрахунків інтервалів руху в залежності від пасажиропотоків на маршрутах зведені в табл. 3.

НДІАТ рекомендує вибір місткості рухомого складу за пасажиропотоком тільки в одному напрямку табл. 4.

За рекомендаціями І.С. Єфремова для вибору місткості автобуса використовується залежність [6]:

$$q_n = \frac{0,5 \cdot Q_{\text{сут}} \cdot I}{L_M \cdot \gamma_{\text{ник}}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{сут}}$ – об'єм перевезених пасажирів за добу, пас;

L_M – довжина маршруту, км;

$\gamma_{\text{ник}}$ – коефіцієнт використання місткості автобуса ($\gamma_{\text{ник}}=0,8$).

Після того, як обрали тип рухомого складу, який задовольняє існуючий пасажиропотік на маршрутах, визначаємо необхідну кількість транспортних одиниць із урахуванням часу обороту на кожному окремому маршруті.

За рекомендаціями НДІАТу структура рухомого складу в залежності від кількості жителів міста повинна відповідати наступним значенням (табл. 5).

Таблиця 4 – Залежність місткості автобуса від пасажиропотоку за даними НДІАТу

Пасажиропотік в одному напрямку, пас./год	Місткість автобуса, пас.
до 350	30 – 35
351 – 700	50 – 60
701 – 1000	80 – 85
Більше 1000	110 – 120

Таблиця 5 – Залежність структури парку автобусів від кількості жителів міста

Кількість жителів міста, тис.чол.	Структура парку автобусів, %			
	Особливо великі	Великі	Середні	Малі та особливо малі
Від 1000 і більше	25,0	35,0	25,0	15,0
Від 500 до 1000	20,0	30,0	30,0	20,0
Від 250 до 500	15,0	25,0	35,0	25,0
До 250	10,0	20,0	40,0	30,0

Для проведення подальших розрахунків у роботі необхідні значення добового пасажиропотоку і пасажиропотоку на найбільш напруженому перегоні по всіх маршрутах. Успішне вирішення питань раціональної організації перевезень пасажирів та ефективного використання рухомого складу неможливо без систематичного вивчення характеру змін пасажиропотоків транспортної мережі. Вивчення пасажиропотоків дозволяє виявити їх розподіл за часом, довжині, маршрутів і напрямками руху.

Методика проведення дослідження розрахунково-табличним методом передбачає збір інформації про пасажиропотоки на маршрутах м. Кременчука шляхом заповнення спеціально підготовлених таблиць і обробки їх за допомогою електронно-обчислювальних машин, а точніше програми Microsoft Excel.

Після проведення обстеження пасажиропотоків на маршрутах було отримано інформацію для подальших розрахунків, оптимізації транспортної системи та організації міських пасажирських перевезень.

На рисунку 2 зображена діаграма добових пасажиропотоків по всім маршрутам міста Кременчука.

Згідно рекомендаціям НДІАТу, у місті Кременчуці повинні працювати наступні моделі автобусів, які відповідають поставленим вимогам: Автобус малого класу місткістю 33 пасажирів Богдан А-06921, автобус середнього класу місткістю 43 пасажирів БАЗ А081.11, автобус великого класу місткістю 89 пасажирів City LAZ-10LE і автобус особливо великого класу Богдан А801.10 з загальною місткістю 146 пасажирів.

Таблиця 6 – Результати розрахунків

№ маршруту	Марка автобуса				Кількість автобусів
	Богдан	БАЗ А081.11	City LAZ-	Богдан	
1		2			2
2		4		3	7
2В		6	2		8
3А		6	2		8
3Б		7	6	2	15
3В	3				3
4		2			2
9А			3		3
9	4	6			10
10		2			2
11		8	5		13
12	1	1			2
13	1	2			3
15	7			5	12
15Б	10		3		13
16	4	5		1	10
16А	4	5		1	10
16Б		4			4
17	8			4	12
18	2	5		1	8
20	4	5	6		15
21	2				2
25			5		5
28	8		6		14
30		7	2		9
Сума	58	77	40	17	192

Маючи значення пасажиропотоків на кожному маршруті за добу та значення пасажиропотоку на найбільш напруженому перегоні можемо зробити наступні розрахунки зведені у табл. 6.

Отже, провівши розрахунки необхідної кількості автобусів, ми зменшили їх кількість до оптимальної за даних умов – 192 одиниці, обравши моделі автобусів так щоб структура парку РС відповідала рекомендованій. Як бачимо, розрахунок структури рухомого складу, дала можливість скоротити кількість транспортних засобів на 109 одиниць, що складає 36%.

Графічно стара та нова (запропонована) структура парку автобусів у місті Кременчуці представлена на рис. 4.

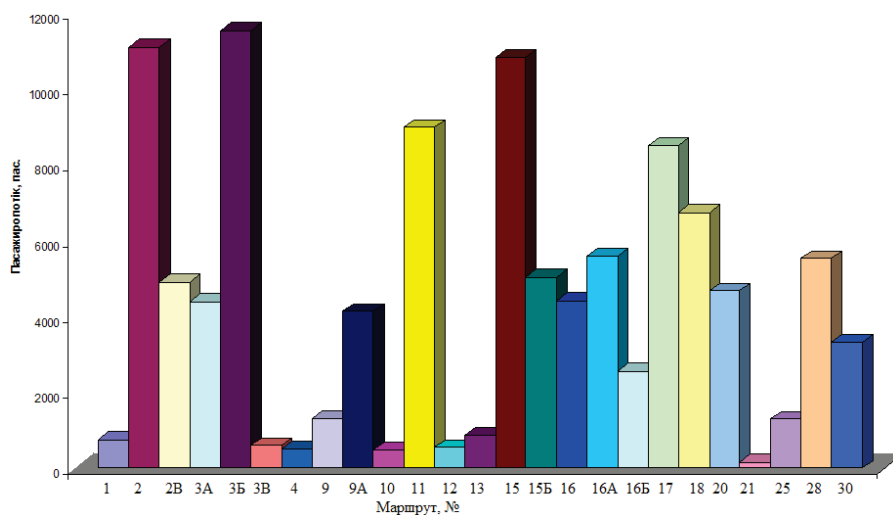


Рисунок 2 – Добовий пасажиропотік за маршрутами м. Кременчука

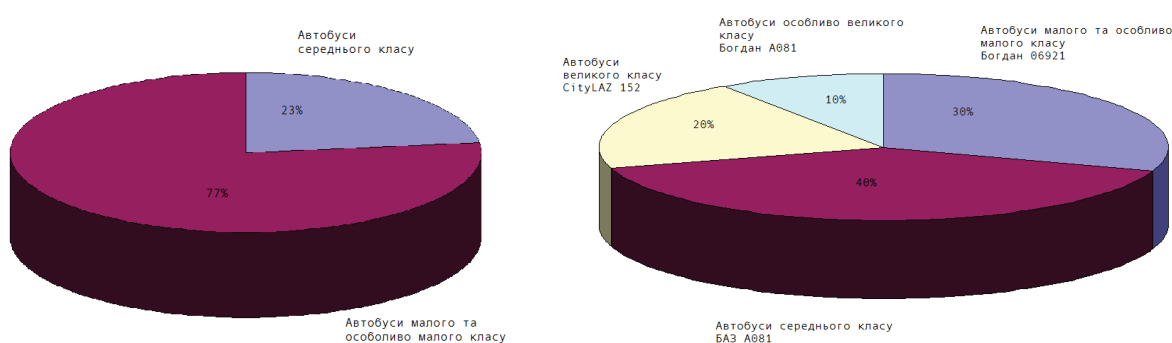


Рисунок 4 – Стара та нова (запропонована) структура парку автобусів

Як бачимо нова структура відповідає рекомендаціям НДІАТу (табл. 5).

Висновки. Перспективним напрямком удосконалення транспортної системи міста є визначення оптимальної структури транспортних засобів, яка передбачає введення в експлуатацію автобусів великого та середнього класів, які виконують більшу частину перевезень, забезпечують комфортні умови поїздки пасажирів і повністю задовольняють попит у часи «пік».

В Кременчуці на маршрутах працює 77% автобусів малого та особливо малого класу і 23% середнього класу. Натомість для міста, населення якого майже 225 тисяч чоловік, розрахункова структура відповідає: 10% автобусів особливо великого класу; 20% автобусів великого класу; 30% автобусів середнього класу; 40% автобусів малого та особливо малого класу.

Література

1. Підтримка інтеграції України до Транс-Європейської транспортної мережі ТСМ-Т. РК4. Автомобільний транспорт. Заключний звіт 4.1. [Текст]
2. Антошвили М.Е., Либерман С.Ю., Спирин И.В. Оптимизация городских автобусных перевозок [Текст] М.: Транспорт, 1985. 102 с.
3. Касаткин Ф.П. Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса. Академический проект [Текст] (Москва), 2004. - 352 с.
4. Глемин А.М., Третьяков А.М. Пассажи́рские автомобильные перевозки и безопасность дорожного движения [Текст]. Учебное пособие. - Бийск, БТИ АлтГТУ, 2007. - 96 с.
5. Босняк М.Г. Пасажи́рські автомобільні перевезення. [Текст] К.: Видавничий Дім "Слово", 2009. - 272 с.
6. Єфремов В.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теорія міських пасажи́рських перевезень [Текст]. - М.: Вища школа, 1980. - 535 с.

УДК 656.132

Н.Н. Мороз д.т.н., доцент

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК Г. КРЕМЕНЧУГ

Приведен анализ структуры подвижного состава, который выполняет пассажирские перевозки, пассажиропотоков на маршрутах и характеристик маршрутов г. Кременчуг. Приведены результаты исследования пассажиропотоков на маршрутах. Сформулированы новые технические решения усовершенствования транспортной системы города, проведены расчеты рациональной структуры парка подвижного состава.

Ключевые слова: *транспортная система, маршрут, пассажиропоток, структура подвижного состава.*

UDC 656.132

N.N. Moroz d.t.n., senior lecturer

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

IMPROVEMENT OF KREMENCHUK PASSENGER TRANSPORT SYSTEM

The analysis of Kremenchuk the rolling-stock structure is given which carries out passenger transportations, passengers flow on routes and routes characteristics. The results of research passengers flow on routes are given. The new technical decisions of improvement of city transport system are formulated, the rational accounts structure of the rolling-stock park are carried spent.

Key words: *transport system, route, passengers flow, the rolling-stock structure.*

В.В. Драгобецкий, д.т.н., профессор,

Е.А. Наумова, инженер,

А.В. Воронин, соискатель,

Р.Г. Пузырь, к.т.н., доцент

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Рассмотрены методы усовершенствования процессов деформирования слоистых заготовок. Основные направления повышения деформируемости заготовок связаны с выравниванием механических свойств компонент, управлением контактным трением и характером нагружения. Выявлена и представлена наиболее рациональные схемы сварки взрывом заготовок в дальнейшем подвергаемых формоизменению.

Ключевые слова: *биметалл, сварка взрывом, штамповка, формоизменение, трение, деформируемость*

Вступление. В решении проблем ресурсосбережения и расширения технологических возможностей процессов обработки давлением важная роль принадлежит производству слоистых металлических композиций. Их применение является одним из основных резервов экономии дорогостоящих и дефицитных металлов и сплавов. Обработка давлением и взрывное плакирование является главным производителем слоистых заготовок для деталей современных отраслей промышленности. Применение прогрессивных формообразующих технологий, прокатки и сварки взрывом основанных на пластическом деформировании слоистых композиций позволяет получать штампованные детали и полуфабрикаты с минимальным отходом металла, с комплексом физико-механических свойств, недостижимых в монометаллах. При этом осуществляется экономия черных и цветных металлов и существенно изменяется технологическая деформируемость заготовок.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Теория обработки давлением слоистых, в том числе и неоднородных сред находится еще на начальной стадии своего развития [1]. Известно [1,2,3], что для решения любой задачи пластического деформирования необходимо и достаточно задать связь между напряжениями и деформациями при линейной схеме напряженного состояния. Особенности, закономерности и неприемлемость предпосылок, на основании которых строились модели пластической деформации слоистой среды, раскрыты Г.Э.Аркулисом [1] и в общих чертах сводится к следующему: деформации неравномерно распределены по объему слоистой заготовки; деформация происходит с уменьшением объема активно деформируемого металла и вытеснения наиболее пластичного компонента.

Выделение нерешенные ранее частей общей проблемы. Вопросы повышения деформируемости и интенсификации процесса формоизменения биметаллических заготовок практически не рассмотрены и являются нерешенными в настоящее время.

Постановка задачи. Основной целью исследования является выявление методов и путей повышения деформируемости биметаллических заготовок и управления пластическим течением многослоя. Выбор и экспериментальное обоснование наиболее приемлемого варианта слоистой заготовки.

Основной материал и результаты.

Для технологических процессов штамповки тонколистовых панелей, калибровки слоистых листовых заготовок, проката тонкого полиметаллического листа, штамповки

слоистых заготовок малой кривизны и т.д., повышение технологической деформируемости, в основном, сводится к выравниванию механических характеристик компонент слоистой заготовки. Кроме того, в процессах получения тонколистовых биметаллических заготовок методами прокатки или сварки взрывом предварительное выравнивание механических характеристик способствует повышению прочности зоны соединения. Выравнивание механических характеристик компонент может быть достигнуто предварительным упрочнением методами пластического деформирования или термомеханической обработкой компонент слоистой заготовки с более высокими показателями пластичности. При этом предпочтение следует отдавать процессу взрывного упрочнения. В этом случае глубина упрочняемого достигает 40 мм и более, т.е. на всю глубину применяемых в листовой штамповке заготовок. Выравнивание пластических свойств биметаллических заготовок можно достигнуть следующим образом. На поверхность более пластичного металла, а он, как правило, обладает и меньшей акустической жесткостью, необходимо установить дополнительную пластину с большей акустической жесткостью, примерно соответствующей акустической жесткости менее пластичного слоя. Упрочнение взрывом производится через дополнительную пластину. В этом случае ударная волна, возникающая при ударе о верхний (более пластичный) слой частично отражается от нижнего (менее пластичного) слоя в виде вторичной волны сжатия. Происходит многократное отражение ударной волны между верхней дополнительной пластиной и нижним слоем биметалла. Многократное отражение приводит к более интенсивному упрочнению при одинаковом уровне напряжений по сравнению с однократным [4]. При этом в материал с большей акустической жесткостью разупрочняется, что благоприятно сказывается на процессе последующего формоизменения.

Благоприятно сказывается на пластичную деформацию слоистых заготовок предварительная перед пластическим деформированием взрывотермическая обработка. Последняя представляет собой сочетание импульсной и термической обработки. Процесс взрывного деформационного упрочнения может производиться перед и после термической обработки. В первом случае импульсное механическое деформирование заготовки при незначительных остаточных деформациях приводит к созданию в металле дефектов кристаллической решетки, заметно влияющей на кинетику образования новых фаз при последующей термообработке. Импульсное нагружение интенсифицирует процесс зарождения и движения дефектов кристаллической решетки и приводит к возникновению большого количества микроочагов пластической деформации. Сочетание импульсного упрочнения с последующим рекристаллизационным нагревом приводит к измельчению зерна без макродеформации. Взрыво-термическая обработка повышает сопротивляемость металлов распространению трещин в условиях статического и динамического нагружения, при одновременном росте прочности и пластичности, связанной с возрастающей суммарной степенью деформации множественным скольжением. Проведены эксперименты по взрыво-термической обработке мартенсито-стареющей стали.

С этой целью образцы из стали ВНС-17 деформировались взрывом. Испытуемый образец устанавливался с зазором $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-3}$ м параллельно подложке. Над образцом помещалась передающая среда и слой взрывчатого вещества с электродетонатором. Выбранная форма заряда и его расположение обеспечивали импульсную нагрузку всей поверхности образца от одного конца до другого.

Условия экспериментов представлены в таблице 1. Полученные образцы испытывались на ударную вязкость с надрезом по Шарпи в ИЭС им. О.Е.Патона. При этих испытаниях образец представляет собой брус квадратного сечения $(10 \times 4,5) \cdot 10^{-3}$ м, на котором поперек одной грани сделан надрез с раствором 45° .

Образец опирается обоими концами на опоры, и маятник массой 27 кг со скоростью 5,3 м/с ударяет по середине противоположной надрезу стороны. При разрушении образца измеряют поглощенную энергию. Результаты испытаний также представлены в таблице 1.

Таблица 1. Изменение ударной вязкости стали ВНС17 после взрывного нагружения

№ п/п	Материал образца	Передающая среда	Масса заряда ВВ (кг)	Форма заряда	Ударная вязкость Дж/м ²	Энергия, поглощенная образцом
1.	ВНС-17	1.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 2.Резина = $10 \cdot 10^{-3}$ м 3.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 4.Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	0,1	Плоский, толщина слоя $H=10 \cdot 10^{-3}$ м	$87 \cdot 10^{-4} \div 72 \cdot 10^{-4}$	0,2-0,3
2.	ВНС-17	1.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 2.Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м 3.Вода = $20 \cdot 10^{-3}$ м 4. Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	0,1	-	$98 \cdot 10^{-4} \div 87 \cdot 10^{-4}$	0,24-0,36
3.	ВНС-17	1.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 2. Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	-	-	$103 \cdot 10^{-4} \div 94 \cdot 10^{-4}$	0,26-0,38
4.	ВНС-17	1. Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	-	-	$81 \cdot 10^{-4} \div 72 \cdot 10^{-4}$	0,2-0,3

Проведенные испытания показали, что способность материалов противостоять влиянию концентраторов напряжений (трещин) после импульсного нагружения достаточно высокая, и даже превышает в 1,5÷1,9 раза поглощенную энергию исходных состаренных образцов. Ударная вязкость состаренных образцов составляет $(63 \div 68) \cdot 10^{-4}$ Дж·м⁻².

Повышение равномерности пластического течения слоистых материалов в условиях взаимодействия поверхностей листового биметалла с деформирующей и формообразующей поверхностью инструмента достигается путем управления напряжениями контактного трения. Регулирование контактного взаимодействия сводится к торможению более пластичных компонент и активации течения компонент с большим сопротивлением пластическому деформированию. В условиях плоского и объемного напряженного состояния различие механических свойств слоев в более существенной мере сказывается на характере пластического течения слоистого металла. Вероятно, наиболее целесообразно изучать процесс формообразования слоистой заготовки на примере процесса глубокой вытяжки полых слоистых заготовок. Известно [2], что отдельные участки заготовки при вытяжке находятся в разных условиях нагружения. Для полого цилиндра находится в плоско-напряженном и объемно-деформированном состоянии. Считается, что цилиндрическая часть полого тела, находящаяся в зазоре между матрицей и пуансоном, находится в линейно-напряженном и объемно-деформированном состоянии. Часть заготовки под прижимным кольцом находится в объемно-напряженном и объемно-деформированном состоянии, т.е. в процессе вытяжки полых слоистых заготовок наблюдается процесс пластического течения в условиях линейного, плоского и объемного напряженных состояний.

Были проведены экспериментальные исследования по вытяжке биметаллических заготовок, у которых $A_{ST} \gg A_{SM}$, где A_{ST} и A_{SM} – пределы текучести твердой и мягкой компонент биметалла. Эти биметаллы ВТ 1-0 + сталь ст.3, АД 1-0 + сталь ст. 3. Различие механических свойств металлов слоев,, а также условий трения между контактными поверхностями штампа и биметаллических заготовок, привело к развитию неравномерности деформаций слоев по высоте.

Мягкий слой при коэффициентах вытяжки, превышающих 1,40-1,42, мягкий слой тормозит течение биметалла. Это отрицательно сказывается на процессе вытяжки под прижимным кольцом и благоприятно для данной части заготовки, т.е. пластичный слой препятствует образованию разрывов данной части заготовки. В целом анализ профиля отштампованного биметалла свидетельствует о следующем:

- мягкий слой (титан, алюминий) в зоне прижима и перетяжного ребра деформируется интенсивнее слоя стали;

- в зоне округления пуансона в мягком слое образуется утолщение, в твердом – более интенсивное уплотнение.

Следует учитывать, что при формоизменении деформирующая нагрузка вызывает пластическое течение менее пластичного компонента, а более пластичный находится в условиях интенсивного нагружения. Это приводит в ряде случаев к прилипанию более пластичных компонент к поверхности инструмента даже при наличии смазок. Предотвратить это явление при вытяжке удастся при подводе смазки в полость формируемой заготовки и под прижимное кольцо.

Важнейшими показателями качества слоистых металлических композиций является прочность и сплошность соединения. Наиболее достоверно оцениваемые механическими испытаниями. Наиболее распространенным видом испытаний на заданную пластическую деформацию являются испытания на изгиб. Пластическая деформация характеризуется углом изгиба до образования первой трещины в растянутой зоне, до параллельности сторон и до соприкосновения сторон. Испытание проводились на образцах из слоистой композиции (сталь 20+медь 2Р+латунь 60).

Проведено сопоставление предельных углов сгиба до образования первой трещины монолитного материала (стали, меди и латуни) и слоистого композита (см. табл.2) Для сопоставимости результатов испытаний трехслойного образца монолитные заготовки подвергались взрывному нагружению по схеме и параметрам, соответствующим процессу сварки взрывом. Образование сварного соединения предотвращали путем введения в межслойный сварочный зазор слоя промасленной бумаги.

Таблица 2. Данные по изгибу слоистой заготовки и компонент

Материал	Угол гiba до образования первой трещины	До соприкосновения сторон
Триметалл	не образуется	Трещин не образуется
Медь М2Р	нет	то же
Сталь 20	76	образование трещин
Латунь Л60	нет	трещин не образуется

Испытания свидетельствуют о повышении деформируемости слоистого металла по сравнению с монолитным.

Находят применение испытания на изгиб с разгибом, при котором образцы загибают вокруг оправки диаметром, равным удвоенной толщине листа на угол 45, 60, 90 и 120°С, а также испытания на разгиб до появления расслоения и испытания на перегиб. Последние служат для определения способности металла выдержать заданную пластическую деформацию, характеризуемую числом перегибов.

К испытаниям, определяющим способность металлов выдерживать заданную пластическую деформацию, относят и испытания на скручивание (ГОСТ 1579-80).

Испытанию подвергались образцы из композиций титан ВТ-1-0 + медь М2Р (параметры сварки $r=1,0$; $h=\delta_{Ti}$; ВВ – аммиачная селитра + алюминий 1:1) ВТ 1-0+АД 1-0 ($r=1,0$ $h=1,2\Gamma_{Ti}$; ВВ 1:1); М2Р+АД1 ($r=1,5$ $h=\delta_{ш}$; ВВ 3:1) и др.

Образцы из биметалла (нержавеющая сталь Х18Н10Т + медь М2Р) испытывали на изгиб вовнутрь плакирующим слоем (медью) вплоть до разрушения. Размер образцов 3+5x120x8. Отслоений в биметалле не наблюдалось. До и после испытаний определяли изменение микротвердости и оценивали напряженное состояние биметалла при изгибе. На образец наносили параллельные риски и наблюдали их искажение, связанное с действием касательных напряжений. Аналогичные испытания проводились для композиции Сталь 20+АД 1-0 + АМг6 размером 4+4+20x15x120 плакирующим слоем вовнутрь до полного

разрушения. В этом случае наблюдалось отслоение в межслойной зоне. Площадь отслоений не превышала 50% и находится в пределах допуска.

Результаты испытаний свидетельствуют о высокой деформируемости полученных сваркой взрывом композиций и соответствуют требованиям, задаваемым нормативно-технической документацией, определяющей способность композитов выдержать заданную пластическую деформацию.

Большие возможности для управления процессом формоизменения слоистых заготовок имеют процессы импульсного нагружения, при которых возникают волны напряжений (возмущений). Распространяющиеся в слоистой заготовке волны напряжений образуют расширяющиеся с течением времени области возмущений. Волны напряжений в области возмущений подразделяют на первичные, связанные с прохождением волны, и вторичные волны разгрузки, и отраженные последние всегда находятся внутри области возмущений и являются областями с начальными напряжениями и деформациями. Волна нагрузки образует вторичную область возмущений, распространяющуюся внутри области возмущений нагрузки. При выходе волны напряжений на границу раздела слоев или поверхность биметалла и при взаимодействии волн напряжений в слоях биметалла возникает явление отражения.

В процессах импульсного деформирования явления разгрузки и нагрузки могут являться мощным инструментом для управления процессом формоизменения и активизации пластического течения материалов с более высоким сопротивлением пластическому деформированию. Последнее можно осуществить, используя явление взаимодействия волны разгрузки с отраженной волной от границы с более пластичным материалом с меньшей акустической жесткостью, что приводит к интенсивному росту растягивающих напряжений в менее пластичном материале.

В целом распределение импульсной нагрузки в значительной степени зависит от диссипативных свойств компонент слоистой заготовки, их механических свойств, акустической жесткости и геометрических размеров. При определении напряженно-деформированного состояния следует учитывать инерционные напряжения, зависящие от массы компонент и напряжения, связанные с давлением отраженной волны давления.

В процессах импульсного формоизменения, в частности, при гидровзрывной штамповке, наступление пластического течения компонент слоистой заготовки наступает практически одновременно. Параметры внешнего нагружения соответствует возникновению пластических волн нагрузки в слое с большим динамическим пределом текучести. Кроме того, высокоскоростная деформация по разному влияет на степень упрочнения компонент биметалла. В промышленности наиболее широко применяются следующие биметаллические композиции ст.3+08X12H10T, M1+08KP, АД 1-0+12X 18H10T, 08KP+BrOЦС 4-4-1, M1+12X18H10Г и т.п. Более пластичные компоненты этих биметаллов при высокоскоростной деформации склонны к более высокой степени упрочнения.

Отношение динамических пределов текучести A_T^L/A_T^{CT} для стали ст. 3 равно 4,1; M1-2,9; стали 12X18H10T-1,22 [5]. Это способствует выравниванию пластических свойств компонент биметалла и более равномерному распределению деформаций по объему заготовки.

В процессах гидровзрывной штамповки роль деформирующего инструмента выполняют ударные волны и гидропоток, что исключает контактное взаимодействие с деформирующим инструментом и тормозящее действие более пластичного компонента. А в процессах безматричной штамповки и близких к ним трение исключается по всем поверхностям. Процесс высокоскоростной деформации протекает более устойчиво, а это расширяет диапазон штампуемых биметаллических заготовок с применением процесса бесприжимной вытяжки и сводит на нет силы трения между поверхностью прижимного кольца и более пластичной компоненты.

В процессах гидровзрывной штамповки возможно одновременно активизировать пластическое течение более труднодеформируемого компонента и упрочнение пластичного. При реверсивной штамповке биметалла, когда поверхность более пластичного компонента контактирует с обтяжным пуансоном, а внешняя нагрузка действует со стороны твердого слоя, создаются условия для многократного упрочнения более мягкой компоненты (см. ранее). Отраженная волна от более пластичной компоненты, имеющей и меньшую акустическую жесткость, является волной растяжения и усиливает деформацию менее пластичной компоненты.

Среди возможных вариантов изготовления биметаллических заготовок выбрана схема с нависанием, полученным при помощи дополнительных пластин, отлетающих при соударении (приставное фальшнависание), либо зона нависания содержит ослабление (V-образные канавки, риски, углубления).

Данные эксперименты по осесимметричной вытяжки безприжимной штамповки и гибки показали, что заготовки, полученные по этой схеме не имеют расслоений.

Выводы. Таким образом, повышение деформируемости биметаллических заготовок достигается путем выравнивания механических свойств компонент и управления силами контактного трения между поверхностями заготовки и инструмента. Наиболее эффективное управление пластическим течением многослойа достигается в процессах импульсного деформирования. Наиболее эффективной схемой получения биметаллических заготовок сваркой взрывом является схема с боковым нависанием.

Литература

1. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности [Текст] / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид // Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.

2. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности [Текст] / Л. М. Качанов // 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

3. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров [Текст] / У. Джонсон, П. Меллон // Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 568 с.

4. Драгобецкий, В. В. Взрывотермическое упрочнение в процессах импульсной обработки [Текст] / В. В. Драгобецкий // В сб. 2-го Международного симпозиума «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов в машиностроении» (ч.1, 2001). – Харьков: ИПЦ «Контракт» 2001. – 228 с.

5. Драгобецкий В. В. Оценка штампуемости слоистых заготовок [Текст] / В. В. Драгобецкий // Проблемы создания новых машин и технологий. Выпуск 1/2001 (10) – С. 396-398.

© Драгобецкий В.В., Наумова О.О., Воронін О.В., Пузир Р.Г.,

УДК 669.017.621.7.044.2

Драгобецкий В.В., д.т.н., профессор,

Наумова О.О., инженер,

Воронін О.В., пошукач,

Пузир Р.Г., к.т.н., доцент

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ ФОРМОЗМІНИ БІМЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК

Розглянуто методи удосконалення процесів деформування шаруватих заготовок. Основні напрями підвищення заготовок, що деформуються та пов'язані з вирівнюванням механічних властивостей компонент, управлінням контактним тертям і характером навантажування. Виявлено і представлено найбільш раціональні схеми зварювання вибухом заготовок надалі піддаються формозміні. Надані результати експериментальних

досліджень щодо зміни ударної в'язкості мартенситно-старіючої сталі після вибухового навантаження, згину шаруватих заготовок, їх витяжки та безприжному штампуванні.

Ключові слова: біметал, зварювання вибухом, штамповка, формозміну, тертя, деформованість

UDK 669.017.621.7.044.2

Dragobetsky V., Ph.D

Naumova O., engineer,

Voronin O., search engine,

Puzyr R., Ph.D

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University

EXPANSION OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF BIMETALLIC BLANKS FORMING

Methods of deformability improvement of multilayer blanks have been considered. Deformability increase of multilayer blanks is predetermined by component mechanical characteristics leveling, friction control and loading character. The most rational charts of the explosive welding of the billets further subjected to forming are found and presented.

Key words: *bimetal, explosive welding, punching, forming, friction, deformability.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КУТОВОЇ РОЗДАЧІ ПЛАСКИХ ФЛАНЦІВ В ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВКАХ З НЕРЖАВНЮЧОЇ СТАЛІ 08X18H10

Приведено основні результати дослідження кутової роздачі трубчастих заготовок чисельним моделюванням. Визначено розподіл ступеню використання ресурсу пластичності, інтенсивності напружень та деформацій по об'єму заготовки, що деформується, енерго- силові параметри процесу кутової роздачі.

Ключові слова; кутова роздача, інтенсивність напружень та деформацій при роздачі, ступінь використання ресурсу пластичності при роздачі.

Вступ. В даний час підвищеним попитом користуються порожнисті вироби, такі як циліндричні, конічні та криволінійні перехідники з фланцями, що розташовані, як перпендикулярно до осі заготовки, так і під кутом, для відгалуження трубопроводів на заданий кут; «комірні» фланці, з'єднувальні елементи у вигляді перехідників, фланців, втулок з фланцями та інші. Вказані вироби можуть бути отримані кутовою роздачею порожнистого напівфабрикату. Однак широке розповсюдження вказаного процесу стримується відсутністю даних по величинах потоншення стінки заготовки, ступеню використання ресурсу пластичності та зміцненню здеформованого металу при роздачі трубчатої заготовки для визначення можливості подальшого формування плоских фланців на торці заготовки.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Процеси виготовлення поковок з трубних заготовок детально розглянуті у роботі [1], а процеси обтискання та роздачі у роботах [2-9]. Але у цих роботах не висвітлено достатні обсягом питання кутової роздачі трубчатої заготовки.

Метою цих досліджень є проведення розрахункового аналізу кутової роздачі трубчатої заготовки, зрізаної під кутом 45° , визначення впливу конструктивних, фізико-механічних та технологічних параметрів на закономірності проходження процесу та визначення енергосилових параметрів.

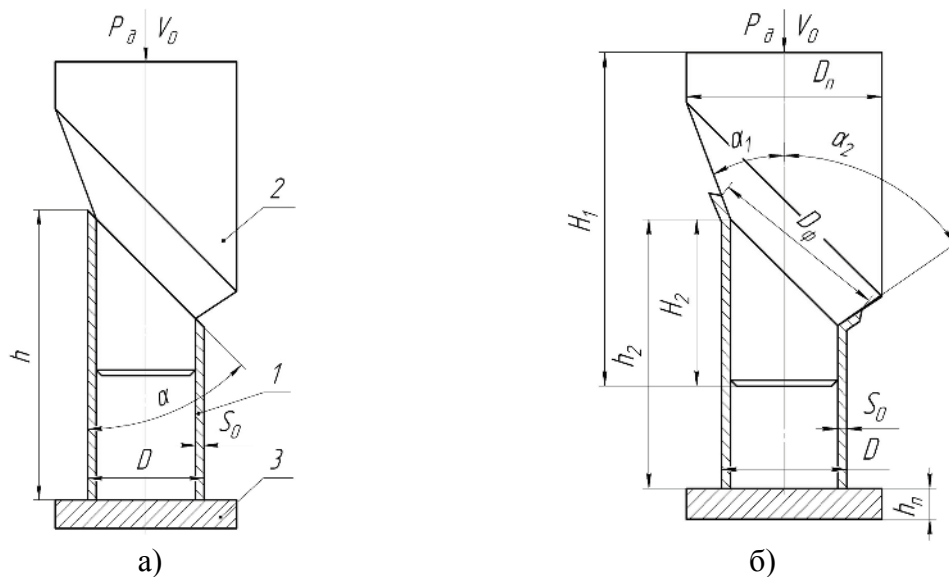


Рис.1. Схема роздачі: а – початкові параметри, б – параметри, після роздачі.

На рис.1 показано загальний вигляд процесу роздачі зрізаної під кутом $\alpha = 45^\circ$ тонкостінної трубчастої заготовки. Пуансон 2, переміщується вниз, зі швидкістю V_0 та зусиллям P_d , роздає заготовку 1, що встановлена на плиті 3. Вихідна заготовка має такі дані: труба із нержавіючої сталі 08X18H10 (аналог AISI 304), зрізана під кутом $\alpha = 45^\circ$, її висота $h = 100$ мм, зовнішній діаметр $D = 38$ мм, товщина стінки $S_0 = 1,5$ мм. Асиметричний пуансон, має змінний по контуру поперечного перерізу кут нахилу твірної, кут $\alpha_1=35^\circ$, а кут $\alpha_2=55^\circ$. Загальна висота пуансона $H_1 = 110$ мм, висота частини, що входить в заготовку $H_2 = 55$ мм, більший діаметр $D_n = 64$ мм.

Дослідження та розрахунок, були проведені чисельним моделюванням з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Матеріал заготовки, при моделюванні, вважається пружно-пластичним та ізотропним.

На першому етапі розрахунків роздача обмежувалася формуванням конічного кутового фланцю з розрахованим заздалегідь діаметром з використанням закону сталості об'єму. Переміщення пуансону при цьому дорівнювало 20 мм. Вигляд отриманої, деталі на першому переході зображено на рис.2.

На рис.2 (в) показано деталь після втрати стійкості. Згідно результату розрахунку програми «Deform-3D», початок втрати стійкості починається після переміщення пуансона на 30 мм від початку роздачі.

Після моделювання процесу, було встановлено кінцеву форму деталі першого переходу, визначені енергосилові режими деформування та напружено – деформований стан виробу.

На рис.3, приведені залежності зусилля роздачі, від переміщення пуансона. Зусилля процесу кутової роздачі монотонно зростає, та досягає максимального значення в кінці деформування. Максимальне зусилля роздачі на заданому переміщенні пуансону (20 мм) досягає 67,5 кН.

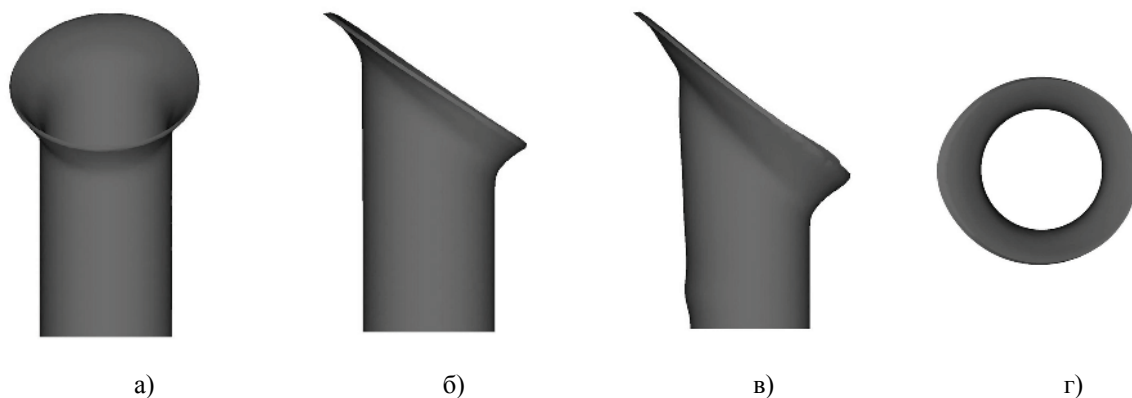


Рис.2. Деталь, отримана після роздачі (а, б, г) та деталь після втрати стійкості (в).

Розподіли інтенсивності деформацій ϵ_i та інтенсивності напружень σ_i по об'єму zdeформованих заготовок наведені на рис.4. За розподілом ϵ_i можна оцінити пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією при кутовій роздачі. При першому переході роздачі максимальні значення інтенсивності деформацій $\epsilon_i=1,1-1,14$, що були найбільші біля більшого кута роздачі.

За розподілом інтенсивності напружень σ_i можна оцінити зміцнення zdeформованого металу після роздачі та прогнозувати механічні властивості в розданій частині заготовки. Після роздачі, на частині, що роздавалась меншим кутом отримали σ_i від 670 до 750 МПа, на частині, що роздавалась більшим кутом – 650-1000 МПа.



Рис.3. Залежність зусилля роздачі від переміщення пуансону.

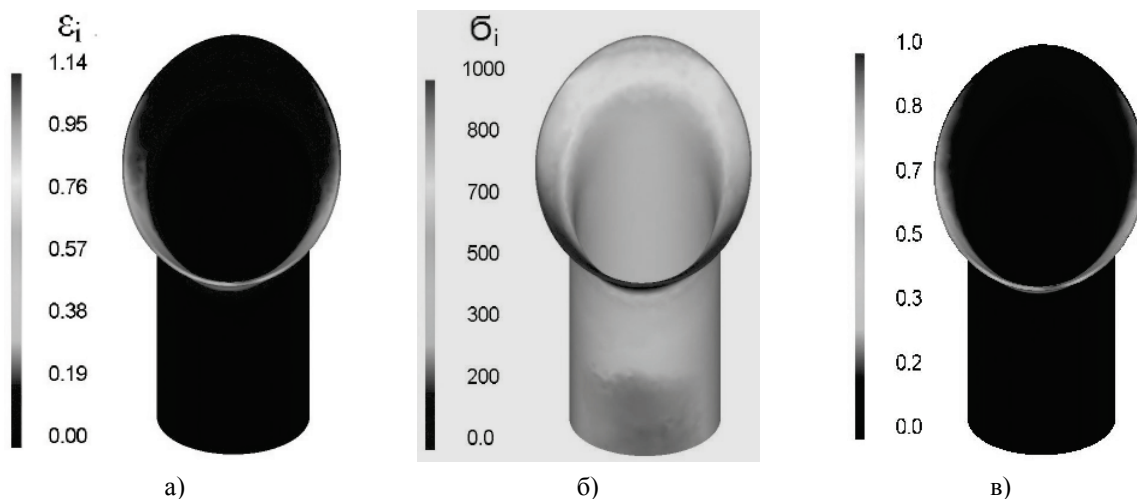


Рис.4. Розподіл: а- інтенсивності деформацій ϵ_i ; б- інтенсивності напружень σ_i (МПа); в- ресурс пластичності φ .

На нижньому краю фланця після роздачі, ступінь використання ресурсу пластичності сягає значення близько 0,75, а на верхньому краю - значення близько 0,2. Тому, можливо, при проходженні другого переходу ступінь використання ресурсу пластичності в нижній частині деталі може вичерпатися і може відбутися відрив фланцю деталі. Саме тому, кінцеві розміри та форма пуансона визначалися після проведення розрахунків для другого переходу.

Після моделювання другого переходу, були отримані форма та розміри кінцевої деталі - труби з плоским фланцем. Також, були досліджені та визначені енергосилові режими деформування та напружено – деформований стан.

Форма отриманих деталей показана на Рис.5.

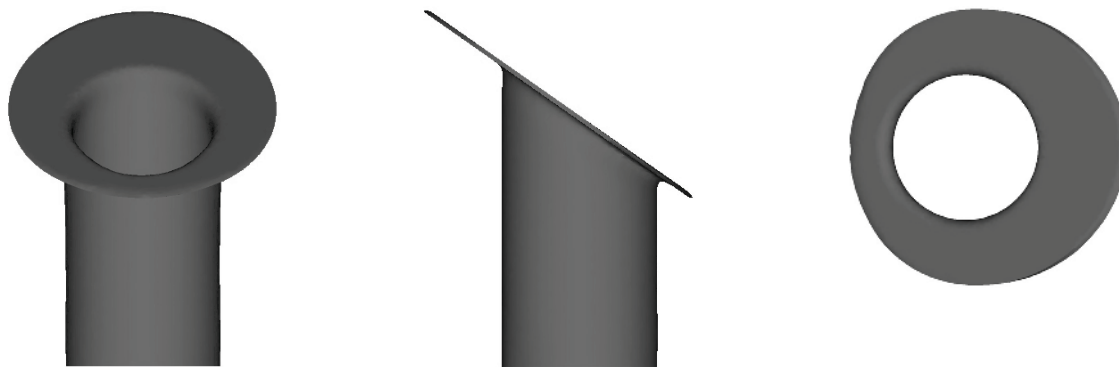


Рис.5. Деталь, отримана після роздачі на другому переході

На рис.6, приведені залежності зусилля роздачі, від переміщення пуансона. Зусилля монотонно зростає, досягаючи максимального значення в кінці процесу роздачі. Максимальне зусилля роздачі на заданому пройденому пуансоном шляху (17 мм) становило близько 114 кН.



Рис.6. Залежність зусилля роздачі від переміщення пуансону.

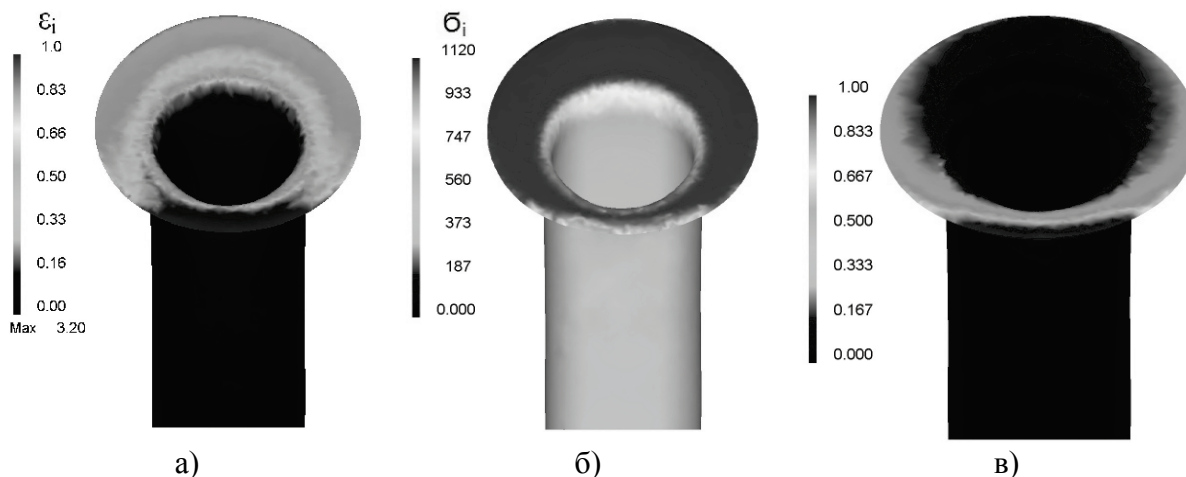


Рис.7. Розподіл: а- інтенсивності деформацій ϵ_i ; б- інтенсивності напружень σ_i (МПа); в- ресурс пластичності φ .

Розподіли інтенсивності деформацій ϵ_i та інтенсивності напружень σ_i по об'єму здеформованої заготовки наведені на рис.7. При другому переході роздачі максимальні значення $\epsilon_i=3,1-3,2$, що характерні для більшого кута роздачі.

Після роздачі, на частині, що роздавалась меншим кутом отримали значення σ_1 від 900 до 1000 МПа, на частині, що роздавалась більшим кутом – 950-1120 МПа.

Значення ступеню використання ресурсу пластичності на нижньому краю кутового фланцю після роздачі, сягає значення близько 0,95, а на верхньому краю – близько 0,2.

Висновок. Таким чином, в результаті проведеного дослідження були отримані всі необхідні дані для розробки технології процесу кутової роздачі зрізаної під кутом 45° труби. Були знайдені: зусилля для вибору КШО, кінцеві форми та розміри деталі по закінченню вказаного процесу, також проведено оцінку зміцнення zdeформованого металу, що дає змогу судити про якість виготовленої деталі.

Зроблено висновок, що для отримання якісної деталі виникає необхідність у перерозподілі кількості металу з верхньої частини зрізаної трубчастої заготовки - в нижню. Реалізувати це можна шляхом вибору оптимального кута зрізу трубчастої заготовки.

Література:

1. Артеc А.Э. Технологические процессы изготовления поковок из трубных заготовок [Текст] / А.Э.Артеc // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2003. – №11. – С. 25-31.
2. Калиновский И.П. К расчету технологических параметров обжима трубы с нагревом [Текст] / И.П. Калиновский., В.Н.Чудин., В.А. Мозгов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – №1. – С.20-2
3. Неперишин Р.И. Идеальные процессы обжима и раздачи толстостенных трубных заготовок [Текст] / Р.И.Неперишин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – №6. – С.23-29.
4. ГОСТ 8734-85. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 12 с.
5. Шевчук С.А. Штамповка деталей арматуры в мелкосерийном производстве [Текст] / С.А.Шевчук, О.А. Шевчук, А.Э. Артеc., В.В. Третьюхин // Арматуростроение. – 2006. – №4(43). – С. 72-74.
6. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка [Текст] / Ю.А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. - 288 с.
7. Сосенушкин Е.Н. Ресурсосберегающие технологии изготовления деталей трубопроводной арматуры [Текст] / Е.Н.Сосенушкин // Технология машиностроения, 2010, № 3. – С. 14-16.
8. Артеc А.Э., Технологические возможности горячей объемной штамповки деталей арматуры из центробежнолитых чугуновых труб / А.Э. Артеc, Е.Н. Сосенушкин, В.В.Третьюхин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2008, № 10. – С. 30-32.
9. Артеc А.Э., Групповые технологические процессы штамповки трубных переходов в мелкосерийном и серийном производстве [Текст] / А.Э. Артеc, Е.Н. Сосенушкин, В.В.Третьюхин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2007, № 7. – С. 18-24.

УДК.621.774

Мехнин Д.С. магистр; Сабоп С.Ф. доц., к.т.н.,

НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УГЛОВОЙ РАЗДАЧИ ПЛОСКИХ ФЛАНЦЕВ В ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКЕ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08X18H10

Приведено основные результаты исследования угловой раздачи трубчатых заготовок численным моделированием. Определено распределение степени использования ресурса пластичности, интенсивности напряжений и деформаций в деформированной заготовке а так же энерго-силовые параметры процесса угловой раздачи.

Ключевые слова: угловая раздача, интенсивность напряжений и деформаций при раздаче, степень использования ресурса пластичности при раздаче.

*D.S. Mekhnin, Graduate; S.F. Sabol, Ph.D.
NTUU «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

**RESEARCH OF FLAT ANGULAR DISTRIBUTION OF THE PIPE FLANGE
WORKPIECES OF STAINLESS STEEL 08X18H10**

We presented the main results of the angular distribution of tubular workpieces by numerical modeling method. Determined the distribution of the degree of use of plasticity resource, deformation and stress intensity on the volume of the workpiece deformed energy power parameters of the angular distribution.

Keywords: *angular distribution, intensity of the stress and strain during distribution processes, degree of use of plasticity resource during distribution processes.*

Н.В. Гончар, к.т.н., доцент

Е.В. Кондратюк, к.т.н., доцент

Д.Н. Степанов, старш. преподаватель

Запорожский национальный технический университет

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИУСА СКРУГЛЕНИЯ ОСТРЫХ КРОМОК СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФОРМ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

В статье приводятся рациональные режимы и условия обработки сложнопрофильных кромок деталей из жаропрочных сплавов щеточными полимерно-абразивными инструментами. Также в ней описывается методика измерения радиуса скругления.

Ключевые слова: *острые кромки, заусенец, радиус скругления, детали сложных пространственных форм, инструмент на основе полимерно-абразивных волокон.*

Вступление. В настоящее время является актуальным поиск новых методов и инструментов для обработки кромок деталей сложной конфигурации. Например, удаление заусенцев, оставленных на поверхности выхода инструмента после фрезерования зубчатого венца, протягивания «Т-образных» пазов, конструктивных соединений типа «елка» или «ласточкин хвост», особенно, если к качеству полученных поверхностей, к размеру и форме полученного радиуса скругления предъявляются высокие требования. К тому же обработку фасонных кромок сложно механизировать или автоматизировать из-за необходимости точного позиционирования инструмента относительно контура кромки.

Эта проблема особенно актуальна для таких отраслей машиностроения, как авиадвигателестроение, приборостроение и т.п., в которых тонкостенные детали сложного профиля преваляют из-за требования к уменьшению массы без потери прочности. К тому же эти детали изготавливают из специальных, например, жаропрочных сплавов, таких как никелевые и титановые авиационные сплавы, относящиеся к труднообрабатываемым, и требующие при обработке больших сил резания. Поэтому слесарную и финишную обработку кромок таких деталей производят многоступенчато, так как высокая силовая нагрузка недопустима для тонкостенных деталей, и зачастую с применением ручного труда.

Для повышения ее производительности необходимо выполнить следующие требования:

- равномерная обработка кромок сложной формы и труднодоступных мест;
- невысокое силовое давление;
- возможность механизации;
- возможность высокопроизводительной обработки труднообрабатываемых сплавов.

Обзор последних публикаций и исследований.

Вышеобозначенные требования обеспечиваются применением щеточных инструментов вращательного действия на основе полимерно-абразивных (ПА) волокон (рис. 1). Волокна диаметром 0,5...1,5 мм содержат 30...40% абразива определенной зернистости в полимерной основе, что придает им гибкость и упругость [1]. Главное и вспомогательные движения при обработке дисковыми ПА инструментами аналогичны крацовке металлическими щеточными кругами.

ПА инструменты за счет гибкости волокон равномерно обрабатывают сложные кромки и труднодоступные места; дают возможность механизации, т.к. не требуют точного позиционирования, а, значит, сложных и дорогих систем управления автоматических устройств, их программирования и техобслуживания; нежесткие волокна обеспечивают невысокий уровень силового воздействия на обрабатываемую поверхность и за счет высо-

кой кинетической энергии при микрорезании позволяют эффективно обрабатывать труднообрабатываемые стали и сплавы [2, 3].

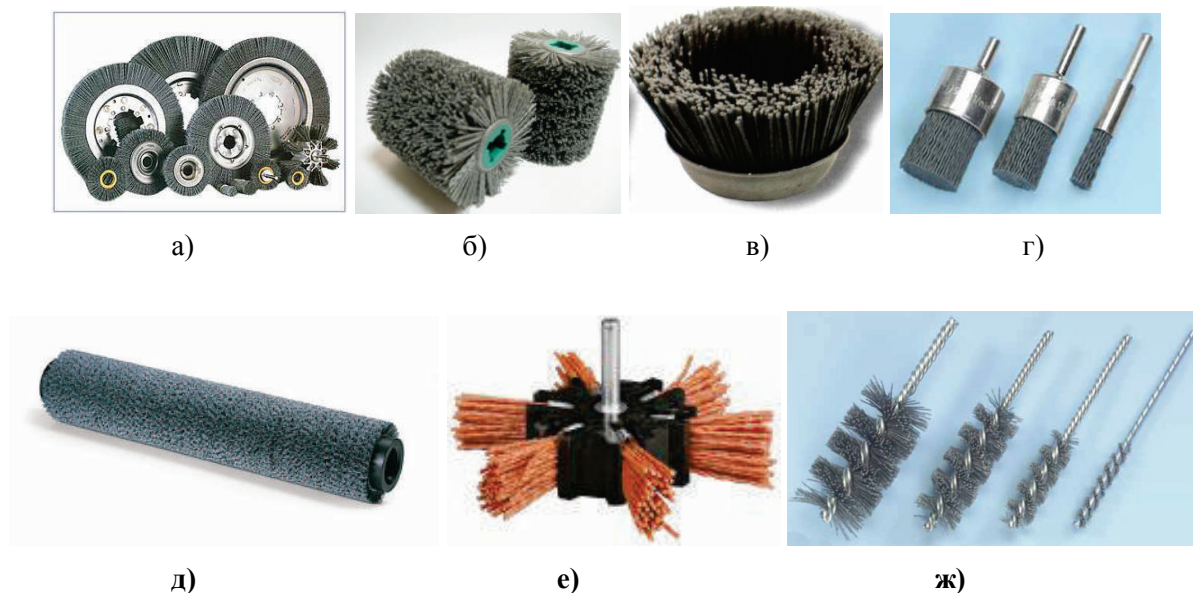


Рис. 1. Конфигурация ПАИ

а) дисковый; б) цилиндрический; в) торцевой; г) концевой;

д) роликовый; е) лепестковый; ж) ершики.

Цель данной работы – оценка влияния технологических факторов процесса обработки ПА инструментами на величину и форму полученного радиуса скругления; определение рациональных режимов и условий обработки ПА инструментами острых кромок (в т.ч. удаление заусенцев) лабораторных образцов и апробация их на «елочных» хвостовиках лопаток турбины авиадвигателя; анализ возможности механизации данной слесарной обработки лопаток после фрезерования и шлифования «елки» хвостовика.

Основной материал. Для проведения исследований было использовано оборудование (плоскошлифовальный станок мод. 3Г71 с устройством регулировки скорости вращения шпинделя), основная (поворотные тиски) и вспомогательная (переходники) оснастка, предусматривающие возможность быстрой смены инструментов, использование накладок на них, большой диапазон подач, скоростей, удобство установки-снятия образцов, закрепление их под определенным углом, безопасность работы, удобство подсоединения контрольно-измерительной оснастки.

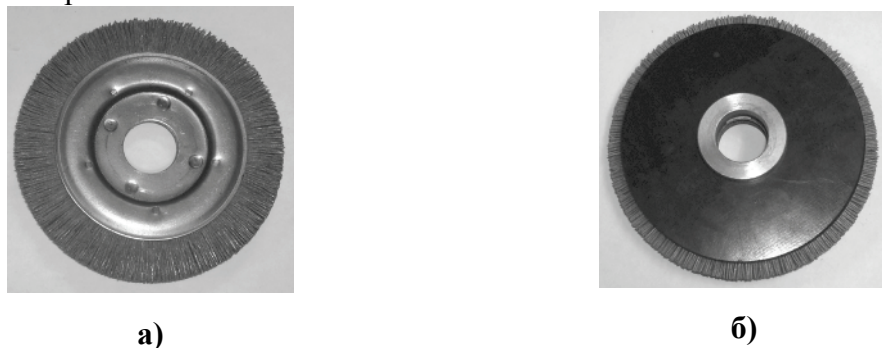


Рис. 2. Внешний вид применяемых в исследовании дисковых ПА инструментов

(а – «мягкий»; б – с накладками – «жесткий»).

Для обработки применяли обычный дисковый ПА инструмент фирмы OSBORN [4] $\varnothing 145 \times 36 \times 12$ с длиной волокна 32 мм («мягкий», рис. 2,а) и так называемый «жесткий» (рис. 2,б), у которого с помощью специальных накладок вылет волокон уменьшен до 8 мм без изменения общего диаметра.

По предварительно проведенным исследованиям были выбраны параметры инструмента, обеспечивающие высокую производительность удаления заусенцев после фрезерования и шлифования: диаметр ПА волокон 1 мм, зернистость абразива F280, материал абразивного волокна – карбид кремния 63С. Скорость обработки составляет для сталей, в т.ч. жаропрочных, алюминиевых и никелевых сплавов 15...18 м/сек, для титановых сплавов 4...6 м/сек.

На прямоугольных лабораторных образцах ПА инструментами обрабатывали кромку с предварительно наведенным заусенцем, меняя натяг i , продольную подачу S , количество двойных ходов и положение плоскости с заусенцем относительно направления продольной подачи.

Натяг i настраивали перемещением инструмента в вертикальном направлении (рис. 3), контролировали с помощью индикаторных часов.

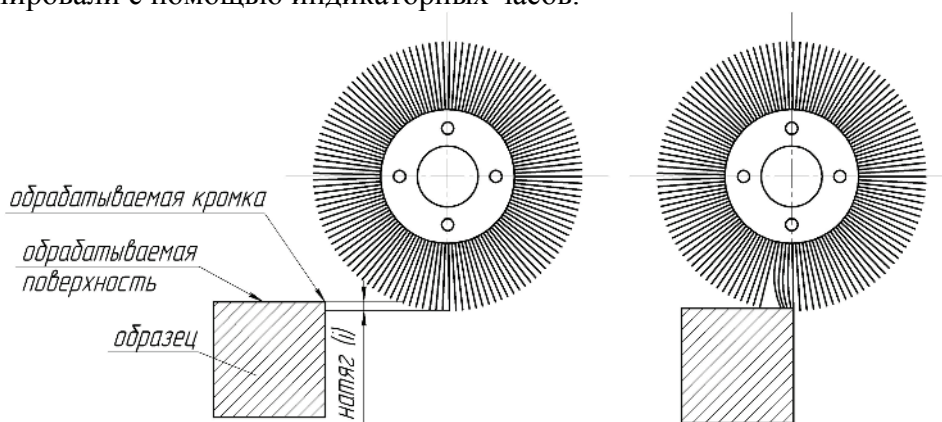


Рис. 3. Схема установки натяга перед обработкой дисковым ПА инструментом.

Одной из проблем, возникающих при слесарной обработке удаления заусенцев и скругления острых кромок деталей машин, является контроль качества полученных мелкогабаритных элементов, таких как фаска или радиус скругления. Зачастую его проводят по эталонной детали, оттиску и другими методами в зависимости от уровня ответственности полученной скругленной поверхности. В случае, когда важно определить не только величину, но и правильность формы фаски или стабильность радиуса скругления, а иногда и шероховатость этих конструктивных элементов – требуется дорогостоящее оборудование типа контуромер НОММЕЛ Т-8000, имеющееся даже на крупных машиностроительных предприятиях в единичном экземпляре.

Альтернативой является контрольная оснастка [5], общая схема которой включает в себя: профилограф-профилометр, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), любой персональный компьютер – все три составляющих общедоступны, недороги и легко собираются из элементов, имеющихся в лабораториях контроля качества деталей.

Особенностью контроля кромок является установка детали таким образом (рис. 4), чтобы избежать касания боковой поверхности иглы шупа профилографа-профилометра с образцом, т.е. если образец призматический, его устанавливали под 45° .

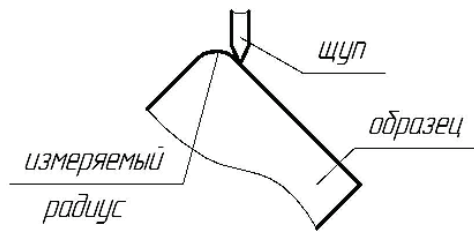


Рис. 4. Относительное положение иглы щупа и образца.

Профилограф-профилометр мод. 170311 подключали через АЦП Е-140 (фирмы «L-Card») к ноутбуку. Масштаб графика по осям X и Y – одинаков. Тарировку осуществляли с помощью плоскопараллельных концевых мер длины. Прибор отображает контур радиуса скругления в нормальном (или в другом выбранном) сечении в установленном масштабе. Далее с помощью графической программы «Компас 3D» проводили обработку полученных радиусов скругления.

Изучение процесса поэтапного удаления заусенца и скругление острой кромки радиусом при обработке ПАИ образца, установленного параллельно плоскости стола (рис. 4,а), показало возможность быстрого (за 1...3 дв.х.) удаления заусенца после протягивания, фрезерования и шлифования величиной 0,2...1 мм.

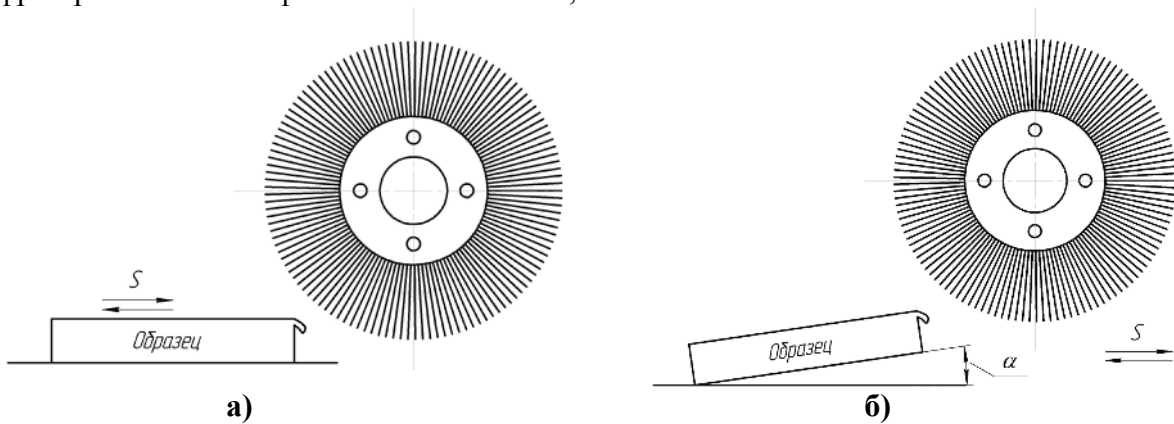


Рис. 4. Схема обработки образцов.

Рациональные режимы были выбраны после проведения однофакторных экспериментов, результаты которых указаны на рис. 5. Как видно более эффективно работает ПА инструмент с большим вылетом волокон $L=32$ мм.

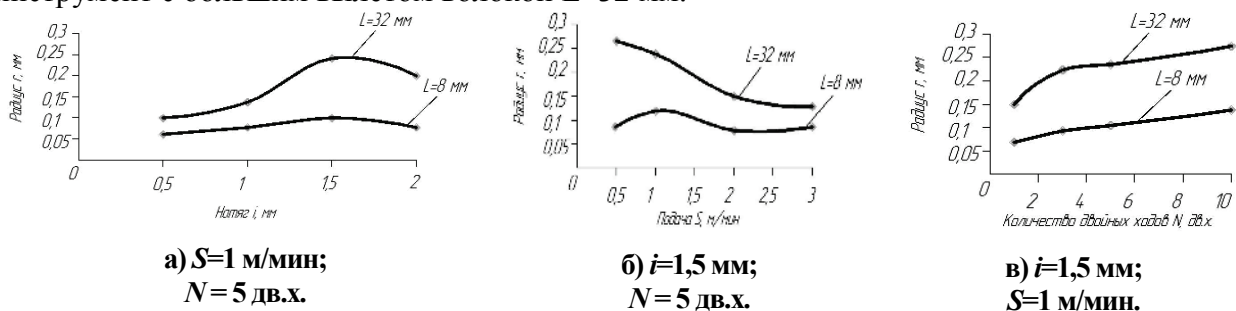
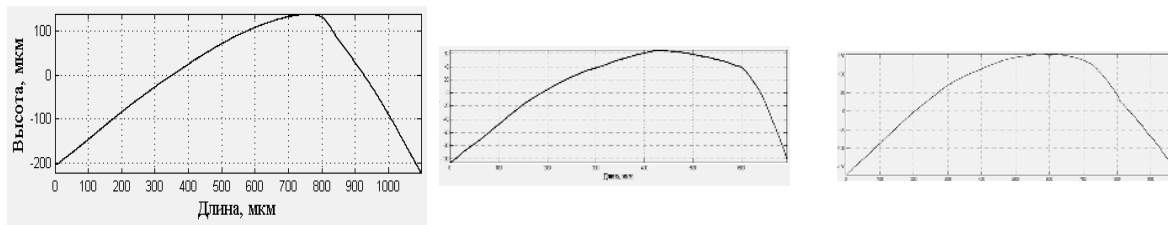


Рис. 5. Влияние технологических факторов на радиус скругления кромки ($\alpha=0$).

Полученный радиус скругления несколько «завален» – в виде двойной скругленной фаски в сторону бывшего заусенца (рис. 6).



а) $i=1,5$ мм; $S=1$ м/мин;
 $N = 1$ дв.х.; $L=12$ мм

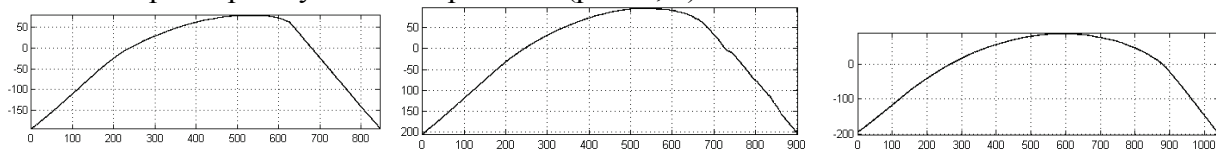
б) $i=3$ мм;
 $S=1$ м/мин,
 $N = 5$ дв.х.;
 $L=12$ мм

в) $i=1,5$ мм;
 $S = 1$ м/мин,
 $N = 5$ дв.х.; $L=32$ мм

Рис. 6. Профиль скругления после обработки ПАИ ($\alpha=0$).

Следует отметить, что такое расположение образца дает возможность тут же полировать плоскую поверхность образца; заполировывается также кромка и с другой стороны (на выходе ПАИ); заусенец, если он есть, удаляется полностью с несколько меньшей производительностью, т.к. обработка этой кромки происходит при попутном вращении инструмента. Радиус скругления на этой кромке соответственно, меньше, и форма его также не симметрична относительно биссектрисы угла.

Для получения радиуса скругления правильной формы несколько изменили ориентацию образца (рис. 4,б). Предварительные исследования на рациональных режимах, полученных ранее, показали, что наиболее правильную форму радиуса скругления обеспечивает установка с $\alpha=10^\circ+5^\circ$, т.е. когда плоскость с заусенцем находится под углом $75...80^\circ$ по направлению к вектору продольной подачи ПАИ. При такой установке был проведен весь комплекс однофакторных экспериментов (изменяли i , S , N , L) с целью уточнить параметры и условия обработки (рис. 7, 8).

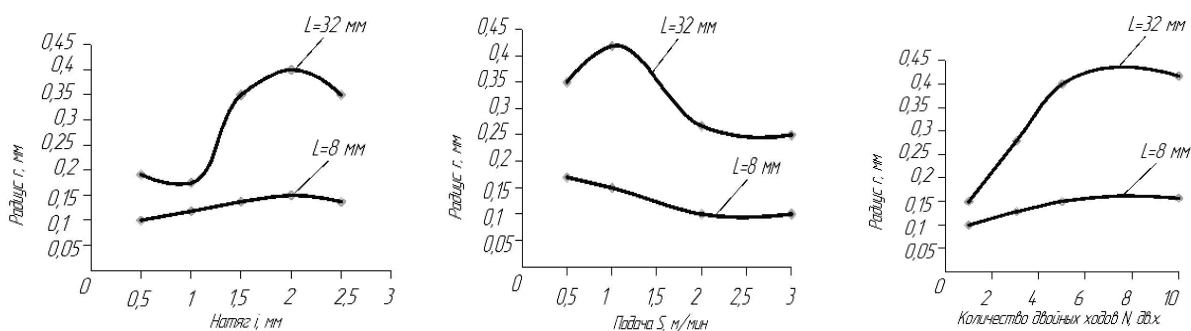


а) $i=1,5$ мм;
 $S = 1$ м/мин,
 $N = 1$ дв.х.; $L=12$ мм

б) $i=1,5$ мм;
 $S=1$ м/мин,
 $N = 5$ дв.х.; $L=12$ мм

в) $i=1,5$ мм;
 $S=1$ м/мин,
 $N = 5$ дв.х.; $L=32$ мм

Рис. 7. Профиль полученного радиуса скругления ($\alpha=10^\circ$).



а) $S=1$ м/мин;
 $N = 5$ дв.х.

б) $i=1,5$ мм;
 $N = 5$ дв.х.

в) $i=1,5$ мм;
 $S=1$ м/мин.

Рис. 8. Зависимость радиуса скругления при установке образца под углом $\alpha=10^\circ$.

При такой установке образца – плоскость с заусенцем выставлена под углом $75...80^\circ$ к направлению подачи ПАИ – наилучшим вариантом быстрого снятия заусенцев и полу-

чения радиуса скругления правильной формы рационально использовать «мягкий» инструмент (вылет волокон $L=30\dots35$ мм) с режимами: натяг $i=1,5\dots2$ мм, подача $S=1$ м/мин, $N=5$ дв.х.

Для проверки установленных рациональных режимов и условий обработки ПАИ были обработаны хвостовики типа «елка» нескольких контрольных лопаток после протягивания и шлифования. Для правильного положения плоскости с заусенцем лопатку во время обработки хвостовика зажимали в поворотные тиски, которые позволяют выставлять плоскости хвостовика под любым углом. Контроль проводили по вышеописанной методике.

Результаты замеров по всем четырем фасонным кромкам каждой лопатки показали следующее: по контуру прямолинейной части ножки хвостовика по всем сечениям и граням радиус скругления правильной формы, его величина $0,25\dots0,6$ мм; по контуру «елочной» части заусенец снят везде – величина радиуса во впадинах и выступах составила $0,1\dots0,3$ мм, что обеспечило выполнение требований чертежа. Так как плоские и рабочие поверхности хвостовика не обрабатывались вообще, то их размер остается исходным.

Такое положение хвостовика лопатки можно обеспечить, например, с помощью специального кассетного приспособления, что дает возможность максимально сократить ручной труд на этой операции, а также одновременно обрабатывать несколько лопаток.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

– инструмент на основе полимерно-абразивных волокон можно успешно применять для обработки кромок сложнопрофильных деталей из различных материалов, в том числе из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов;

– в случае, когда не важна форма радиуса скругления, а необходимо быстро избавиться от заусенцев и скруглить острые кромки после фрезерования или протягивания, то можно не затрачивать время и средства на выставление детали на определенный угол, и обработать ее ПАИ со следующими, установленными выше режимами: вылет волокон $L=30\dots35$ мм, натяг $i=1,5$ мм, подача $S=1$ м/мин, $N=5$ дв.х.;

– наилучшим вариантом быстрого снятия заусенцев и получения радиуса скругления правильной формы рационально использовать «мягкий» инструмент с режимами: вылет волокон $L=30\dots35$ мм, натяг $i=1,5\dots2$ мм, подача $S=1$ м/мин, $N=5$ дв.х. При этом плоскость с заусенцем должна составлять $75\dots80^\circ$ к направлению подачи полимерно-абразивного инструмента;

– применение ПАИ дает возможность механизировать слесарные операции, ранее выполняемые вручную.

Литература

1. Абрашкевич Ю.Д. Расширение области применения полимерно-абразивных щеток [Текст] / Ю.Д. Абрашкевич, А.Н. Компанцев // *Механизация*. – 1996. – №1. – С. 9-14.
2. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава ВТ8-М [Текст] / Д.Н. Степанов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2012. – №2. – С. 87-90.
3. Гончар Н.В. Особенности финишного этапа изготовления дисков компрессоров ГТД [Текст] / Н.В. Гончар // *Проблеми техніки*. – 2013. – №2. – С. 24-32.
4. OSBORN International: Каталог продукции [Текст] / Osborn PRO, 2012. – 101 с.
5. Степанов Д.Н. Методика контроля качества выполнения радиусов скругления кромок [Текст] / Д.Н. Степанов, Н.В. Гончар, В.А. Щекин, М.В. Зинченко – *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок. Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции, 23-28 сентября 2013 г.* – Алушта. – С. 92-94.

© Н.В. Гончар, Е.В. Кондратюк, Д.М. Степанов

УДК 621.7.015 : 621.923.9

Н.В. Гончар, к.т.н., доцент; Е.В. Кондратюк, к.т.н., доцент;

Д.М. Степанов, старш. викладач

Запорізький національний технічний університет

**ФОРМУВАННЯ РАДІУСА СКРУГЛЕННЯ ГОСТРИХ КРОМОК
СКЛАДНОЇ ПРОСТОРОВОЇ ФОРМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЛІМЕРНО-
АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТА**

В статті приводяться раціональні режими та умови обробки складнопрофільних крайок деталей з жароміцних сплавів щітковими полімерно-абразивними інструментами. Також в ній описується методика вимірювання радіусу скруглення.

Ключові слова: *гострі крайки, задирка, радіус скруглення, деталі складних просторових форм, інструмент на основі полімерно-абразивних волокон.*

UDC 621.7.015 : 621.923.9

N.V. Gonchar, Ph.D.

E.V. Kondratuk, Ph.D.

D.N. Stepanov, senior lecturer

Zaporozhe National Technical University

**FORMATING OF THE FILLET RADIUS OF SHARP COMPLEX-SHAPE
EDGES BY POLYMER-ABRASIVE TOOL**

The article presents the rational modes and conditions for the processing of the edges of parts from superalloys by brush polymer-abrasive tools. It also describes the method of measuring the fillet radius.

Keywords: *sharp edges, burr, fillet radius, tool-based polymer-abrasive fibers, parts of complex space forms.*

ЕКОНОМІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ В ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ

Показана наявність на Україні значних запасів сировини для отримання генераторного газу та можливість заміни ним значної кількості природного газу. Експериментальним шляхом підтверджена працездатність двигуна УД-15 при роботі на генераторному газі.

Ключові слова: газогенератор, генераторний газ, альтернативні палива, поршневі двигуни, екологічний ефект.

Вступ. Загроза вичерпання світових запасів нафти та нерівномірність їх географічного розміщення при щорічно зростаючих об'ємах видобутку, погіршення якості нафти нових родовищ і, як наслідок, підвищення матеріальних затрат на їх розробку обумовлюють зміну структури паливно-енергетичного балансу. На даний час основними джерелами енергії в паливно-енергетичному комплексі є нафта, вугілля та газ. Вони ж є основними джерелами сировини для моторних палив. За прогнозами їх ресурси оцінюються відповідно 15 трлн.т., 500 млрд.т. та 400 трлн.м³., при розвіданих запасах 1685 млрд.т., 137 млрд.т., 140 трлн. м³. За різними джерелами інформації при збереженні рівня видобутку та споживання розвіданих запасів вугілля вистачить приблизно на 400 р., нафти на 40...50 р. та газу на 60 р.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. З історії відомо, що в період до 60-х років минулого століття в ряді місцевостей досить широко застосовувалися двигуни внутрішнього згоряння, що працювали на генераторному газі [3,4,5,6,]. Зі збільшенням видобутку нафти, вдосконаленням технологій по її переробці та підвищенням виходу рідких моторних палив в процесі її переробки генераторний газ, як моторне паливо для ДВЗ, поступово здав позиції. Очевидно, що неосвоєні досі запаси будуть активно освоюватися, але вартість їх видобування, в зв'язку з використанням менш економічно привабливих родовищ, буде постійно зростати. Динаміку зміни ціни на нафту та природний газ за останні роки на підставі [1] надано на Рис 1.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Якщо провести аналіз зміни ціни на нафту, а відповідно і на паливо для ДВЗ отримане на її основі за останні 30 років, то можна побачити чітку тенденцію загального невпинного зростання цін, така ж тенденція спостерігається і на ринку природного газу. Графіки цін проходять майже еквідистантно і вартість природного газу в перерахунку на одиницю енергії майже завжди менша ніж нафти.

З іншого боку в процесі життєдіяльності суспільства накопичується значна кількість відходів (відходи деревообробної промисловості та сільського господарства, побутове та промислове сміття, опале листя...), які мають у своєму складі значну кількість органічних та неорганічних горючих речовин та є джерелом енергії, і на даний час потребують значних матеріальних затрат на утилізацію. Дані відходи будучі екологічно і пожеже небезпечними водночас при використавши відповідної технології переробки можуть бути сировиною для виробництва моторних палив. За рахунок цього можна повернути значну частину затрат на їх утилізацію та отримати власну теплову і електричну енергію, вирішивши при цьому ряд екологічних та економічних проблем.

Постановка задачі дослідження. В зв'язку з наведеним вище виникає необхідність оцінити наявні запаси сировини, яка на даний час є відходами, економічну, екологічну та

технічну доцільність їх використання для отримання з неї палива для двигунів внутрішнього згоряння та здійснити експериментальну перевірку можливості використання даного палива в поршневих двигунах.

Дана робота на даний час є досить актуальною, що підтверджується активізацією робіт по використанню альтернативних відновлюваних моторних палив. Одним з видів таких палив для ДВЗ є генераторний газ, який можна отримати з органічних відходів сільськогосподарства, деревообробної промисловості та сміття. Широке впровадження генераторного газу дозволить значно скоротити витрати природного газу, що є дуже важливим питанням сьогодення.

Основний матеріал і результати.

Оцінка запасів сировини для отримання генераторного газу, економічні та технічні аспекти його застосування. Середні ціни на сировину, окрім відходів, придатну для отримання генераторного газу станом на період літо - осінь 2013 року наведено нижче: ціна на тюковану солому – 600 грн/т., - пелети з соломи - 700 грн/т., - пелети з деревини – 750 грн/т. З одного кілограма сировини можна отримати від 2 до 2,5 м³ генераторного газу. Таким чином вартість 1 м³ генераторного газу відносно витрат на первинне паливо складає від 30 до 40 коп.

В повну вартість генераторного газу, окрім вартості первинного палива входять витрати на установку для переробки первинної сировини у паливо придатне для ДВЗ, транспортування сировини до місця переробки, підсушування первинного палива та його зберігання, заробітна плата працівникам, витрати енергії на привід агрегатів установки та інше. З метою оцінки економічної доцільності використання генераторного газу виконано ряд техніко-економічних розрахунків. Виконані техніко-економічні розрахунки показали, що собівартість генераторного газу в більшості розглянутих випадків наближається до вартості традиційних енергоносіїв, а часто і перевищує їх ціну. Використання в якості первинного палива побутових та промислових відходів та мало ліквідних продуктів сільськогосподарства, скорочення транспортних витрат шляхом наближення споживачів до сировини знижує собівартість генераторного газу, тому використання альтернативних енергоносіїв є економічно виправданим лише при комплексному отриманні енергії разом з переробкою та утилізацією відходів виробництва, застосуванні когенераційних технологій.

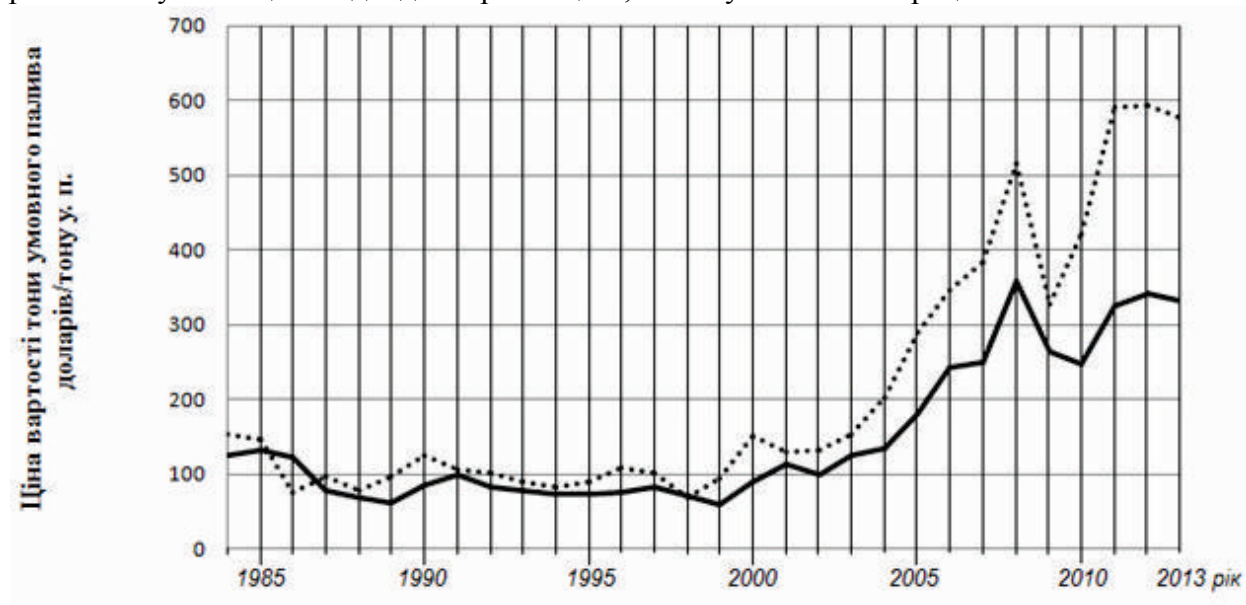


Рис. 1 Динаміка зміни ціни за тону умовного палива за даними British Petroleum Statistical Review of World Energy, London.

..... нафта марки Brent. — природний газ

Таблиця 1 Ефективність використання, після відповідної переробки, різних видів сільськогосподарської біомаси в якості палива для ДВЗ.

Вид сировини	Метод виробництва біопалива	Вид отриманого біопалива	Врожайність по сухій біомасі, т/га	Вихід біопалива, т/га	Теплотворна здатність біопалива	Тепловий еквівалент
Солома (ячмінь, пшениця)	Газифікація в газогенераторах	Генераторний газ	1-1,5	-	17300 кДж/кг	0,59*
Деревні чурки	Газифікація в газогенераторах	Генераторний газ	-	-	4000-6000 кДж/м ³	0,136-0,205
Деревне вугілля	Газифікація в газогенераторах	Генераторний газ	-	-	4600-5440 кДж/м ³	0,16-0,186
Силос кукурудзи	Швидкий піроліз рослинної біомаси	Біодизель	9	7	18000-32040 кДж/кг	0,61-1,089
Силос сорго, суданка	Швидкий піроліз рослинної біомаси	Біодизель	15	7	18000-32040 кДж/кг	0,61-1,089
Гранульована лузга соняшника	Газифікація в газогенераторах	Генераторний газ	-	-	17300 кДж/кг	0,59*

Примітка * - тепловий еквівалент сировини для переробки (первинного палива)

Альтернативні сировинні ресурси за своїм характером дуже різноманітні. Це має бути враховано при виборі технології їх переробки в генераторний газ, яка безпосередньо впливає на властивості та якість отриманого газоподібного палива. З метою порівняння різних видів альтернативних палив, що дуже різняться за своїми властивостями, необхідно привести їх до одного знаменника – однакових одиниць вимірювання. Отримані результати занесемо до таблиці 1.

Як показує аналіз літератури хімічний склад та калорійність генераторного газу насамперед залежать від процесів та умов у камері газифікації: температури, зернистості та густини реакційного прошарку палива, вологості палива, рівномірності подачі палива в камеру газифікації, режиму роботи газогенератора, тривалості контакту шару палива з повітрям, а також стану системи очищення та охолодження генераторного газу (гідравлічний опір системи подачі газу, забруднення фільтрувальних елементів). На них в свою чергу справляють вплив конструктивні особливості газогенератора: геометрична форма камери газифікації, профіль, розміри та розміщення повітряних фурм, величина обігріву паливного бункеру, кут нахилу стінок бункеру та ін. [3,4,5,6].

Згідно з таблицею 11 [6 стор.52] чим нижча вологість палива, тим вищою є теплотворна здатність палива, тому важливими є заходи направлені на організацію правильного зберігання палива для газогенератора та контролю його параметрів (насамперед вологості) перед подачею в газогенератор, одним з відомих методів стабілізації складу генераторного газу є карбонізація деревини, яка дозволяє вилучити з палива вологу та значно підвищити його теплотворну здатність (1,5-2 рази), при цьому деревина набуває вищої твердості та

стає менш гігроскопічною, газ, що утворюється в результаті газифікації містить менше смол та кислот. Даний процес потребує додаткових енергетичних затрат. Врахувати всі перелічені фактори, що впливають на стабільність генераторного процесу це є досить складна задача, тим більше, що коригувати більшість з них в ході роботи установки практично неможливо. Через непостійність генераторного процесу складно підтримувати заданий режим роботи двигуна. При зниженні калорійності газу, як і при її підвищенні, коливанні хімічного складу генераторного газу необхідно постійно підтримувати відповідну пропорцію між газом та повітрям шляхом коригування роботи змішувача. Одним з відомих методів вирішення цієї проблеми є присадка рідкого палива до основної порції газового палива, але цей спосіб суперечить самій ідеї використання генераторного газу в якості альтернативного палива для ДВЗ. Тому для стабілізації роботи газомоторні установки необхідно обладнати електронною системою контролю за складом відпрацьованих газів, яка в залежності від вмісту у них кисню, регулюватиме якісне співвідношення суміші генераторний газ/повітря на вході в двигун, що дозволить забезпечити оптимальні параметри для його стабільної роботи. На калорійність генераторного газу впливає подача в газогенератор певної кількості водяної пари, отже, проблему нестабільності генераторного газу може вирішити комплекс заходів таких як: внесення присадки у вигляді водяної пари в камеру газифікації для підвищення вмісту водню в газі, постійний контроль за складом відпрацьованих газів двигуна та коригування у відповідності з отриманими даними співвідношення між газом та повітрям з допомогою змішувача. Необхідно відмітити, що до останнього часу вимоги до палив визначалися, головним чином, наявністю відповідної сировинної бази та рівнем технологічного розвитку, на даний час і особливо в перспективі тенденції розвитку паливно-енергетичної бази все більше будуть визначатися економічними та екологічними чинниками. У зв'язку з цим перспективним є широке використання газових палив, отримання відновлюваних газів альтернативного походження. Переведення двигунів внутрішнього згоряння на газоподібне паливо дозволяє вирішити ряд проблем, таких як: зниження негативного впливу відпрацьованих газів на навколишнє середовище, зниження експлуатаційних затрат, підвищення моторесурсу двигуна. Вартість отримання енергії за рахунок альтернативних енергоносіїв на даний час вища, ніж за рахунок традиційних енергоносіїв, але в майбутньому різниця буде поступово скорочуватися. Хоча в районах, які є віддаленими від централізованого постачання енергоносіїв і які мають запаси природної сировини застосування альтернативних енергоносіїв є економічно ефективнішим, ніж постачання традиційних. Важливе значення утилізація біомаси має в лісному, сільському господарстві, де щорічно на різні технологічні потреби витрачається велика кількість палива, а разом з цим в процесі виробництва продукції утворюється значна кількість відходів, які є органічним матеріалом цілком придатним для отримання генераторного газу.

Проаналізувавши можливості використання альтернативних джерел енергії, зокрема у вигляді генераторного газу, можна зробити висновок що їх застосування дозволяє:

- Знизити рівень енергетичної залежності України від країн експортерів енергетичних ресурсів.

- Зменшити потребу в традиційних видах палив (нафтові палива, вугілля, природний газ) при виробництві теплової та електричної енергії та спрямувати вивільнене паливо на потреби тих споживачів де застосування альтернативних палив недоцільне чи неможливе (транспорт, військова техніка, аварійні електростанції, тощо).

- Знизити викиди парникових газів в атмосферу та надати можливість продавати квоти на ці викиди іншим державам, за умови розвитку цих технологій на державному рівні.

- Утилізувати відходи різних галузей народного господарства за рахунок чого вирішити ряд соціальних та екологічних задач.

- При використанні газогенераторних установок у віддалених районах є технічний ефект – витрати на транспортування нафтових палив в дані райони іноді значно вищі, ніж затрати на виробництво генераторного газу.

- При застосуванні газогенераторних установок є екологічний та соціальний ефект – витрати на паливо компенсуються зменшенням шкідливого впливу на довкілля звалищ сміття, а витрати на збір і утилізацію органічних відходів частково компенсуються за рахунок продажі теплової та електричної енергії.

Результати експериментальних досліджень газогенераторної установки на базі двигуна УД-15. Експериментальні дослідження проводилися на двигуні УД-15 модернізованому для роботи на газоподібних паливах. В ході модернізації двигун був обладнаний змішувачем та дросельною заслінкою для регулювання коефіцієнта надлишку повітря. Газогенераторна установка була укомплектована газогенератором оберненого процесу і блоком підготовки генераторного газу, де відбувалося його очищення та охолодження. Схема дослідної газогенераторної установки надано на рис. 2.

В ході експериментальних досліджень ставилася задача експериментальної перевірки принципової можливості роботи двигуна УД-15 на генераторному газі в діапазоні потужностей від холостого ходу до 3...4 кВт та визначення проблемних питань пов'язаних з використанням генераторного газу на двигунах даного типу.

Експериментальна перевірка використання генераторного газу підтвердила працездатність створеної газогенераторної установки на базі двигуна УД-15 та показала ряд проблемних питань використання генераторного газу в якості моторного палива для ДВЗ які потребують вирішення, таких як:

1. Нестабільність генераторного газу в часі по складу та калорійності в залежності від якості палива та режиму роботи.

2. Наявність в генераторному газі смол та значної кількості сажі.

3. Висока температура генераторного газу на виході з газогенератора та потреба в його охолодженні.

4. Інерційність робочого процесу газогенератора та циклічність поповнення його свіжим паливом.

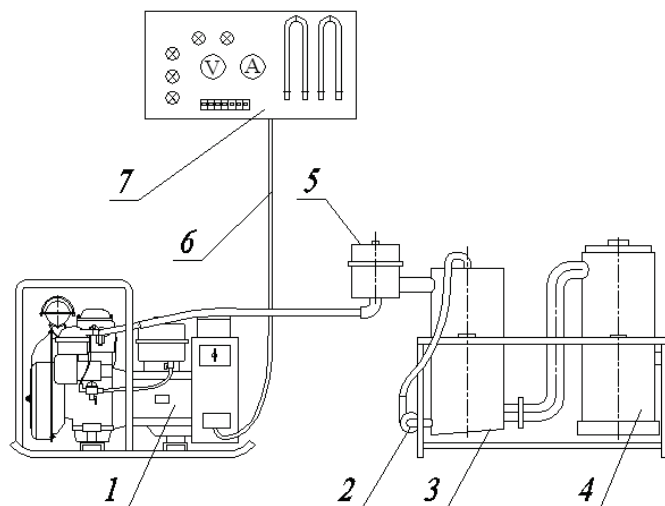


Рис. 2 Схема газомоторної установки

1-стаціонарна електростанція на базі двигуна УД-15, 2- водяний насос, 3- комбінований фільтр-охолоджувач, 4- газогенератор оберненого процесу газифікації, 5- фільтр тонкого очищення, 6- електричні кабелі, 7- навантажувальний щит.

Висновки. Наявні на Україні запаси органічної сировини достатні для покриття до 10% потреби в енергоресурсах шляхом переробки її на генераторний газ.

Високі затрати на транспортування, зберігання, сортування та підготовку органічної сировини для отримання генераторного газу роблять доцільним її використання лише в місцях її скупчення чи на незначній відстані від них.

Використання в якості сировини ряду відходів та сміття вирішує екологічну проблему і дозволяє зменшити затрати на їх утилізацію.

Підтверджено працездатність газогенераторної установки потужністю до 4-х кВт придатної для отримання електричної енергії на сільському подвір'ї чи фермерському господарстві.

Проведені експериментальні дослідження показали проблемні питання використання генераторного газу в поршневих двигунах малої потужності - наявність в отримуваному газі смол, нестабільність робочого процесу газогенератора малої потужності, що викликає нестабільність якості газу по ходу роботи газогенератора, значні затрати палива і часу на пуск установки та низьку готовність до термінового пуску.

Ефективність застосування генераторного газу не може бути забезпечена на достатньому рівні без впровадження досягнень сучасної електроніки та нових матеріалів (системи запалювання та автоматичного регулювання, термостійкі матеріали для камер газифікації, тощо).

Література

1. *British Petroleum Statistical Review of World Energy, London, June 2014* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.bp.com/statisticalreview>.

2. Горбов В.М. *Енергетичні палива: Навчальний посібник* [Текст] / В.М. Горбов. – Миколаїв: УДМУ, 2003. – 328 с. – ISBN 966 – 321 – 004 – 4.

3. Коллеров Л.К. *Газомоторные установки* [Текст] / Л.К. Коллеров. – М.: Машиз, 1951. – 237 с.

Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов [Текст] / Г.А. Терентьев, В.М. Тюков, Ф.В. Смаль – М.: Химия, 1989. – 272 с. – ISBN 5 – 7245 – 0319 – 0.

4. Токарев Г.Г. *Газогенераторные автомобили* [Текст] / Г.Г. Токарев. – М.: Машиз, 1955. – 204 с.

5. Юдушкин Н. Г. *Газогенераторные тракторы* [Текст] / Н.Г. Юдушкин, М.Д. Артамонов. – Л.: Машиз, 1955. – 243 с.

6. *Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология: справочник* [Текст] / В.Н. Бакулин, Е.М. Бреценко, Н.Ф. Дубровкин, О.Н. Фаворский. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 614 с. – ISBN 978 – 5 – 383 – 00193 – 6.

© С.М.Литвин, В.М.Манзюк

УДК 621.432

С.М.Литвин, к.т.н., доцент

В.М.Манзюк, аспирант

Первомайский политехнический институт национального университета кораблестроения

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Показано наличие на Украине значительных запасов сырья для получения генераторного газа и возможность замены им значительного количества природного газа. Экспериментальным путем подтверждена работоспособность двигателя УД-15 при работе на генераторном газе.

Ключевые слова: газогенератор, генераторный газ, альтернативные топлива, поршневые двигатели, экологический эффект.

S.M.Lytvyn, Ph.D., Associate Professor

V.M.Manzyuk, a graduate student

Pervomajskyj Polytechnic Institute National University of Shipbuilding

**ECONOMIC AND TECHNICAL ASPECTS OF IN WOOD GAS
RECIPROCATING ENGINES**

Presence in Ukraine of large amounts of raw materials for generating gas and the possibility of replacing him a significant amount of natural gas. Experimentally verified the performance of the engine UD-15 while working on generator gas.

Keywords: gas, gasifier, alternative fuel, piston engines, ecologically effect.

В.Д. Рудь, д.т.н., проф.

Л.М. Самчук, к.т.н., ст. викладач

Ю.С. Повстяна, асистент

Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ НОВИХ ПОРИСТИХ ПРОНИКЛИВИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИРОДНИХ МІНЕРАЛІВ

На підставі експериментальних досліджень показана можливість виготовлення пористого проникливого фільтрувального матеріалу на основі алюмінію та сапонітової глини для регенерації технічних рідин та мастил. Проведені промислові випробування, які показали, що запропонований фільтрувальний матеріал можна використовувати для регенерації технічних рідин та мастил.

Ключові слова: *фільтрація, СВС – процес, технічне мастило, СВС - реакція.*

Вступ. Останнім часом вирішення проблеми конкурентноспроможності полягає у застосуванні енерго- та ресурсозберігаючих технологій. Якість вихідного продукту пов'язана з якістю вихідної сировини. Значна частка сучасних технологій пов'язана з використанням у виробничому процесі в якості вихідних або витратних матеріалів різного роду рідин та повітряних сумішей. Від їх чистоти хімічного складу залежить надійність та експлуатаційні характеристики виробів. Тому контроль та забезпечення якості основної чи допоміжної сировини при виготовленні відповідної продукції є не тільки актуальною але і вирішальною задачею.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. При використанні рідин та повітряних сумішей якість вхідних та допоміжних продуктів забезпечується фільтрацією [1]. Враховуючи відносно велику вартість фільтрувальних засобів розробкою технологій отримання проникливих фільтруючих матеріалів з природних мінералів є актуальним завданням. Автором [2,3] проведено систематичне вивчення природних сапонітових глин Ташківського родовища з точки зору технологічно-підготовчих заходів до їх подальшого використання у водопідготовці та водоочищенні. На основі комплексного дослідження сапонітових мінеральних покладів Хмельниччини хімічними, рентгенофазовим, термогравіметричним, рентгенофлуоресцентним, мікроскопічним методами визначено, що природна мінеральна бентаноїдна суміш не містить токсичних та радіоактивних компонентів та є прийнятною для очищення забруднених водних систем. У роботі [4] описано можливість застосування сапоніту у якості фільтрувального порошку для очистки забруднених розчинників для хімічної чистки одягу. Однак, крім теоретичних припущень цей процес не був досліджений експериментально, тому його практична ефективність невідома. Тим не менш, в роботі [5,6] розглянуто отримання конструкційних порошкових композиційних матеріалів із застосуванням методів СВС які в даний час розглядаються як найбільш перспективні.

Постановка завдання. Дослідження технології виготовлення пористого проникливого матеріалу на основі алюмінію та сапонітової глини для регенерації технічних рідин та мастил. Матеріали з алюмінієвих порошоків по ряду властивостей перевищують матеріали із залізних порошоків. Алюмінієві порошоків деталі мають більшу питому міцність, ніж деталі з сталевого порошку, завдяки більш низькій щільності. Сучасні галузі промисловості, такі як авіабудування, космічна техніка, приладобудування потребують створення матеріалів, що володіють високими експлуатаційними властивостями, в тому числі зносостійкістю, розмірною стабільністю в поєднанні з низькою щільністю і коефіцієнтом термічного розширення, близьким до сталі. Найбільш перспективними в цьому напрямку є порошкові алюмінієві композиційні матеріали, отримані методами порошкової металургії. Методом порошкової металургії можна отримувати

матеріали з особливими властивостями, наприклад немагнітні, для захисту від нейтронного потоку, високопористі для виготовлення носіїв каталізаторів, фільтрів тонкого очищення газів та рідин. Сучасний рівень технологічного та промислового розвитку машинобудування, що характеризується якісним підвищенням інтенсивності експлуатаційних режимів машин та устаткування, передбачає прискорення темпів розширення виробництва композиційних матеріалів і виробів, в яких забезпечено досягнення оптимальних вимог до експлуатації як окремих елементів, так і виробів в цілому. У зв'язку з підвищеними вимогами до технологічних процесів зростають вимоги до чистоти матеріалів та компонентів, що забезпечують реалізацію процесу. Дана задача розв'язується використанням фільтрації вихідних та робочих середовищ. Різноманіття конструкційних рішень і умов експлуатації пористих проникливих матеріалів припускає наявність різних типів матеріалів цього класу, орієнтованих на оптимальне з технічної та економічної точок зору використання їх для вирішення конкретних завдань. На сьогоднішній день одним з перспективних методів отримання проникливих пористих матеріалів є метод порошкової металургії. Кінцевою технологічною операцією, в даному випадку, є спікання попередньо спресованого фільтра. Застосовують різні методи спікання: пічне, індукційне, високотемпературний синтез. Високотемпературний синтез, один з методів отримання, пористих проникливих матеріалів, що поєднує в собі малу енергоємність, безвідходність і можливість динамічного варіювання структурних і інших властивостей продуктів. Ці передумови дозволяють використовувати економічну та просту технологію отримання пористих виробів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Існуючі в даний час методи одержання пористих проникливих матеріалів (ПММ) є далекими від досконалості. Вони характеризуються значними енергетичними і матеріальними витратами, а також малою продуктивністю. Великими можливостями в цьому плані володіє розроблений метод високотемпературного синтезу (СВС), основоположниками якого є академік Мержанов А.Г. і Боровінская І.П. [7]. СВС визначає структуру одержуваних продуктів та забезпечує можливість отримання цілого ряду продуктів з унікальними комплексами експлуатаційних властивостей. При цьому СВС як метод отримання пористих матеріалів поєднує в собі малу енергоємність, безвідходність і можливість динамічного варіювання структурних та інших властивостей продуктів. Ці передумови дозволяють використовувати економічну і просту технологію отримання пористих виробів.

Велике значення для одержання якісних виробів має підбір шихтових матеріалів. У роботі основу композиційних складових шихти для одержання пористих матеріалів складає природний мінерал-сапонітова глина та порошок алюмінію. В якості матеріалів було вибрано порошок алюмінію (АПВ-90 ТУ 48-5-152-78), порошок сапоніту та пороутворювач (карбонат кальцію). Розрахунок компонентів вихідної суміші (шихти) для синтезу систем (Al-сапоніт) проводився із врахуванням кількості і стехіометричних коефіцієнтів вихідних компонентів, чистоти і насипної густини вихідної шихти. Маси компонентів вихідної суміші, які необхідно взяти для приготування циліндричного зразка Ø4 см, h=22 см. системи (Al-сапоніт), наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Маса компонентів вихідної суміші, які необхідно взяти для приготування циліндричного зразка Ø4 см, h=22 см.[8]

Компонент	Кількість компонентів у вихідній суміші, %	Теоретична маса компонентів у вихідній суміші, г	Маса компонента з врахуванням чистоти реактиву, г
Al	5,64	20,39	20,392
Сапонітова глина ($Mg_3[(OH)_2 Al_{0,33} Si_{3,67} O_{10}] \cdot 4H_2O$)	94,35	341,07	341,62
Σ	99,99	361,46	362,012

Змішування порошків вихідних реагентів проводиться в кульовому млині. Змішування триває протягом восьми годин до утворення однорідної маси. Фільтрувальний елемент виготовлений за допомогою методу радіально-ізостатичного пресування та спечений за рахунок СВС — реакції. Синтез здійснювався в лабораторному реакторі, який був виготовлений в Луцькому національному технічному університеті (Рис.1).

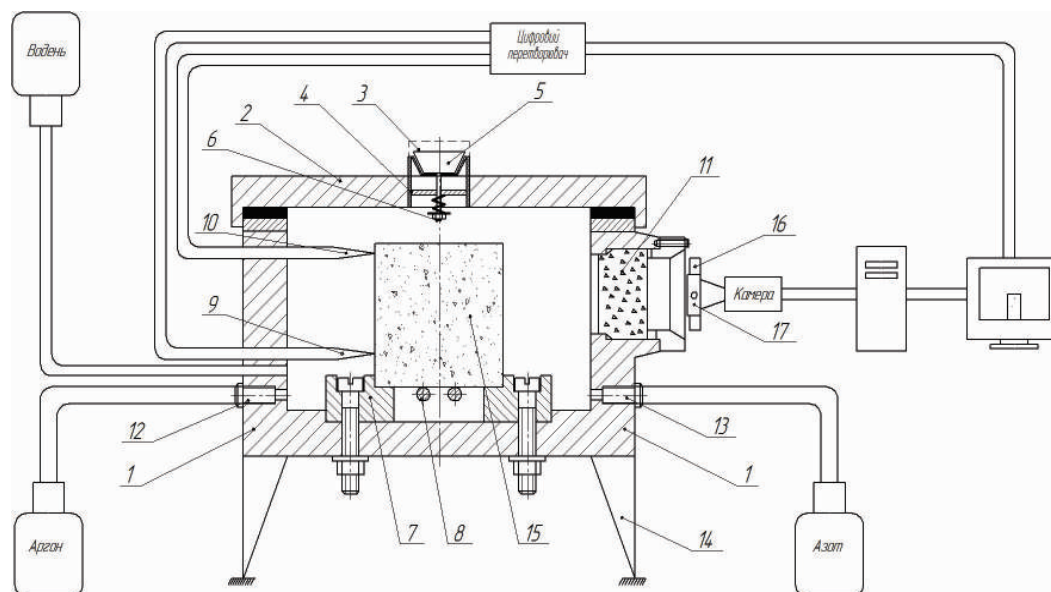


Рис.1 – Реактор для здійснення СВС-процесу

1 – корпус, 2 – роз’ємна кришка, 3 – , 4 – прокладка, 5 – запобіжний клапан, 6 – регульовальна гайка, 7 – підковоподібна підложка, 8 – ніхромовая спіраль, 9, 10 – термопари, 11 – вікно спостереження, 12, 13 – штуцер, 14 – стійка, 15 – зразок, 16 – світлофільтр, 17 – тримач.

Технічно реактор виконаний у вигляді термоізолюваної ємності, із роз’ємною кришкою 2, яка дозволяє ставити дослідні зразки на підковоподібну підложку 7 всередині реактора. В кришку вмонтований клапан 5, який складається з корпусу, пружини і регульовальної гайки 6. Клапан служить запобіжником у випадку вибухонебезпечної ситуації. Корпус реактора 1 виготовлений з нержавіючої сталі марки 95Х18 і розміщений на стійки 14. Досліджуваний зразок 15, який знаходиться на підковоподібній підложці, нагрівається за допомогою ніхромової спіралі 8 марки Х20Н80, з діаметром ніхрому 0,8 мм. діаметром стрижня 3 мм та довжиною спіралі 68 см, яка під’єднана до блоку живлення. Фронт горіння розповсюджується по зразку до протилежного боку від ніхромової спіралі. Температура нагрівання зразка контролюється за допомогою вольфрамренийових термопар 9, 10 марки ВР-5 та ВР-20, підключених до комп’ютера через аналого-цифровий перетворювач моделі В7-35. В термоізолювану ємність приєднано балон з воднем, який забезпечує захист поверхні зразка від процесу окислення. Через штуцери 12 і 13 приєднано балони із аргонем та азотом. З одної із бокових сторін розміщено вікно спостереження, в яке вмонтовано кварцове скло 11 товщиною 6 мм. Спостереження за процесом горіння здійснюється за допомогою відеокамери моделі Nikon D5100. Оскільки процес СВС-горіння супроводжується яскравим світінням, для отримання якісного зображення використовується світлофільтр 16 серії ND₄, діаметром 62 мм та товщиною 1 мм. Вибір світлофільтра регламентується моделлю об’єктива Nikon 1855 та його параметрами, зокрема діаметр 62 мм. Фільтр такого типу призначений для зменшення кількості світла, що потрапляє при зйомці на матрицю камери, а також для коригування кольору, яскравості та контрастності. Світлофільтр кріпиться до об’єктива камери різьбовим з’єднанням за допомогою спеціального тримача 17. Камера під’єднана до комп’ютера, за допомогою якого на основі комп’ютерних програм будуються різні графічні залежності: поширення хвилі горіння у дослідному зразку, зміна температури від часу.

Послідовність фотографій процесу взаємодії пресованої стехіометричної суміші із порошків алюмінію та сапоніту при тиску аргону від 0,5 до 4 МПа представлено на рис. 2. Початковою стадією є стадія нагрівання зразка за допомогою ніхромової спіралі при температурі $T = 200^{\circ}\text{C}$, на якій зразок різко спалахує (кадр №1). На наступній стадії яскраве світіння дещо гасне (кадр №2). На слідуючих кадрах зафіксовано горіння зразка, що супроводжується більш яскравим світінням (кадри № 3-8). Загальний час спікання пресованої стехіометричної суміші із порошків алюмінію і сапоніту становить 75,2с.

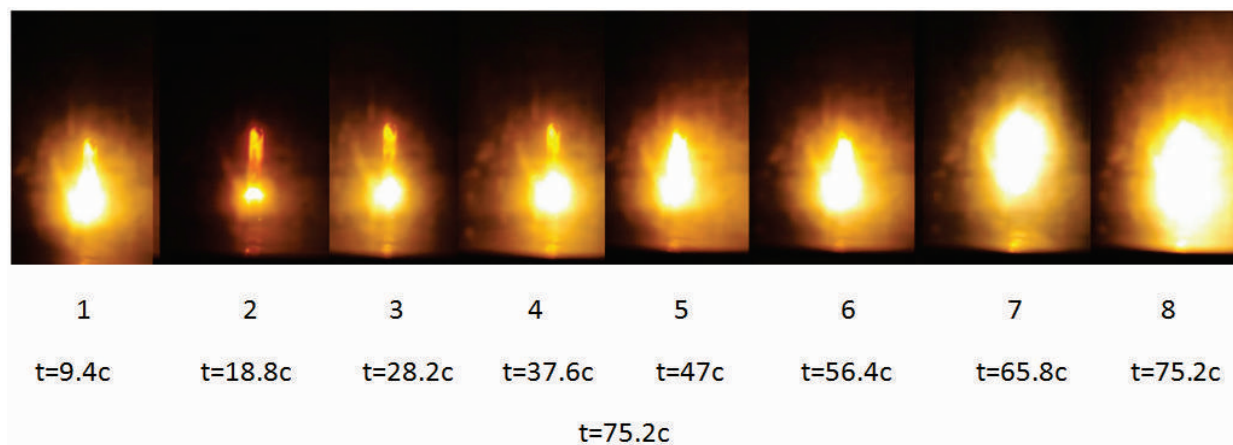


Рис.2 – Фотографія процесу горіння стехіометричної порошкової суміші алюмінію з сапонітом

Вимірювання швидкості поширення хвилі горіння проводились на основі відеозапису процесу синтезу. Металографічні дослідження проводились на мікроскопі ММР-4. Зразки для металографічних досліджень готувалися за стандартною методикою з метою отримання чіткого зображення границь зерен протравлювали 4% сірчаною кислотою. За допомогою програми РНОТОМ визначена площинна пористість, для системи Al-сапоніт вона рівна 30%. Це дає можливість стверджувати про те, що виготовлений фільтрувальний елемент може використовуватись для регенерації мастил. На ПАТ „СКФ – Україна“ проводились дослідно-промислові випробування із регенерації технічного масла. В якості експериментальних рідин були обрані водяна МОР (ЛЗ-СОЖ-1МІО), масляна МОР (МР-8). На підприємстві є укомплектована установка для регенерації технічних рідин та мастил. Метою дослідження була заміна фільтрувального елемента на основі металеві сітки на фільтрувальний елемент виготовлений з відходів виробництва. Експериментально доведено, що робочий тиск $P=0,6$ МПа, тонкість очищення 20 мкм, розхід 250 л/хв, розміри дослідного фільтра становили: висота – 220 мм, діаметр – 40 мм, товщина стінки – 3 мм. Фільтри з порошкових матеріалів спечені методом СВС в порівнянні з іншими пористими виробами володіють рядом переваг: високою мірою очищення, високою жаростійкістю, міцністю.

Регенерацію фільтрів проводили зворотним промиванням чистою рідиною до постійного значення перепаду тиску. Потім повторювали процес фільтрування. Результати експериментів, що відображають залежність коефіцієнта відновлення фільтра від числа циклів регенерації представлені на рис.3.

З рис.3. видно, що відновлюваність фільтрів при очищенні масляних МОР нижче, ніж у водних. Це пояснюється наявністю смолих речовин в цих середовищах. Для їх видалення використовували інший метод регенерації. В якості робочої рідини використовували водну МОР, в яку були внесені частки металів з розмірами від 10 до 30 мкм. Експериментально встановлено, що для забезпечення повноти фільтрування (99,8%) робочу МОР необхідно фільтрувати через пористий матеріал з діаметром пор 30 мкм.

Коефіцієнт відновлення

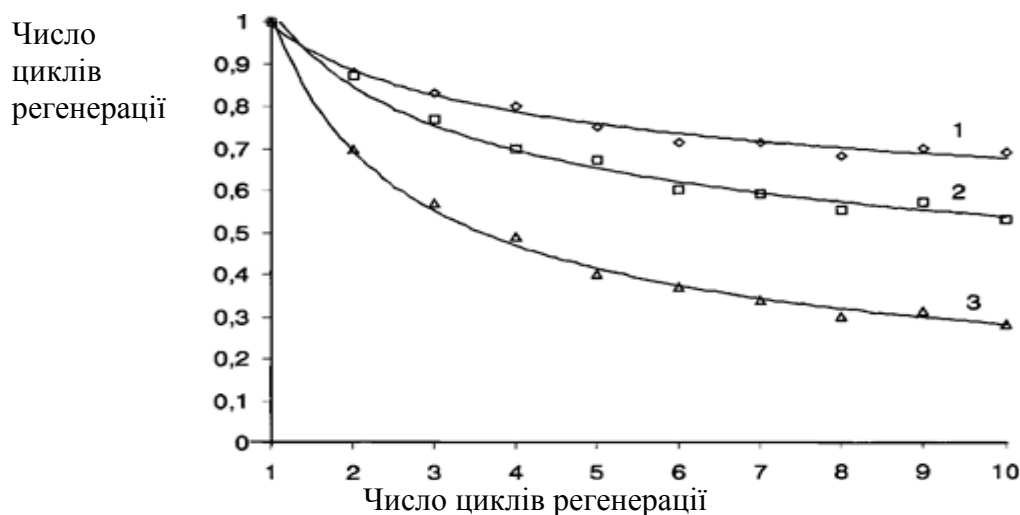


Рис.3. Залежність коефіцієнта відновлення фільтрувальних властивостей від числа циклів регенерації (1 - робоча рідина - водяна МОР; 2 - масляна МОР (МР-8); 3 - масляна МОР МР-10).

Висновок. Виробничі випробування довели, що запропонований пористий фільтрувальний матеріал на основі природних мінералів можна використовувати для регенерації технічної рідини та технічних мастил. Створення фільтрів із відносно дешевої та доступної сировини із забезпеченням всього комплексу властивостей та характеристик, необхідних для тривалої і якісної їх роботи, робить їх конкурентоспроможними в умовах ринкової економіки.

Література

1. Huppmann W.J. *The Technical and Economic Development of Powder Forging [Текст]* // *Powder Metallurgy International -1992. -Vol.24, №3. - P. 186-193.*
2. Spivak, V. Astrelin I., Tolstopalova N., Atamaniuk I. *Ecological sorbent which is mainly consist of saponite mineral from Ukrainian clay-field [Текст]* // *Chemistry & Chemical Technology. – 2012. – Vol. 6. – No.4. – P. 451-457.*
3. Ganzjuk, A.Ya., Kulakov, O.I. *Research of sorbcionikh processes is on a natural and acid activated saponite [Текст]* // *Visnyk of Khmelnytsky national university. –2009. - № 2. – P. 85 – 90.*
4. Paraska O. A., Karvan S. A., Stopchak V. O. *Vykorystannia pryrodnykh sorbentiv dlia ochishchennia organichnykh rozchnykiv. [Текст]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2011. – No 5. – pp. 87 – 91.*
5. Рудь В.Д., Гулієва Н.М. *Використання порошкових композиційних матеріалів на основі природних мінералів для водопідготовки питної води. [Текст]* // *Вода в харчовій промисловості. – Збірник тез доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів та студентів. – Одеса, 2013 – С. 53-54.*
6. Рудь В.Д., Самчук Л.М., Гулієва Н.М. *Использование СВС-процесса для получения композиционных материалов. [Текст]* // *Порошковая металлургия: Инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. – Сборник докладов 8-го Международного симпозиума. – Минск, 2013 – С. 496-500.*
7. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Юхвид В.И., Боровинская И.П. *Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Бином, 1999. – 176 с.*
8. Геллер Ю.А., Рахитад А.Г. *Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы [Текст] / Учебник.- М.: Металлургия., 1989. – 456 с.*

© В.Д. Рудь, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна

УДК 621.467

*В.Д. Рудь, д.т.н., проф.
Л.М. Самчук, к.т.н., ст. преподаватель
Ю.С. Повстяная, ассистент
Луцкий национальный технический университет*

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ
ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ**

На основании экспериментальных исследований показана возможность изготовления пористого проницательного фильтрующего материала на основе алюминия и сапонитовой глины для регенерации технических жидкостей и масел. Проведены промышленные испытания, которые показали, что предложенный фильтрующий материал можно использовать для регенерации технических жидкостей и масел.

Ключевые слова: *фильтрация, СВС - процесс, техническое масло, СВС – реакция.*

UDC 621.467

*V. Rud', Doctor of Technical Sciences
L. Samchuk, Candidate of Technical Sciences
I. Povstiana, Assistant*

**PROMISING OPPORTUNITIES FOR INSIGHTFUL NEW POROUS
MATERIAL USING NATURAL MINERALS**

On the basis of experimental studies demonstrated the possibility of making a porous filter material discerning based on aluminum and saponite clay for the regeneration of industrial liquids and oils. Industrial tests, which show that the proposed filter material can be used for regeneration fluids and oils.

Keywords: *filtration, SVS - process, oils, SVS - reaction.*

С.В. Попов, к.т.н., доцент

А.В. Васильєв, к.т.н., доцент

І.В. Хоменко, к.т.н., доцент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗКОЧУВАННЯ ОТВОРІВ В АЛЮМІНІЄВИХ КОРПУСНИХ ВИРОБАХ

У статті представлені результати експериментальних досліджень процесу розкочування. Встановлено ступінь впливу режимних параметрів (подача, швидкість обробки, початкова шорсткість поверхні, сила деформування) на кінцеву шорсткість поверхні, а також тиску деформування та похибки форми на зміну діаметрального розміру отворів

Ключові слова: *поверхнєве пластичне деформування, деформуючий елемент, осередок деформації, розкочувач, шорсткість поверхні*

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку технології обробки деталей машин характеризується зростаючими вимогами, що висуваються до якості одержуваних поверхонь на фінішних операціях. Одним з найбільш прогресивних, економічних, продуктивних і доступних в реалізації методів обробки на фінішних операціях є поверхнєве пластичне деформування (ППД) шляхом розкочування. Воно забезпечує необхідний набір основних показників якості: задану ступінь і глибину зміцнення, низькі параметри шорсткості, стискаючі залишкові напруження і задану мікроструктуру, залишаючись при цьому недостатньо вивченим процесом в окремих випадках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Починаючи з 70-их років минулого сторіччя починає розвиватись теорія і технологія ППД на основі фундаментальних наук, що описують поведінку металу при пластичному деформуванні. Деякі загальні уявлення про течію матеріалу деформованого шару при ППД викладено у роботах [1, 2, 3] на основі аналізу профілограм та геометрії осередку деформації (ОД). У більш пізніх роботах [4, 5, 6, 7] питання деформування розглянуто більш детально із аналізом деформаційних процесів, що відбуваються у вершині „хвилі” матеріалу, що йде перед деформуючим елементом (ДЕ). В одній із останніх робіт [8] проведено додатковий аналіз діаграми „справжнє напруження – залишкова деформація”, що дозволив виявити критичну точку (точку перегину), що визначає початок деструкції (мікропошкоджень) при пластичному деформуванні набагато раніше до факту руйнування матеріалу.

Виділення нерозв’язаних раніше частин загальної проблеми Останнім часом в основу методів дослідження покладено припущення про дискретну будову металу. Вони дозволили виявити, що основні зміни у металі під час ППД пов’язані зі ступенем спотворення структури кристалічної ґратки, величиною раз орієнтації блоків, зі зміною щільності дислокацій, із напруженнями кристалічної структури. У [9] стверджується, що ці дослідження, хоча і дають розуміння фізичних явищ, що відбуваються в металі, однак під час розробки технології обробки конкретних деталей з конкретних матеріалів необхідно в основному спиратись на експериментальні дані. Все вищезазначене пояснюється тим, що на даний момент не розроблено методів розрахунку фізичних параметрів стану металу в ОД залежно від технологічних режимів, з одного боку, і складністю їх реалізації і контролю у виробничих умовах, з іншого.

Постановка завдання. Основним завданням експериментальних досліджень було наступне: 1) встановити закономірності впливу робочої подачі, швидкості обробки, початкової шорсткості поверхні, сили деформування на кінцеву шорсткість поверхні; 2)

визначити вплив тиску деформування на зміну діаметрального розміру отвору, а також похибку форми у поперечному перетині.

У якості зразків для експериментальних досліджень використані корпуси пристроїв гальмівних (рис. 1), що випускаються промисловістю регіону серійно. Корпуса виготовлені із алюмінієвого сплаву АК12М2 ГОСТ 1583-93.

Параметрами для контролю під час проведення дослідів слугуватимуть кінцева шорсткість поверхні, діаметр оброблюваного отвору, похибка форми отвору. Для усунення імовірності появи випадкової помилки проводилось декілька паралельних дослідів.

Основний матеріал і результати. Під час проведення дослідів здійснювалась обробка партії деталей на вертикально-свердлильному верстаті моделі 2Н125Л. Схема обробки представлена на рис. 2.



Рис. 1. Пристрій гальмівний

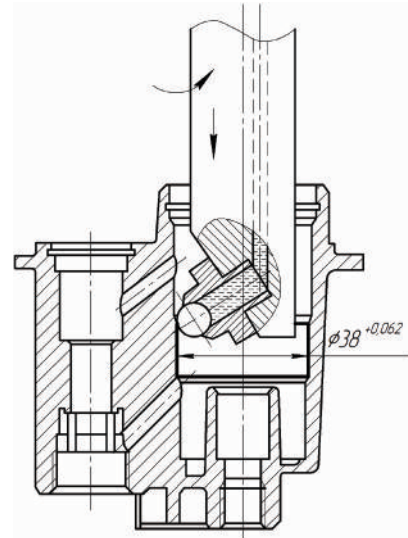


Рис. 2. Схема обробки

Використовувалась технологічна оснастка: інструмент – розкочувач; пристосування затискне код 7304-4064.

Технологічні режими розкочування: робоча подача $S = 0,05 \dots 0,8$ мм/об; швидкість обробки $V = 30 \dots 260$ м/хв.; тиск деформуючого елемента (ДЕ) на оброблювану поверхню $P = 200 \dots 1000$ МПа; початкова шорсткість поверхні $Ra_{\text{поч.}} = 2,5 \dots 4,5$ мкм. Характеристика ДЕ – ролик зі сталі ШХ 15, HRCe 60...65, діаметр $D = 6$ мм.

Тиск МОР на ДЕ забезпечувався та регулювався гідростанцією, вимірювався манометром ДМ 100-ВУ-6 МПа-1,5-У2 ТУ 4212-106-00227471. У якості МОР застосовувалось мастило індустріальне І-20.

Тиск ролика на поверхню деталі визначався залежно від сили P_y , що діє від ДЕ і площі контакту S_k деталі та ДЕ

$$P = P_y / S_k. \quad (1)$$

Площа контакту визначалась за формулою [10]

$$F = \frac{8}{3} R \sqrt{R_o / (R_o - R)} \left(\sqrt{(h - \omega)\omega} + \omega + \frac{1}{4} \sqrt{\omega h} \right), \quad (2.2)$$

де R – радіус ДЕ;

R_0 – радіус деталі;

h, ω – залишкова та пружна деформації.

Вимірювання діаметра отвору і похибки форми отвори здійснювалось відповідно до ГОСТ 28187-89 за трьома поперечними чотирма поздовжнім перетинам оброблюваного отвору. Діаметр отвору вимірювався цифровим нутроміром НИ 18-50/80 ПТ ГОСТ 868-82 із похибкою вимірювання 1 мкм. Похибка форми визначалась із використанням стенду на базі оброблюваного верстата із застосуванням індикатору МИГ 1 ГОСТ 9696-75 із похибкою вимірювання 1 мкм. Вимірювання шорсткості здійснювалось із використанням профілографу-профілометра моделі 250.

Процес згладжування початкових мікронерівностей при поверхнево-пластичному деформуванні звичайно пов'язують із безпосереднім змінанням виступів, що представляються у вигляді клину трикутної форми. На перший погляд така модель є майже придатною. Хоча висота мікронерівностей набагато менше товщини шару, що залучається у деформацію, тобто мікро нерівності становлять порівняно незначну частину шару, що деформується. Тому його можна представити у вигляді смуги товщиною h , що несе на своїй поверхні початкові мікро нерівності. У процесі переміщення області деформації по довжині деталі смуга отримує прогин у зоні осьової або колової хвилі за рахунок витріщання і змінання матеріалу поверхневого шару. В цих умовах смуга зазнає складної деформації розтягу, стиску, згину, зсуву. При цьому усі ці види деформації протікають одночасно як у осьовому, так і в коловому напрямках.

Зі збільшенням зусилля розкочування механіка деформування початкових і формування нових мікронерівностей дещо видозмінюється. У області низьких значень P досягається лише часткове змінання мікронерівностей. Тому на профілографах помітні неповністю zdeформовані мікронерівності на оброблюваній поверхні (рис. 3). При зростанні зусилля деформування мікронерівності повністю змінюються, але після виходу із контакту нові нерівності частково піднімаються над рівнем знов утвореної поверхні.

На рис. 4 наведено графік залежності кінцевої шорсткості обробленої поверхні від величини подачі S . При її підвищенні спостерігається підвищення шорсткості на усіх швидкостях обробки V .

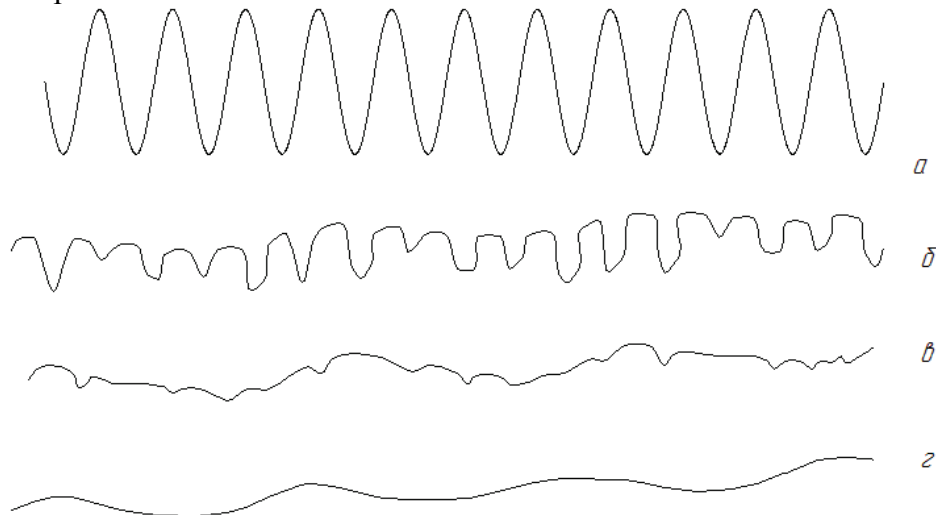


Рис. 3. Зміна профілографи поверхні деталі при розкочуванні із різними зусиллями:

а – точіння; б, в, г – розкочування ($P=400; 800; 1000$ МПа відповідно)

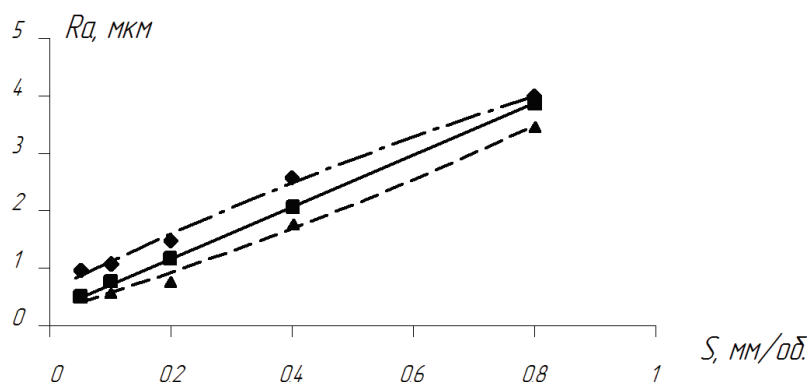


Рис. 4. Залежність впливу подачі на шорсткість поверхні:

- — — — — $V = 30$ м/хв., $P = 200$ МПа, $Ra_{\text{поч.}} = 2,5$ мкм;
- . - . - . $V = 140$ м/хв., $P = 200$ МПа, $Ra_{\text{поч.}} = 2,5$ мкм;
- $V = 260$ м/хв., $P = 200$ МПа, $Ra_{\text{поч.}} = 2,5$ мкм

При збільшенні подачі збільшується відстань між вершинами виступів оброблюваних нерівностей за рахунок зменшення кратності прикладання тиску на одиницю площі ОД, що призводить до зниження рівня пластичної деформації у ОД через зменшення впливу ДЕ на виступи нерівностей. Вплив подачі на шорсткість обробленої поверхні пов'язаний із тим, що під час ППД відбувається пластична течія металу не лише у напрямку подачі (пряма пластична течія), але й у зворотному напрямі (зворотна пластична течія). Наслідком зворотної пластичної течії є підйом металу у позаконтактній зоні після ДЕ і утворення у зв'язку із цим нових нерівностей Ra. Із підвищенням подачі збільшується значення кінцевої шорсткості Ra і утворюється гвинтовий слід на оброблюваній поверхні від ДЕ. Обидва ці фактори призводять до збільшення шорсткості.

На рис. 5 представлено графік залежності впливу швидкості обробки V на кінцеву шорсткість Ra, з якого очевидно, що збільшення швидкості неоднозначно впливає на шорсткість. Таку залежність шорсткості від швидкості обробки можливо пояснити різною швидкістю проходження пружно-пластичної деформації металу у ОД при дії на нього конкуруючих факторів: швидкість обробки і температура.

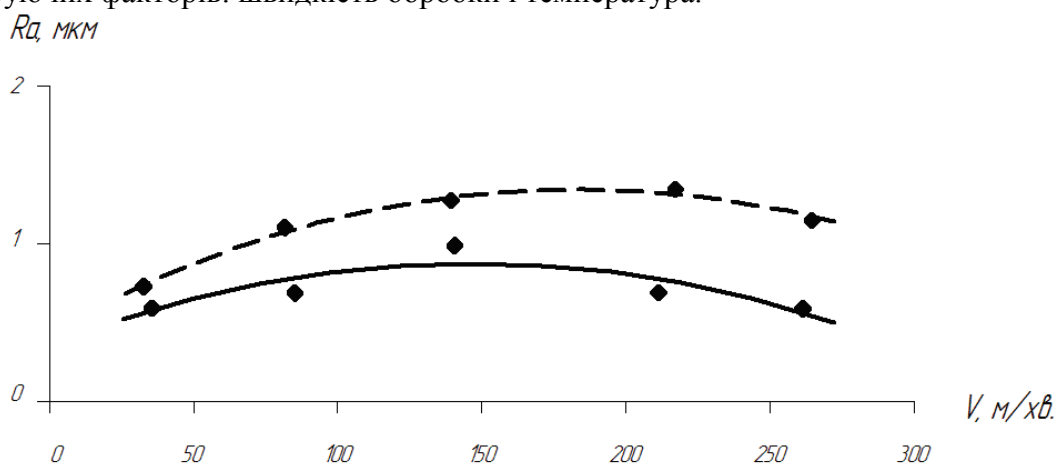


Рис. 5. Вплив швидкості обробки на шорсткість поверхні:

- $S = 0,05$ мм/об., $P = 200$ МПа, $Ra_{\text{поч.}} = 2,5$ мкм;
- — — — — $S = 0,1$ мм/об., $P = 200$ МПа, $Ra_{\text{поч.}} = 2,5$ мкм

Залежно від співвідношення пружної та пластичної деформації, що відбувається в металі при ППД, визначається рівень показників шорсткості у поверхневому шарі деталі,

що оброблюється. При швидкості обробки до 150 м/хв. переважає вплив швидкісного фактору над температурним, тому рівень пластичної деформації зменшується. Це призводить до збільшення шорсткості R_a . При швидкостях обробки вище 150 м/хв. переважає вплив температурного фактору. Рівень пластичної деформації збільшується, що полягає у зменшенні шорсткості R_a .

На рис. 6 наведена залежність шорсткості обробленої поверхні R_a від тиску деформування P при різних величинах подачі ДЕ. Із рисунка слідує, що при збільшенні тиску до 200 МПа спостерігається різке зниження R_a , яке можливо пояснити тим, що в цих умовах має місце в основному геометричний характер зменшення нерівностей за рахунок їх осадку і виникнення ОД 1-го виду.

При подальшому збільшенні тиску деформування підлягають не лише виступи нерівностей, але й частина основного металу. При цьому виникають ОД 2-го і 3-го видів. Мінімальна шорсткість має місце при тискові біля 800 МПа.

При підвищенні тиску понад 800 МПа шорсткість поверхні починає зростати. Характер деформації при цьому відповідає ОД 4-го виду, коли спочатку відбувається збільшення зворотного пластичного плину у позаконтактній зоні ОД після ДЕ, що і призводить до збільшення висоти виступів нерівностей (шорсткості), а при подальшому збільшенні тиску відбувається перенаклеп матеріалу, що характеризується луценням поверхневого шару.

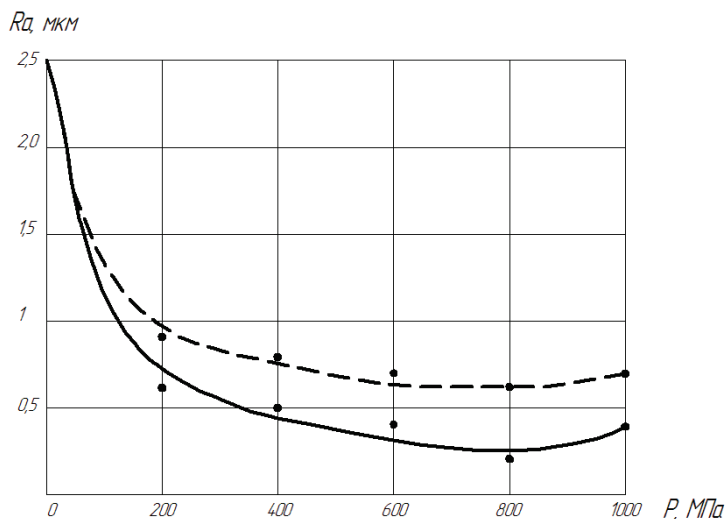


Рис. 6. Вплив тиску деформування на шорсткість поверхні:

— — — — — $S = 0,2$ мм/об., $V = 30$ м/хв., $R_{a\text{поч.}} = 2,5$ мкм;

————— $S = 0,05$ мм/об., $V = 30$ м/хв., $R_{a\text{поч.}} = 2,5$ мкм

Перевищення значень R_a при подачі 0,2 мм/об. над R_a при подачі 0,05 мм/об. відповідає залежності, наведеній на рисунку 2.4 і пояснюється зменшенням числа контактів ДЕ із точками оброблюваної поверхні ОД.

Графік залежності впливу початкової шорсткості $R_{a\text{поч.}}$ на кінцеву шорсткість R_a обробленої поверхні наведено на рис. 7, із якого виходить, що кінцева шорсткість збільшується прямопропорційно збільшенню початкової шорсткості при постійному тиску деформування.

Підвищення R_a при збільшенні $R_{a\text{поч.}}$ при постійному тиску деформування говорить про те, що часу впливу цього тиску недостатньо для повного проходження пластичної деформації в матеріалі. Це підтверджується тим, що при зниженні швидкості обробки із 140 м/хв. до 35 м/хв., тобто при збільшенні часу впливу сили, рівень кінцевої шорсткості R_a на 20...30% менше при однакових значеннях подачі ДЕ.

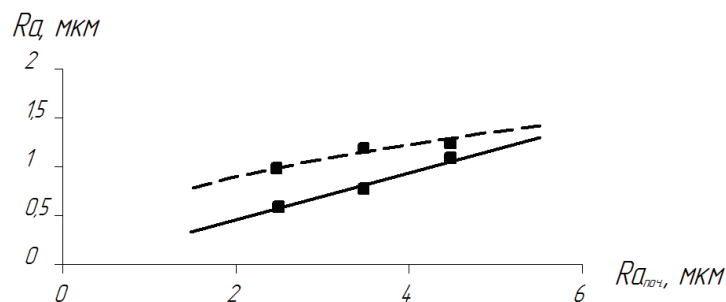


Рис. 7. Залежність впливу початкової шорсткості поверхні на кінцеву шорсткість:

--- $S = 0,05$ мм/об., $V = 30$ м/хв., $P = 200$ МПа;

— $S = 0,05$ мм/об., $V = 140$ м/хв., $P = 200$ МПа

Чим менше параметр шорсткості поверхні, підготовленої для розкочування, тим менше кінцеву шорсткість можливо забезпечити. Але при цьому позначається собівартість операції, що забезпечує меншу шорсткість: чим нижче шорсткість, тим вища собівартість підготовчої операції. Дана обставина враховувалась під час проведення дослідів, тому початкова шорсткість поверхні становила $Ra\ 2,5 \dots 4,5$ мкм (розточування).

На рис. 8 представлено графік залежності похибки форми отвору у поперечному перетині від тиску деформування при різних товщинах стінки оброблюваної деталі. Відповідно до креслення деталі (графічна частина роботи) товщина стінки деталі дорівнює 3,3...4,8 мм. Різниця у товщині стінки становить $\Delta = 1,5$ мм. Бачимо, що допустимий рівень тиску деформування необхідно призначати виходячи із допустимої величини похибки форми отвору у найбільш послаблених місцях оброблюваної деталі, тобто для ділянок із меншими товщинами стінок.

Наприклад для отвору $\varnothing 38^{+0,062}$ корпусу пристрою гальмівного допустима величина форми у поперечному перетині дорівнює 0,02 мм, тому тиск деформування не повинен перевищувати 400 МПа.

На рис. 9 наведено графік залежності діаметра обробленого отвору від тиску деформування. Збільшення розміру отвору при збільшенні тиску деформування пояснюється зменшенням висоти нерівностей виступів шорсткості за рахунок їх втискання у западини при пластичному деформуванні.

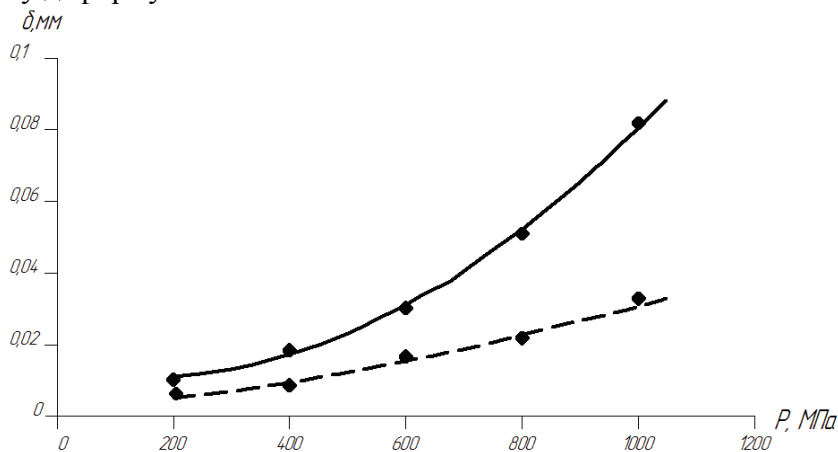


Рис. 8. Вплив тиску деформування на похибку форми отвору у поперечному перерізі:

— $\Delta = 1,5$ мм; --- $\Delta = 1$ мм

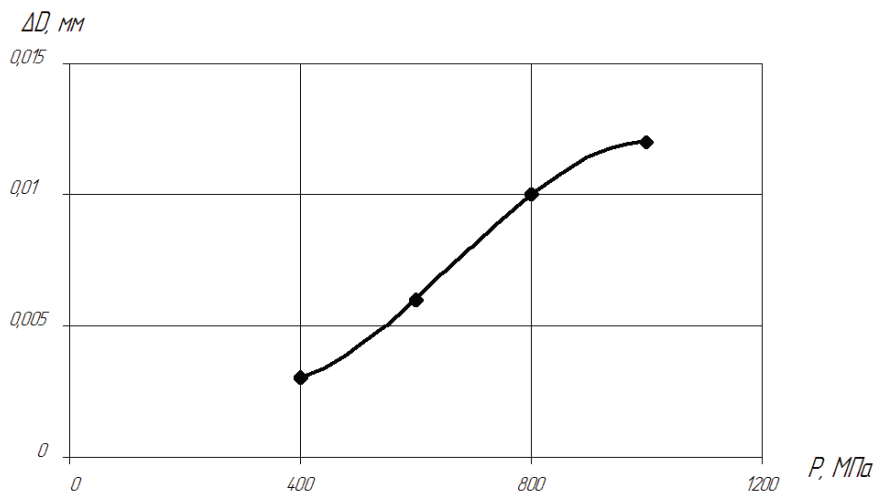


Рис. 9. Вплив тиску деформування на зміну діаметра отвору

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень процесу механічної обробки розкочуванням отвору $\varnothing 38^{+0,062}$ у корпусній деталі, що виготовлена із алюмінієвого сплаву марки АК12М2 ГОСТ 1583-93 встановлено наступне. Шорсткість обробленої поверхні підвищується зі збільшенням величини подачі. Це відбувається за рахунок зменшення кратності прикладання тиску на одиницю площі ОД, що призводить до зменшення рівня пластичної деформації. Збільшення швидкості обробки неоднозначно впливає на шорсткість обробленої поверхні. Це пояснюється різною швидкістю проходження пружно-пластичної деформації металу у ОД при дії на нього конкуруючих факторів: швидкості обробки і температури. До 150 м/хв. переважає вплив швидкісного фактору над температурним (шорсткість підвищується), а потім – навпаки (рівень пластичної деформації збільшується і шорсткість зменшується). При збільшенні тиску деформування до 200 МПа спостерігається різке зниження шорсткості, що пояснюється геометричним характером зменшення нерівностей за рахунок їх осадження, потім деформування зазнає і основний метал. Мінімальна шорсткість досягається при тискові 800 МПа, потім вона починає збільшуватись внаслідок пере наклепу і лущення матеріалу. Кінцева шорсткість збільшується прямопропорційно збільшенню початкової шорсткості при постійному тискові деформування. Допустимий рівень тиску деформування необхідно призначати виходячи із допустимої величини похибки форми отвору. У нашому випадку він становить 400 МПа.

Література

1. Торбило В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с.
2. Смелянский В.М. Повышение надежности и долговечности хромированных деталей гидроагрегатов обработкой ППД / В.М. Смелянский, В.В. Дубенко // Алмазы и сверхтвердые материалы. – М.: НИИМАШ, 1976. – №9. – С.25-30.
3. Смелянский В.М. Исследование очага деформации при ППД / В.М. Смелянский // Новые процессы изготовления деталей и сборки автомобилей. – 1978. – № 1. – С.18-23.
4. Каледин Б.Л. Повышение долговечности деталей поверхностным пластическим деформированием / Б.Л. Каледин. – Минск: Наука и техника, 1974. – 232 с.
5. Смелянский В.М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин при обработке ППД / В.М. Смелянский // Вестник машиностроения. – 1982. – №11. – С. 14-21.
6. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
7. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 536 с.
8. Рыбакова Л.М. Механические закономерности разрушения металла при объемном и поверхностном пластическом деформировании / Л.М. Рыбакова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М., 1985. – №5. – С. 32-38.

9. Яцерицын П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных сталей / П.И. Яцерицын. – Минск, 1971. – 142 с.

10. Кардашов А.В. Влияние ППД на выносливость некоторых алюминиевых сплавов в коррозионной среде / А.В. Кардашов // Прогрессивные процессы упрочнения ППД. – М., 1974. – С. 12-18.

© С.В. Попов, А.В. Васильев, I.В. Хоменко

УДК 621.7.10

С.В. Попов, к.т.н., доцент

А.В. Васильев, к.т.н., доцент

И.В. Хоменко, к.т.н., доцент

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТЫВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В АЛЮМИНИЕВЫХ КОРПУСНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований процесса раскатывания. Выявлена степень влияния режимных параметров (подача, скорость обработки, начальная шероховатость поверхности, сила деформирования) на конечную шероховатость поверхности, а также давления деформации и погрешности формы на изменения диаметрального размера отверстий

Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, деформирующий элемент, очаг деформации, раскатка, шероховатость поверхности*

UDC 621.7.10

S.V. Popov, Ph.D.

A.V. Vasilyev, Ph.D.

I.V. Khomenko, Ph.D.

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

RESEARCH OF ALUMINIUM BASIC PARTS FINISHED BY HOLE ROLLING PROCESS

The article presents the results of experimental studies of the process rolling. Detected degree of influence of mode parameters (flow, processing speed, an initial surface roughness, deformation force) of the final surface roughness, pressure deformation and form errors on diametrical holes size changes

Keywords: *surface plastic deformation, deforming element, deformation focus, rolling tool, surface roughness*

А.В. Васильєв, к.т.н., доцент

С.В. Попов, к.т.н., доцент

І.В. Тимошенко, магістрант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛИБОКОГО СВЕРДЛІННЯ СТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК

У статті представлені результати теоретичних й експериментальних досліджень процесу глибокого свердління спіральними свердлами. Отримана математична модель залежності осьового зусилля від глибини різання, діаметру свердла, подачі і швидкості різання.

Ключові слова: *глибоке свердління, механізм подач, стійкість, жорсткість, ефективність, математичне моделювання.*

Постановка проблеми. У даний час спостерігається тенденція, коли багато операцій, які здійснюються на розточувальних верстатах, переводять на більш дешеві і простіші вертикально-свердлильні верстати. Свердління глибоких отворів є трудомісткою технологічною операцією, особливо при обробці в'язких матеріалів. В системі верстат – пристосування – інструмент – деталь (ВПД) при глибокому свердлінні в найбільш важких умовах працює інструмент (спіральне свердло). Замкнений об'єм обробки, різноманітні функції, виконання яких повинна забезпечувати конструкція інструменту та форсовані режими різання змушують працювати корпус свердла, його ріжучі і напрямні елементи із значними напруженнями. Ці обставини роблять незаперечними переваги переведення механічної обробки отворів на вертикально-свердлильні верстати в умовах машинобудівного виробництва при обробці складнопрофільних поверхонь.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія глибокого свердління спіральними свердлами докорінно відрізняється від свердління кільцевими та гарматними свердлами. Основними відмінностями є кінематичні й динамічні особливості токарних, свердлильних верстатів і модулів, можливість керування вихідними параметрами процесу за рахунок використання в складі технологічної системи опорних елементів з різними характеристиками і т.д. Використання відомих теорій свердління гарматними свердлами, щодо процесу глибокого свердління спіральними свердлами, практично не можливе [1-6].

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми Широке розповсюдження глибокого свердління стримується відсутністю визначення раціональних галузей його використання, практичних рекомендацій і методик для одержання заданої точності і якості оброблених поверхонь при найменших витратах. Розробка теорії й методів підвищення ефективності процесу глибокого свердління спіральними свердлами з урахуванням одержання необхідної якості виробу являє собою актуальну проблему, що має велике значення для економіки України.

Постановка завдання. У зв'язку з вищевикладеним, метою роботи є підвищення економічної ефективності свердління глибоких отворів за рахунок збільшення продуктивності процесу різання, підвищення стійкості інструменту, надійності процесу свердління, зменшення енерговитрат та кількості використовуваного інструменту. При вирішенні поставленого завдання необхідно провести теоретичні й експериментальні дослідження, оцінити точність і достовірність одержуваних результатів. Об'єктом дослідження є обладнання для виконання глибокого свердління. Предметом дослідження є фізика явищ, які виникають при взаємодії свердла з заготовкою, а також вплив параметрів і режимів роботи обладнання на показник шорсткості оброблюваної поверхні.

Основний матеріал і результати. Для практичної реалізації глибокого свердління спіральним свердлом нам необхідно здійснити технологічне забезпечення, а саме: отримати залежності і дані для розрахунків і вибору типу пристрою для вимірювання осьового зусилля у випадку, коли

$$P_{o\max} \leq [P_{m.n.}], \quad (1)$$

де $P_{o\max}$ – максимальне осьове зусилля при свердлінні, Н;

$[P_{m.n.}]$ – допустиме, регламентоване паспортом верстата зусилля механізму подач, Н.

А також конструктивних параметрів пружного елемента пристрою, наприклад, пружини, із забезпеченням умови

$$P_{np} \geq P_o, \quad (2)$$

P_{np} – зусилля, що створюється пружиною при її деформації (стиску) в процесі різання, Н;

P_o – осьове зусилля при свердлінні, Н.

Аналіз значень осьових зусиль P_o , кН, визначених за різними діючими нормативами та довідниками [1-4] при постійних значеннях глибини різання t , діаметру свердла $D = 30$ мм, подачі $S = 0,06$ мм/об., швидкості різання $V = 16$ м/с наведені на рис. 1.

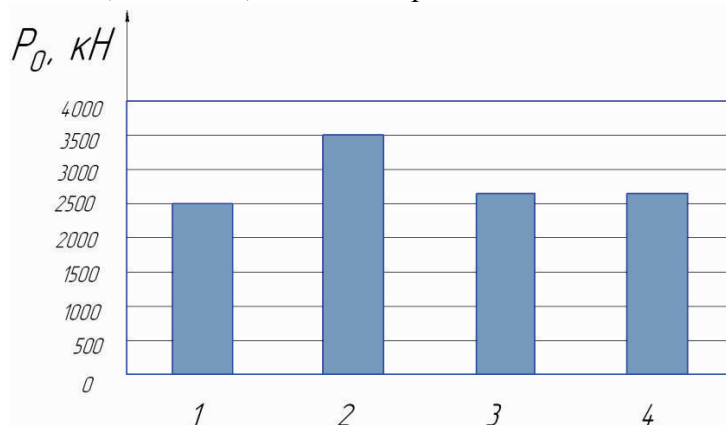


Рис. 1. Гістограма значень осьового зусилля P_o (кН) при свердлінні отвору в матеріалі сталь 40 при $d = \text{const}$, $S = \text{const}$, $V = \text{const}$ відповідно до літературних джерел [1-4]

Аналіз наведених даних свідчить про суттєву різницю визначення осьового зусилля при глибокому свердлінні спіральними свердлами, для нашого випадку в межах від 250 до 340 кН, і, відповідно, різні режими різання при свердлінні. З метою отримання достовірних значень P_o при свердлінні глибоких отворів нами запропонована методика, яка базується на використанні елементів теорії ймовірностей.

Дослідження процесу глибокого свердління зразків з сталі 40 планується проводити на вертикально-свердлильному верстаті моделі 2Н135. Схема установки показана на рис. 2.

Свердлильний верстат складається зі шпинделя, в який кріпиться свердло (рис. 2). Заготовка 1, що свердлиється, закріплюється на столі верстата.

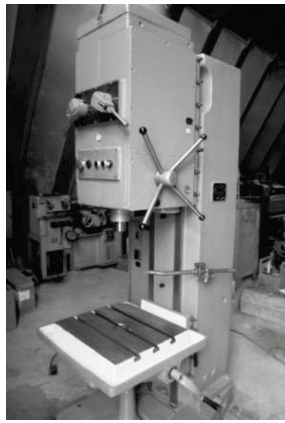
Як цільову функція оцінки можливостей елементів технологічної системи доцільно прийняти продуктивність процесу глибокого свердління Q [2]

$$Q = \frac{V \cdot S \cdot d \cdot T}{2(T + t_{зм})}, \quad (3)$$

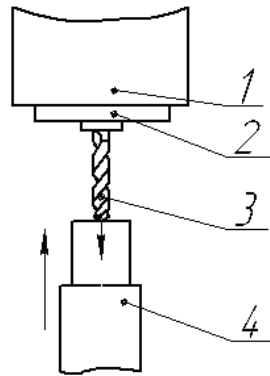
де V , S , d – величини швидкості, подачі і діаметру свердління, м/хв., мм/об., мм відповідно;

T – період стійкості свердла, хв.;

$t_{зм}$ – час заміни інструменту, хв.



а)



б)

Рис. 2. Дослідна установка: а – вигляд загальний; б – конструктивна схема: 1 – верстат; 2 – шпиндель; 3 – свердло; 4 – заготовка

Для досягнення найвищої продуктивності процесу свердління необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі S . У той же час максимальна допустима подача свердління обмежується міцністю і стійкістю свердла. Контролюється вимірюванням осьового зусилля.

Подача, обмежена міцністю робочої частини свердла. Може бути визначена

$$S = \sqrt[3]{\frac{0,02d^{(3-x_m)} \cdot \sigma_g}{1,73 \cdot C_m \cdot HB}} \quad (4)$$

де d – діаметр інструменту, мм;

σ_g – допустиме напруження для матеріалу інструменту, МПа;

C_m , ум, хм – постійні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей матеріалу, що оброблюють, а також матеріалу ріжучої частини свердла;

HB - твердість матеріалу, що оброблюють.

Із збільшенням глибини свердління спіральним свердлом подача S , крім того, також обмежується поздовжньою стійкістю стебла інструменту. Оскільки осьова сила різання при свердлінні P не повинна перевищувати критичну силу $P_{кр}$, Н, що визначається

$$P_{кр} = \frac{E \cdot \pi^3 \cdot I}{(\mu \cdot l)^2} \quad (5)$$

де E – модуль пружності, Па;

I – момент інерції поперечного перетину інструменту, кг·м²;

μ – коефіцієнт приведеної довжини;

l – довжина стебла свердла, мм.

Для збереження поздовжньої стійкості стебла інструменту у міру збільшення глибини обробки необхідно зменшувати осьову складову сили різання шляхом зниження подачі. Проте, зменшення подачі призводить до збільшення питомої сили різання, що, у свою чергу, якісно впливає на процес різання. Обробка глибоких отворів на малих подачах є малопродуктивною, а на граничних подачах – веде до зниження якості обробки отворів.

Навність наведених обмежень по міцності, стійкості інструменту і мінімальному значенню допустимої подачі свердління визначає область можливого вибору допустимих параметрів технологічної системи. Існуюча теорія і практика глибокого свердління дає деякі рекомендації економічної доцільності тих або інших способів глибокого свердління, які показані на рис. 3. Зрозуміло, що ці рекомендації певною мірою є умовними, а їх межі

розпливчасті і у кожному конкретному випадку обробки глибоких отворів можуть бути переглянутими [3].

Теоретичні дослідження при обробці сталі 40 дозволяють використати наведені дані для вибору рекомендованих параметрів інструменту для глибокого свердління. З наведених на рис. 3 графіків можна зробити висновок, що економічно доцільно виконувати операції глибокого свердління спіральними свердлами у відносно широких межах – до 200D.

Проте можливості підвищення жорсткості інструменту за рахунок зміни форми перерізу стебла свердла на даний час досить повно вивчені і практично вичерпані. Тому, вказуючи на складність істотного підвищення жорсткості свердла за рахунок оптимізації його поперечного перерізу, основна увага спрямована на раціональну експлуатацію свердел.

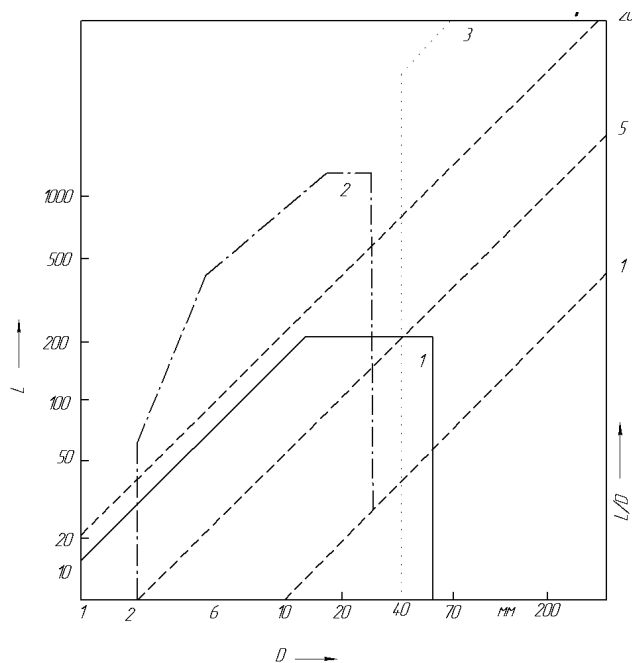


Рис. 3. Номограма для визначення економічної ефективності способів глибокого свердління залежно від глибини L та діаметра D обробки:

1 – область можливої обробки спіральними свердлами;

2 – розсвердлювання 3 – область обробки гарматними свердлами

Експериментальні дослідження визначення номінальних значень осьових зусиль при свердлінні сталі 40 здійснювали шляхом забезпечення міцності стебла свердла за умови збереження інструментом повздовжньої стійкості різними розмірами інструмента при фіксованому значенні подачі. Одержані значення осьового зусилля P_0 нанесені на графік рис. 4. З'єднання точок відбувалось шляхом апроксимації.

Аналіз наведених на рис. 4 графічних залежностей свідчить, що робоча область в системі координат „подача-осьове зусилля” визначається двома показниками: мінімальною для даного діаметру свердла величиною подачі, що визначається стійким характером стружкоутворення і мінімальною продуктивністю, а також максимально допустимою величиною подачі відповідно з міцністю поперечного перерізу інструменту і подовжньої стійкості стебла свердла.

Нами доведена можливість використання рекомендацій [3], які впевнено забезпечують використання рекомендованих режимів різання при досягненні економічної доцільності. Узагальнення результатів експериментальних досліджень створили основу для аналізу ефективності процесу свердління зі змінним вильотом інструмента.

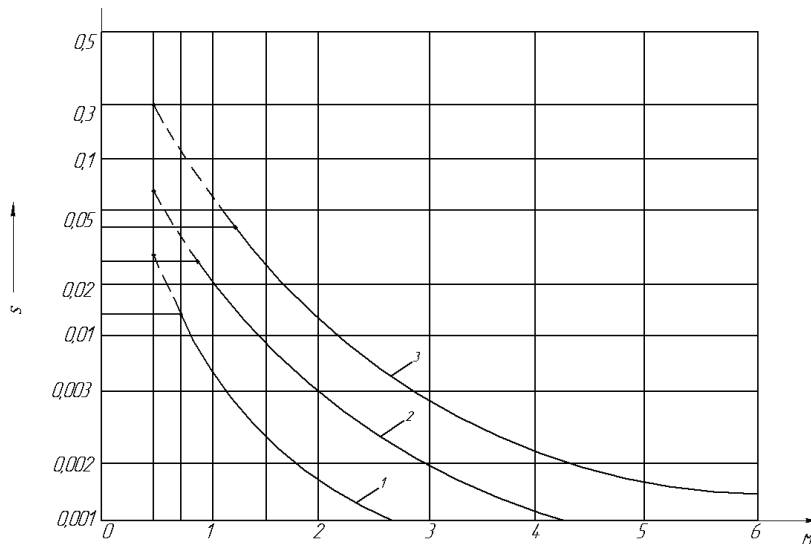


Рис. 4. Допустимі подачі S при обробці сталі 40

за умови міцності стебла свердла і умови збереження інструментом подовжньої стійкості при одержаному осьовому зусиллі

при діаметрі свердла: 1 – 5 мм; 2 – 7,5 мм; 3 – 10 мм

Відомо [3], що величина стійкості інструмента зі збільшенням глибини свердління нелінійно залежить від довжини вільоту

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^m = \left(\frac{l_0}{l}\right)^n \quad (6)$$

де l – робоча довжина вільоту, мм;

l_0 – вихідна розрахункова довжина вільоту, мм;

n, m – показники, які враховують вплив вільоту на стійкість інструменту.

Залежно від способу виготовлення свердла, а також матеріалу, який оброблюють, показники степенів n і m за результатами досліджень [4, 5] приймають в межах від 0,2 до 0,3.

Проаналізувавши процес глибокого свердління отворів свердлом зі змінним вільотом, необхідно відзначити, що величина вільоту буде однаковою тільки на граничній глибині обробки. Протягом усього процесу обробки при роботі зі змінним вільотом інструмента ця величина завжди буде меншою. Таким чином, за всіма рівними умовами відношення стійкості інструмента при обробці зі змінним вільотом може бути визначене

$$\frac{T}{T_0} = \frac{k - k^{\frac{n}{m}}}{k - 1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{m}}, \quad (7)$$

де k – відношення вільоту наприкінці обробки до вихідного вільоту.

Відповідно до залежностей будуюмо графіки стійкості інструмента при свердлінні зі змінним вільотом від відношення вільотів наприкінці і початку обробки (рис. 5). Показник степеня m , що враховує вплив вільоту на стійкість, при цьому прийнятий рівним 0,25.

Наведені графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення вільотів наприкінці і початку обробки, стійкість інструмента зростає. З погіршенням оброблюваності матеріалу (збільшення показника n) ефект зростання стійкості збільшується. Ці висновки співпадають з експериментальними дослідженнями, проведеними в роботі на звичайних свердлах постійного перерізу по всій довжині інструмента, які показали, що обертові коливання, які знижують стійкість свердлів, є пропорційними кубу

довжини вильоту свердла. При цьому шляхом зменшення довжини вильоту свердла можна збільшити величину подачі в три-сім разів при одночасному збільшенні стійкості інструмента від трьох до семи разів.

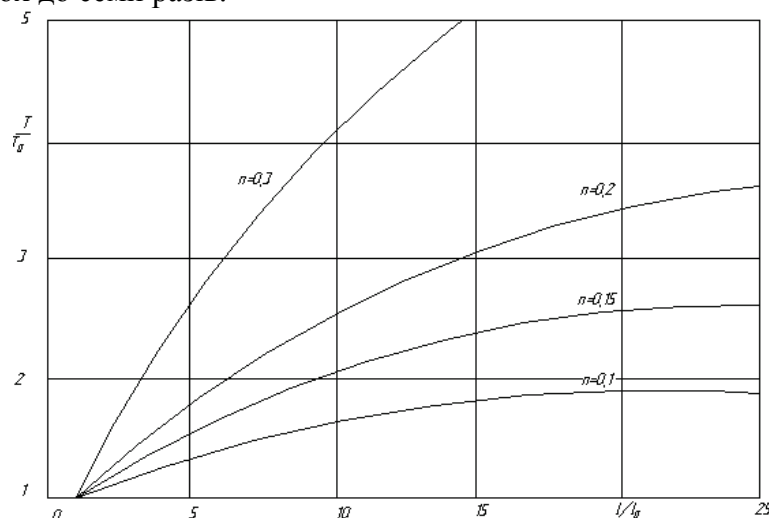


Рис. 5. Стійкість інструмента при свердлінні зі змінним вильотом

Висновки. Аналіз отриманих теоретичних і експериментальних даних показує, що значення глибини свердління поверхні в основному залежить від глибини різання, діаметру свердла, подачі і швидкості різання. Також уточнені параметри режимів різання при глибокому свердлінні сталі 40 спіральними свердлами. Для підвищення продуктивності процесу свердління необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі. У той же час максимальна допустима подача свердління обмежується міцністю і подовжньою стійкістю інструменту.

Література

1. Пестунов В.М. Решение проблем глубокого сверления в металлообработке / В.М. Пестунов, В.В. Свяцкий, Л.П. Свяцкая // Вестник НТУУ „КПИ”. – К.: НТУУ «КПИ», 2006. – №49. – С.173-178.
2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мецержакова. – М.: Машиностроение, 1983. – Т. 1. – С. 100 – 105.
3. Устройство для сверления сквозных отверстий. А.с. 1491624 СССР, МКП В23 В47/00/ Нагорняк С.Г., Кузьмин Н.И., Кривый П.Д. (СССР) – №4279167/31-08; заявлено 07.07.87; опубл. 07.07.89, бюл. №25. – 4 с.
4. Устройство для сверления отверстий малого диаметра. А.с. 975238 СССР, МКП В23 В47/00/ Кузьмин Н.И., Кривый П.Д., Сопрончук В.Н.(СССР)–№3326065/25-08; заявлено 07.08.84; опубл. 23.11.82, бюл. №43 – 2 с.
5. Ertunc H.M. Decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in Drilling / H.M. Ertunc, K.A. Loparo // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001. – №41. – P. 1347-1362.
6. Hong Li. Research on deep drilling / Hong Li // Applied Mechanics and Materials, 2012. – №101-102. – P. 1101-1104.

©А.В. Васильєв, С.В. Попов, І.В. Тимошенко

УДК 621.923.01

А.В. Васильев, к.т.н., доцент

С.В. Попов, к.т.н., доцент

И.В. Тимошенко, магистрант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса глубокого сверления спиральными сверлами. Получена математическая модель зависимости осевого усилия от глубины резания, диаметра сверла, подачи и скорости резания.

Ключевые слова: *глубокое сверление, механизм подач, устойчивость, жесткость, эффективность, математическое моделирование.*

UDC 621.923.01

A.V. Vasilyev, Ph.D.

S.V. Popov, Ph.D.

I.V. Timoshenko, master student

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

IMPROVING THE EFFICIENCY DEEP DRILLING OF STEEL BILLET

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the process of deep drilling spiral drill. Mathematical model of dependence of the axial force from the depth of cut, drill diameter, feed and cutting speed.

Keywords: *deep drilling, the feed mechanism, stability, stiffness, efficiency, and mathematical modelling.*

ПРОЦЕСИ ВІДНОВЛЕННЯ В БАГАТОСТУПІНЧАТИХ СВЕРДЛОВИННИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСАХ ТА ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЇХ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Викладено вплив технологічних факторів обробітку поверхні торцевих пар тертя в електровідцентрових насосах для добування пластових рідин і та оптимізовано їх параметри.

Ключові слова: *електровідцентрові насоси, гідрозахисту електродвигуна; витік; ущільнення.*

Вступ. При видобуванні рідких корисних копалин, із свердловин, одним із основних агрегатів, які широко використовуються є насоси і серед них найбільш поширеним типом для глибин більше 2000 м є електричні відцентрові.

Як показав аналіз роботи цих насосів на промислах нафтових регіонів, оптимальний терміном їх роботи є 200...250 діб [1].

Підвищення надійності і довговічності роботи цих насосів дає можливість зменшити собівартість витрат на заміну занурених електровідцентрових насосів у свердловинах, які складають 50...60% від вартості самого обладнання.

Проблемам підвищення ресурсу та питанням спрацьовування поверхні деталей під дією різних факторів а особливо дії абразиву присвячено багато праць, де розглядаються різні аспекти даної проблеми.

Для аналізу причин відмовлення та розрахунку надійності, зібрано й опрацьовано матеріали із 100 установок електровідцентрових насосів НГВУ „Полтаванафтогаз” Глинсько–Розбишевського родовища.

На основі цих матеріалів встановлено, що у 73 випадках відмовлення виникли в електровідцентрових насосах, що становить 41,42% від загальної суми відмовлень.

Друге місце серед усіх відмовлень займає пошкодження електричного кабелю – 32,33%.

На третьому - пошкодження пристрою гідрозахисту електродвигуна – 16,5%.

Основними причинами відмовлення від роботи є пошкодження ущільнення між робочими колесами і струмененаправляючим апаратами (рис.1), це пошкодження викликає осадку усіх робочих коліс, що призводить до защемлення валу та викликає перевантаження зануреного електродвигуна, погіршенню його охолодження, так як він охолоджується проточною рідиною, що прокачується. Воно піддається найбільш інтенсивній дії абразивних часток, які проникають в насос із вуглеводневою сировиною. Такі відмовлення у роботі зустрічаються в 30...35 випадках, що становить приблизно 34,1%.

Змашування поверхонь торцевого ущільнення, що труться здійснюється рідиною, що перекачується.

Огляд останніх джерел і публікацій. В залежності від величини витіку через ущільнення може утворитися суцільна плівка по всій площі поверхні контакту (рідинне тертя) то зношування буде мінімальне.

При наявності гарної рідинної плівки між поверхнями кілець, що труться, ущільнення не буде нагріватися і зношуватися, але при цьому витік рідини між кільцями буде значний. При граничному змащенні поверхонь, що труться, витік може різко зменшуватися, але при цьому може збільшуватися нагрівання [2, 3].

і знос кілець. При сухому терті і незначному питомому тиску на кільцях можна цілком усунути витік, але в цьому випадку нагрів і зношування кілець можуть досягти небезпечних значень.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Основними умовами при виборі і конструюванні ущільнення є тиск (точніше, перепад тиску) між порожнинами, що ущільнюються, витік, зношування кілець, тобто довговічність ущільнення, внутрішнє і зовнішнє середовище, споживане потужність, температура нагрівання і т.д.

Недостатнє змащення і присутність абразивних часток прискорюють їхнє зношування.

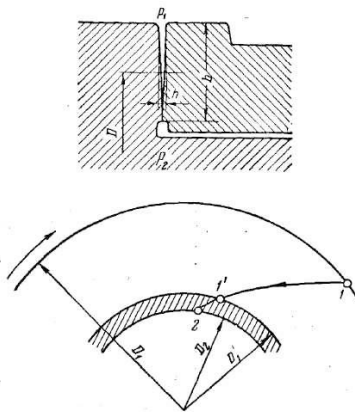


Рисунок 1 - Бічний розріз ущільнення.

Постановка завдання. В роботі пропонується за рахунок обробітку поверхні досягти оптимальні величини зношення забезпечивши регулювання товщини плівки змащування і охолодження.

Характер режиму потоку і кількість рідини, що протікає в зазорі торцевого ущільнення, для ідеального випадку можна уявити собі, користуючись рис. 2 і вважаючи при цьому, що частки рідини, проникаючи у вузьку щілину між кільцями, утворюють ламінарний потік.

Кількість рідини, що протікає між цими двома нерухомими кільцями може бути орієнтовно визначено за допомогою рівняння ламінарного потоку:

$$q = \frac{\pi D h^3 p}{12 \mu b}, \text{ см}^3/\text{хв}, \quad (1)$$

де D — середній діаметр кільця в мм; h — середня висота зазору в мк; μ — динамічна в'язкість у $\text{кГ} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$; b — ширина ковкої поверхні кільця в мм; p — перепад тиску в $\text{кГ}/\text{см}^2$.

Приведене рівняння дає лише наближене теоретичне уявлення про можливий характер витіку і його залежність від деяких основних параметрів. Ламінарний рух рідини між поверхнями ковзання ущільнення можна скоріше віднести до часткового прикладу, чим до загального явища.

При рідкому терті з великим витіком через щілину і певному стані поверхні тертя, рівняння (1) може дати меншу погрішність, чим при граничному терті.

Як показують дослідження торцевих ущільнень із граничним тертям, на величину витіку істотно впливає відцентровий тиск між дотичними поверхнями. Витік змінюється прямо пропорційно квадратові зазору між дотичними поверхнями і зворотно пропорційно квадратові питомого тиску на кільця. Стан поверхонь ковзання, тобто прямолінійність і шорсткість, дуже впливає на розподіл тиску в зазорі і витік.

Більш точно величина витіку встановлюється дослідним шляхом для кожного виду ущільнення окремо.

Швидкість (інтенсивність) зношування для різних пар тертя коливається від сотих часток до десятків і сотень мікронів за годину.

Існує декілька методів визначення антифрикційних властивостей пар тертя. Одним із найпростіших методів, що не потребує випробовувальних машин складної конструкції є зразок, який під час випробування притискується до диску що обертається. Але такий метод не може дати повної оцінки пари тертя, що працює у електровідцентрових насосах для добування нафти де величина тиску сягає до 30 МПа і температури рідини доходить до 150 °С.

Випробування для визначення коефіцієнту тертя проводились на стенді для випробування на інтенсивність торцевого зношування пар тертя, за умов відсутності абразиву.

Величину коефіцієнту тертя визначали за формулою:

$$f = \frac{F_{mp}}{\pi \cdot D \cdot b \cdot p_k}, \quad (2)$$

де F_{mp} - сила тертя, яка залежить від конструкції ущільнення; D – середній діаметр ущільнюючого кільця, см; b - ширина контакту ущільнюючого кільця, см; p_k – перепад тиску в ущільненні, МПа.

Сила тертя визначалась за формулою:

$$F_{mp} = F_p \cdot p_c / n - G, \quad (3)$$

де p_c - тиск рідини, яку перекачує насос, МПа; F_p - площа поверхні тертя, см²; n – кількість робочих ступенів насосу; G - маса робочого колеса, кг.

Коефіцієнт тертя визначався для різних типів покриття та ущільнення.

Моделювання процесів торцевого зношування використовується для вирішення проблем по стійкості та для оцінки умов спрацювання трубоз'єднань у конкретних умовах експлуатації і при вивченні фізичних основ прогнозування їх довговічності.

Основний матеріал і результати. Межі працездатності моделі визначалися розрахунково-експериментальним шляхом. Для оцінки інтенсивності зношування пар тертя навіть для найбільш вживаних матеріалів ще не одержано простих залежностей, здатних описати процеси зношування.

У парах тертя розчинонасосів іде процес спрацювання за рахунок попадання абразиву між поверхнями тертя. У роботі [2] запропоновано формулу, яка характеризує в загальному вигляді об'єм зношування:

$$V_{cnp} = c \cdot \frac{S \cdot p \cdot d}{HV}, \quad (4)$$

де p – тиск, МПа; S – шлях тертя, м; d – діаметр абразиву, мм; HV – твердість поверхні тертя, МПа; c – коефіцієнт пропорційності, який залежить від властивостей матеріалу пари тертя і його значення наближається до коефіцієнту тертя.

Враховуючи, що твердість матеріалу є одним із вирішальних факторів на інтенсивність зношування, то в даній роботі пропонується поверхні пари тертя зміцнити шляхом нанесення зносостійкого газотермічного покриття.

Існує цілий ряд порошкових матеріалів для створення зносостійких покриттів, до складу яких входять дорогі і дефіцитні компоненти.

Для здешевлення собівартості порошкових матеріалів пропонується додавати більш дешеві компоненти, одним із яких є базальт.

Базальт відноситься до магматичних порід, що характеризуються певним хімічним і мінеральним складом.

Головними компонентами, з яких полягають магматичні гірські породи, є дев'ять елементів: О, Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Н. Ці елементи названі М. Вашингтоном петрогенними, на відміну від металогенних елементів, що становлять головну масу руд.

Мінерали, які своєю присутністю вказують на певні особливості хімічного складу магматичних порід, називаються симптоматичними. Наприклад, на ступінь насичення

порід оксидом кремнію вказує кварц, який утворюється тільки тоді, коли зміст SiO_2 у магмі перевищує критичне число, яке повинне вступити в сполуки з металами. Кристали олівіну сприяють цьому процесу.



Рисунок 2 - Відновлені робочі деталі та струмененаправляючого апарату відцентрових електронасосів.

При взаємодії металевих порошоків з олівіном утворюється зносостійке покриття.

Для математичного моделювання процесу зношування від технологічних факторів використано поліном другого порядку.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n + a_{n+1}x_1^2 + \dots + a_{2n}x_n^2 + a_{2n+1}x_1x_2 + \dots + a_mx_{n-1}x_n \quad (5).$$

Кількість дослідів при плануванні експерименту визначалася за формулою:

$$N = 2n - p + 2n + 1 \quad (6)$$

з кількістю факторів плану $n=3$ та генератором плану $p=0$, звідси $N=23+2 \times 3+1=15$, з мінімальною кількістю повторень, що дорівнює трьом ($\gamma=3$), то загальна кількість експериментів дорівнює 45.

За фактори варіювання прийнято: V – швидкість різання, м/хв.; t – глибина різання, мм; S – подача, мм/об.

Функція відгуку (Y) – зношування поверхні тертя.

Для проведення оптимізації мінімального зношування тертя робочого колеса за режимами різання приймалась функція відгуку виду:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 \quad (7).$$

Значення факторів та рівні їх варіювання приведені в табл.1.

Таблиця 1 - Значення факторів та рівні їх варіювання

Фактори		Твердість матеріалу МПа	Концентрація базальту, %	Подача, мкм/об.
Найменування	Код	x_1	x_2	x_3
Основний рівень	0	4500	100	500
Зіркова точка	1,215	5470	122	610
Верхній рівень	1	4670	115	580
Нижній рівень	-1	4330	85	420
Зіркова точка	-1,22	3530	78	390

Результати досліджень у відповідності з планом експериментів занесене в табл. 2. Одержані результати опрацьовані на ПЕОМ з використанням прикладних та спеціально розроблених програм.

Визначено коефіцієнти регресії та одержано модель процесу у вигляді поліному другої степені:

$$y=1,087+0,22x_1+0,741x_2-0,44x_3 -0,50x_1^2+0,132x_2^2+0,472x_3^2+0,105x_1 x_2+0,66x_1x_3-0,39x_2x_3 \quad (8).$$

Перевірка адекватності моделі проведена на основі критерію Фішера.

Квадрат різниці відхилень $S_R = 1,342711$, при числі ступенів свободи $\nu=5$.

Дисперсія адекватності $S_R = 1,342711/5 = 0,2685$

Помилка досліду (дисперсія відновлення) $Se=16,275$, з числом ступенів свободи $\varphi_2 = 30$ та кількістю повторень $\nu = 3$.

Дисперсія коефіцієнтів $S^2 = 16,275/(3 \times 30) = 0,18083$. Перевірка адекватності виконувалась за критерієм Фішера:

$F=0,2685/0,18083=1,485 < F_{кр.}=19,3$, отже критерій Фішера моделі, менший - критичного.

На основі рівняння в кодованих значеннях побудовано графіки, які дають основну тенденцію впливу факторів варіювання.

Таблиця 2 – Залежність інтенсивності зношування від технологічних факторів.

Кодовані значення факторів	$y=f(x_1)$	$y=f(x_2)$	$y=f(x_3)$
1,215	0,62	15,185	1,252
1	0,81	14,63	1,122
0	1,09	11,09	1,09
-1	0,37	8,481	2,002
-1,215	0,085	6,385	2,321

Замінивши значення X_i на реальні величини одержано розрахункову формулу в реальній системі координат:

$$x_1 = \frac{HV - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{HV - (5470 + 3530)/2}{(5470 - 3530)/2}, \text{ для твердості поверхні тертя,}$$

м/хв.;

$x_2 = \frac{r - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{r - (0,1 + 0,078)/2}{(0,1 - 0,078)/2}$, для концентрації базальту в порошок, %.

$x_3 = \frac{S - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{S - (0,5 + 0,39)/2}{(0,5 - 0,39)/2}$, для подачі, мм/об.

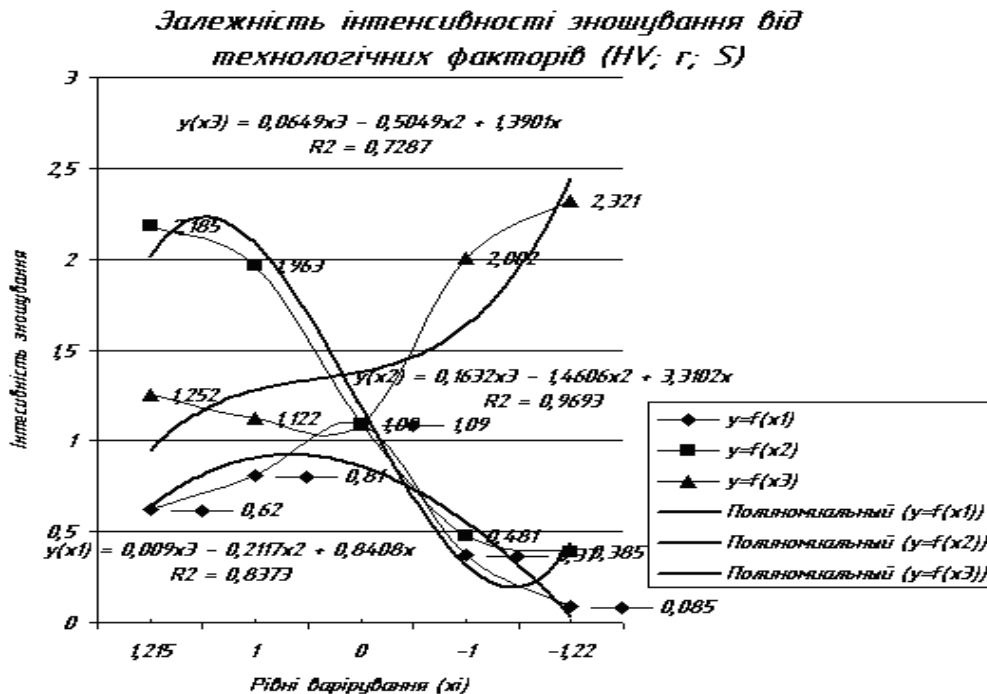


Рисунок 3 – Графіки основних залежностей при одній змінній при фіксації інших факторів на нульовому рівні.

Після проведених спрощень, одержано остаточну математичну модель:

$$I = 77,26 - 0,0016 \cdot HV - 1162,65 \cdot r - 25,26 \cdot S - 5 \cdot 10^{-7} \cdot HV^2 + 1090,91 \cdot r^2 + 156,04 \cdot S^2 + 0,11 \cdot HV \cdot r - 0,011 \cdot HV \cdot S - 646 \cdot r \cdot S \quad (9)$$

Одержана залежність математично проаналізована на мінімальне значення величини зношування в залежності від технологічних факторів при виготовленні ущільнення.

Встановлено що мінімальне зношування (I_{min}) дорівнює $I = 0,567$ мг/год, при концентрації базальту $r = 10,88$ %/

Висновки: 1. Найбільш слабким місцем у електровідцентрових насосах є ущільнення між ступенями, яке також сприймає зусилля від стовпа прокачуваної рідини.

2. При підвищенні температури взаємодії поверхні з абразивом різко зростає інтенсивність спрацювання і коефіцієнт тертя [5].

3. Для оцінки об'єму спрацювання в залежності від різних факторів твердості металевих поверхонь та властивостей абразиву найбільш придатною є формула Хрущова-Бабічева, але вона не враховує фізичних характеристик шару покриття.

4. Математичну модель проаналізована на мінімальне значення величини зношування в залежності від технологічних факторів при виготовленні ущільнення.

5. Встановлено, що інтенсивність зношування залежить від шорсткості поверхні тертя. Оптимальною шорсткістю поверхні тертя при даних випробуваннях є $r = 10,88$ %, при якій інтенсивність спрацювання мінімальна та становить $I = 0,567$ мг/год.

Література

1. Калашиников А.В. Методика визначення ресурсів роботи багатоступінчатих свердловинних відцентрових насосів / А.В.Калашиников, І.А. Калашиникова // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Вып.2/1[20]., 2006р. - С.79-82
2. Калашиников А.В. Основные закономерности абразивного изнашивания газотермического покрытия / А.В.Калашиников, Д.Г. Тищенко // *Механизация строительства*. Вып. № 12., 1997г. - С. 26-29.
3. Калашиников А.В. Анализ абразивного износа и методы повышения ресурса работы деталей растворонасосов / А.В.Калашиников, В.М.Корж // *Автоматическая сварка*. Вып. №6., 1998г. - С.27-30
4. *Нефтепромысловое оборудование. Справочник под ред. Е.И. Бухаленко*. - М.: Недра, 1990.
5. *Проникав А.С. Надежность машин*. - М.: Машиностроение, 1978, с.592
6. *Адлер Ю.П., Марков Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. - М.: Наука, 1976. - 276 с.
7. *Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экспериментальных условиях. Справочник*. - М.: Машиностроение, 1986. - 543 с.
8. *Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа*.-М.: Машиностроение, 1987.-287с.
9. *Е.Н. Граменицкий, А.Р. Котельников, А.М. Батанова, Т.И. Щекина, П.Ю. Плечов. Экспериментальная и техническая петрология*./ Москва, МГУ, 1986.- 296с.

© І.А.Калашникова, А.В.Калашников.

УДК 622.276.05.004

І.А.Калашникова, ассистент

А.В.Калашников, к.т. н., доцент

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ПРОЦЕССЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ В МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ БУРОВЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСАХ ТА ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИХ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

Изложено влияние технологических факторов обработки поверхности торцевых пар трения в электроцентробежных насосах для добычи пластовых жидкостей и оптимизировано их параметры.

Ключевые слова: *электроцентробежные насосы, гидрозащита электродвигателя; исток; уплотнение.*

UDC 622.276.05.004

I.A.Kalashnikova, assistant

A.V.Kalashnikov, Ph.D.

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

IMPROVING LIFE OF MNOGOSTUPENCHASTYH SKVAZHENNYH CENTRIFUGAL PUMPS TECHNOLOGICAL METHODS OF PROCESSING SURFACE

It examines the impact of technological factors of surface treatment of end friction pairs in electric submersible pumps for the extraction of reservoir fluids and their parameters are optimized.

Keywords: *electric centrifugal pumps, motor seal section, source, seal.*

С.А. Кравченко, к. т. н., доцент

А.И. Костюк, к.т.н., профессор

А.А. Постернак, к. т. н., доцент

И.А. Столевич, к. т. н., доцент

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ И ФРАГМЕНТОВ ВНУТРЕННИХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ КЕРАМЗИТОПЕРЛИТОБЕТОНА НА МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ

Приведены экспериментальные данные и их анализ по оценке несущей способности и деформативности моделей и фрагментов внутренних стеновых панелей из керамзитоперлитобетона.

Ключевые слова: *керамзитоперлитобетон, прочность, деформативность.*

Введение. В последнее время внимание сосредоточено на разработке и применении конструкций с использованием новых материалов и компонентов, обладающих улучшенными теплотехническими и эксплуатационными свойствами. При рациональном проектировании конструктивных систем, зданий следует учитывать, что собственная масса несущих конструкций из лёгких бетонов благодаря их низкой плотности до 1,5 раз меньше, чем аналогичных конструкций из тяжёлых бетонов.

Лёгкий бетон на пористых заполнителях представляет собой универсальный строительный материал, позволяющий при его рациональном использовании решать многие актуальные задачи современного строительства и одновременно решать экологические, ресурсосберегающие и экономические проблемы за счёт технологических и техногенных отходов при применении и изготовлении местных пористых заполнителей и различных видов вяжущих.

Обзор последних источников исследований и публикаций. За последнее время накопилось много исследований прочности и деформаций легких бетонов и конструкций на их основе, приведены в работах М.А. Ахматова, Э.М. Бабича, М.Р. Камалы Мадии, А.И. Костюка, Р.Л. Маиляна, Л.П. Орендлихера, А.С. Столевича, В.Г. Суханова, К.Ш. Шаймухамбетова и др.

На современном уровне значительный вклад в развитие бетонов с использованием шлака и золы внесли В.Г. Брагинский, В.И. Братчун, С.А. Высоцкий, Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, А.Г. Зоткин, М.Ю. Лещинский, В.В. Костин и др., но в основном использование золы и шлака рассматривается для тяжелых бетонов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Использование отходов промышленности в производстве материалов и конструкций приводит не только к утилизации, но и позволяет получить дешевый местный сырьевой материал и способствует охране окружающей среды. Необходимость использования золошлаковых отходов связана и с их вредным влиянием на окружающую природную среду. Распыление золы ТЭС при ее хранении в отвалах представляет опасность для водного и воздушного бассейнов. Вблизи отвалов ухудшаются условия жизни людей.

Проблема использования легких бетонов, в частности керамзитобетонов, на цементно-золном вяжущем с химическими добавками является весьма актуальной задачей, поскольку предусматривает экономию сырьевых ресурсов, цемента, утилизацию отходов производства и улучшения состояния окружающей среды [1].

Основная цель. Цель состоит в исследовании несущей способности, трещиностойкости и деформативности моделей и фрагментов внутренних стеновых панелей из керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем.

Основной материал и результаты. Моделирование внутренних стеновых панелей проводили с целью апробации в лабораторных условиях разработанной технологии изготовления керамзитоперлитобетонных на многокомпонентном вяжущем смесей различной подвижности и предварительной оценки работы этих панелей под нагрузкой.

Для изготовления моделей было использовано физическое моделирование на геометрически подобных моделях с соблюдением принципа простого подобия оригиналу.

Испытания моделей проводили с целью выявления их фактической несущей способности и трещиностойкости.

Согласно принятому нами критерию результаты испытания внутренних стеновых панелей должны удовлетворять следующим требованиям:

Несущая способность обеспечена, если величина опытной разрушающей нагрузки N_p^0 не менее теоретической разрушающей нагрузки N_p^m , т.е. $N_p^0 \geq N_p^m$.

Трещиностойкость обеспечена, если расчетная нагрузка N увеличенная на коэффициент 1.1, меньше опытной нагрузки трещинообразования N_{mp}^0 , т.е. $\frac{N_{mp}^0}{N} > 1.1$.

Разрушение панели должно произойти вследствие исчерпания несущей способности одного из расчетных сечений (вследствие разрушения бетона, текучести или разрыва арматуры и т.п.).

Теоретические значения разрушающих нагрузок N_p^m определяли по формуле

$$N_p^m = \eta \varphi \left[f_{cd} A_c + f_{yd} \left(A_s + A_s^{(1)} \right) \right] \quad (1)$$

где η – коэффициент условий работы для элементов малой высоты ($h \leq 200$ мм) учитывает определяющее значение случайного

эксцентриситета 1 см и принимается в этом случае равным 0,9;

φ – коэффициент продольного изгиба, вычисляется по ДБН в зависимости от гибкости элемента $\frac{l_0}{h}$ и соотношения $\frac{N_{dl}}{N}=1$ (в наших расчетах);

f_{cd}, f_{yd} – прочностные характеристики бетона и арматуры;

$A_c, A_s, A_s^{(1)}$ – площади сечений бетона и арматуры.

Расчетные нагрузки также определяли по формуле (1.1) по установленным расчетным сопротивлениям керамзитоперлитобетона, арматуры и фактическим размерам моделей. Расчетные сопротивления керамзитоперлитобетона определяли по ДБН и с учетом применения зависимостей норм с полученными из наших экспериментов уточненными значениями f_{cd} . Сравнение расчетных нагрузок, полученных по ДБН N , с расчетными нагрузками, полученными с учетом наших предложений N' , показывает, что действующие нормы несколько занижают расчетную несущую способность сжатых элементов. Среднее значение отношения $\frac{N}{N'}$ составляет 0,81 при коэффициенте вариации $C_{VN}=4,7\%$.

Анализ результатов испытания моделей показал, что практически все они удовлетворяют вышеприведенным требованиям по несущей способности и трещиностойкости.

Величины опытных разрушающих нагрузок N_p^0 превышают соответствующие теоретические значения N_p^m , рассчитанные для коэффициента условий работы $\eta=0,9$, в среднем на 17,2%. Значительное превышение опытных разрушающих нагрузок над теоретическими для большинства моделей, по-видимому, определяется тем, что физическая ось испытанных моделей перемещалась при разрушающей нагрузке N_p^0 незначительно и,

следовательно, практически отсутствовали эксцентриситеты приложения нагрузок, по крайней мере они были меньше 1. Учитывая это, был проведен расчет теоретических разрушающих нагрузок для коэффициента условий работы $\eta=1$. Сопоставление рассчитанных таким образом значений N_p^m с соответствующими значениями N_p^0 , показало, что в данном случае превышение опытных разрушающих нагрузок над теоретическими составило в среднем 6,9%.

Наибольшее превышение опытных разрушающих нагрузок над теоретическими (20,1%) зафиксировано для моделей изготовленных из смесей с ОК=6 см (класс бетона LC 12/15); наименьшее (1,3%) – для моделей изготовленных из смесей с ОК=18 см (класс бетона LC 12/15).

В процессе испытаний керамзитоперлитобетона бетон во всех испытанных моделях деформировался как упругий материал практически до их разрушения. Первые видимые трещины образовались при нагрузках $N_{тр}^0$ составляющих в среднем $0,67 N_p^0$.

Разрушение всех опытных моделей произошло в результате исчерпания несущей способности керамзитоперлитобетона в средней либо верхней зоне элемента, что по-видимому, связано с уменьшением прочности керамзитобетона в верхней части этих моделей за счет частичного расслоения при вибрировании смесей с показателем подвижности ОК=18 см.

Полученные результаты испытания опытных моделей стеновых панелей были проанализированы с использованием математической статистики.

Результаты испытания моделей внутренних стеновых панелей показали, что на базе принятых оптимальных составов можно изготавливать внутренние стеновые панели, удовлетворяющие основным эксплуатационным требованиям по несущей способности и трещиностойкости. С целью проверки этого предположения были исследованы фрагменты внутренних стеновых панелей.

Испытание фрагментов проводили с целью выявления их фактической несущей способности, трещиностойкости и деформативности.

Несущую способность и трещиностойкость опытных фрагментов оценивали согласно.

Теоретические значения разрушающих нагрузок N_p^m определяли по формуле (1) при коэффициентах условий работы $\eta=0,9$ и $\eta=1$.

Значения расчетных нагрузок определяли по ДБН, что также, как и при анализе аналогичных отношений в моделях, свидетельствует о том, что нормы занижают расчетную несущую способность сжатых элементов.

Несколько большее по сравнению с моделями занижение (на 6%) расчетной несущей способности, полученной для фрагментов, связано с дифференцированным подходом к определению коэффициента призмной прочности φ_c . При оценке расчетной несущей способности сжатых элементов, изготовленных из керамзитобетонных на карбонатном песке смесей с ОК=6...18 см, следует учитывать фактическую прочность бетона, связанную с определением коэффициента призмной прочности φ_c .

Анализ результатов испытаний фрагментов показал, что все они удовлетворяют требованиям по несущей способности и трещиностойкости.

Величины опытных разрушающих нагрузок N_p^0 превышают соответствующие теоретические значения N_p^m в среднем на 14,1% (для $\eta=0,9$) и 2,8% (для $\eta=1$). Незначительное для большинства фрагментов превышение опытных разрушающих нагрузок над теоретическими, рассчитанными для $\eta=1$, по-видимому, свидетельствует о величине случайных эксцентриситетов, меньших 1.

Для проверки этого предположения для каждого опытного фрагмента на каждой ступени загрузки по усредненным полным относительным продольным деформациям

керамзитобетона на боковых гранях были рассчитаны величины опытных эксцентриситетов деформаций e_1^0 , для вычисления использовали зависимость

$$e_1^0 = \frac{|\varepsilon_{np1} - \varepsilon_{np2}|}{\varepsilon_{np1} + \varepsilon_{np2}} \times \frac{h}{6}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{np1}, \varepsilon_{np2}$ – средние продольные деформации керамзитобетона по боковым граням фрагмента; h – высота сечения фрагмента.

Однако, величина e_1^0 не отражает действительного эксцентриситета приложения нагрузки в средней части высоты фрагмента. Это связано, прежде всего, с горизонтальными смещениями фрагмента в процессе испытаний, контроль которых осуществляли измерением прогибов. Для всех фрагментов при увеличении нагрузки прогибы постоянно возрастали и на ступенях загрузки, предшествующих разрушению, достигали максимальных значений, равных 0,5...1,8 см. естественно, что учет этих прогибов должен существенно влиять на величины соответствующих эксцентриситетов деформаций e_1^0 . В этой связи нами были вычислены величины фактический случайных эксцентриситетов приложения равнодействующей нагрузки e_2^0 с учетом полученных в эксперименте прогибов. Для вычисления была использована формула:

$$e_2^0 = \frac{\sum_{i=1}^n (e_{1,i}^0 - f_{n,i})}{n}, \quad (3)$$

где $f_{n,i}$ – полный прогиб на ступени загрузки;

n – количество ступеней загрузки;

i – ступени загрузки.

Вычисления e_2^0 обычно проводят при нагрузках, соответствующих линейной зависимости между напряжениями и деформациями, т.е. при $N \leq (0,1 \dots 0,3) N_p^o$.

Сопоставление полных продольных деформаций $\bar{\varepsilon}_{np}$ с упругими $\bar{\varepsilon}_y$ показывает, что керамзитобетон во всех опытных фрагментах работал упруго практически до разрушения. Это позволило сделать допущение о прямой зависимости между полным прогибом f_n и фактическим эксцентриситетом e_2^0 вплоть до начала разрушения фрагментов. Возникающая при этом погрешность незначительно влияет на величину e_2^0 . Средние значения e_2^0 изменяются в пределах 0,03...0,66 см и для большинства фрагментов значительно меньше 1.

Величина относительных случайных эксцентриситетов $m = \frac{e_2^0}{h}$ в эксперименте изменялась в пределах (0,001...0,05) при среднем значении 0,0199.

Наибольшее превышение опытных разрушающих нагрузок N_p^o над теоретическими N_p^T получено при $\eta=1$ для фрагментов (ОК=6 см, LC 16/20) и составило 11%.

Для всех фрагментов значения опытных нагрузок трещинообразования $N_{тр}^o$ превышают соответствующие значения расчетных нагрузок в среднем на 86%. Первые видимые трещины образовались при нагрузках $N_{мп}^o = (0,68 \dots 0,89) N_p^o$. Среднее значение отношения $\frac{N_{мп}^o}{N_p^o} = 0,87$. Разрушение всех опытных фрагментов произошло в результате исчерпания несущей способности керамзитобетона в средней зоне элемента. Это дополнительно свидетельствует о высокой прочностной однородности по высоте формования опытных фрагментов.

Учитывая, что все фрагменты разрушились в средней зоне, оценку их деформативности проводили в средних сечениях. Деформации равномерно возрастают практически до разрушения фрагментов. Сопоставление результатов механических измерений (индикаторы) продольных деформаций с тензометрическими (тензодатчики) показывает их

близкую сходимость до нагрузок, равных $(0,6 \dots 0,8) N_p^o$. При дальнейшем увеличении нагрузок интенсивность роста деформаций, измеренных с помощью индикаторов, для большинства фрагментов делается несколько большей. Это, по-видимому, связано с началом микротрещинообразования в керамзитоперлитобетоне: некоторые тензодатчики, попавшие в зону образования микротрещин, выключались из работы, что повлияло в сторону уменьшения на среднюю величину полных продольных деформаций, измеренных тензометрическим способом. Коэффициент поперечных деформаций $\rho = \frac{\bar{\varepsilon}_n}{\bar{\varepsilon}_{np}}$, характеризующий, в частности, границы образования микротрещин, равномерно возрастает до нагрузок $(0,6 \dots 0,7) N_p^o$, достигая величины $0,17 \dots 0,25$. При дальнейшем увеличении нагрузки значения ρ для большинства фрагментов резко возрастали и на ступенях, предшествующих разрушению, достигали максимальных значений $\mu^{max} = 0,31 \dots 0,44$, близких к уровню нормируемой величины $0,5$, которую принято считать верхней границей образования микротрещин. Эксплуатационная нагрузка, под действием которой находится внутренняя стеновая панель в здании, составляет обычно $0,6 \dots 0,7$ от разрушающей. Таким образом, при эксплуатационной нагрузке, как показывают результаты наших испытаний, во внутренних стеновых панелях класса по прочности на осевое сжатие LC8/10...LC16/20, изготовленных по рекомендуемой технологии из керамзитоперлитобетонных на многокомпонентном вяжущем пластифицированных смесей с ОК=6...18 см, силовые микротрещины в керамзитоперлитобетоне должны отсутствовать.

При нагрузках, равных $(0,2 \dots 0,5) N_p^o$, продольные деформации распределялись практически равномерно по сечению. На ступенях загрузения, предшествующих разрушению – $(0,85 \dots 0,94) N_p^o$, характер распределения этих деформаций был неравномерным.

Коэффициенты полноты эпюр продольных деформаций $\omega = \frac{\bar{\varepsilon}_{np}}{\varepsilon_{np}^{max}}$, подсчитанные для каждого фрагмента на ступенях загрузения, предшествующих разрушению, составили $\omega = 0,69 \dots 0,91$ (среднее значение $\bar{\omega} = 0,84$). Учитывая показанный выше упругий характер деформирования керамзитоперлитобетона вплоть до разрушения, можно предположить, что подсчитанные значения коэффициентов полноты эпюр продольных деформаций ω соответствуют значениям коэффициентов полноты нормальных напряжений в средних сечениях фрагментов. Выполненный с учетом этого предположения анализ значений ω показывает, что наибольшую концентрацию напряжений в средних сечениях показали фрагменты класса LC 16/20, изготовленные из смесей с ОК=6 см: среднее значение $\bar{\omega} = 0,89$ при коэффициенте вариации $C_{v\omega} = 3,5\%$. Наименьшее среднее значение $\bar{\omega} = 0,74$ при коэффициенте вариации $C_{v\omega} = 7,9\%$ зафиксировано во фрагментах класса C 12/15, изготовленных из смесей с ОК=12 см. максимальные величины средних продольных деформаций, полученные в эксперименте, достигали значений:

$\varepsilon_{np}^{max} = 218 \cdot 10^{-5}$ - для фрагментов класса C 12/15 (ОК=6 см);

$\varepsilon_{np}^{max} = 285 \cdot 10^{-5}$ - для фрагментов класса C 16/20 (ОК=6 см);

$\varepsilon_{np}^{max} = 213 \cdot 10^{-5}$ - для фрагментов класса C 12/15 (ОК=12 см);

$\varepsilon_{np}^{max} = 236 \cdot 10^{-5}$ для фрагментов класса C 12/15 (ОК=18 см).

Учитывая некоторое несоответствие уровней загрузений, при которых получены эти значения, можно сделать вывод, что помимо общеизвестного влияния прочности бетона на его предельные деформации также влияет консистенция смеси, с увеличением которой предельная сжимаемость пластифицированного керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем увеличивается.

Средние значения максимальных продольных деформаций для указанных фрагментов соответственно составили $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{max}}=218 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{max}}=262 \cdot 10^{-5}$ ($C_{V\varepsilon} = 4,6\%$), $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{max}}=207 \cdot 10^{-5}$ ($C_{V\varepsilon} = 5,9\%$), $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{max}}=241 \cdot 10^{-5}$. Полученные испытания фрагментов внутренних стеновых панелей были проанализированы с использованием математической статистики. Отношения $\frac{N_{\text{р}}^{\circ}}{N_{\text{р}}^{\tau}}$, рассчитанные для коэффициентов условий работы $\eta=0,9$ и $\eta=1$, подчиняются закону нормального распределения.

Исходя из физического смысла минимального коэффициента надежности K_{min} , можно сделать вывод о том, что чем меньше его величина, тем надежнее результаты расчета. Вместе с тем, полученное для $\eta=0,9$ значение $K_{\text{min}}=0,97 < 1$. Это в свою очередь свидетельствует о том, что расчет фрагментов, выполненный для $\eta=0,9$ при принятом в действующих нормах уровне зависимости $\alpha=0,05$ недооценивает фактическую несущую способность указанных элементов. Более точные результаты, исходя из сопоставления коэффициентов вариации C_{VN} , показывает расчет фрагментов, выполненный при $\eta=1$.

Кроме того, по принятой нами методике проведен статистический анализ средних значений относительного случайного эксцентриситета m , коэффициента поперечных деформаций ρ^{max} , коэффициента полноты эпюр продольных деформаций ω^{max} . Указанные величины подчиняются закону нормального распределения. Разброс величин эксцентриситета m относительно его среднего значения очень велик ($C_{Vm}=72\%$), что естественно и объясняется кроме вышеуказанных горизонтальных смещений фрагментов в процессе испытания, совокупностью трудноучитываемых факторов, в частности: размерными погрешностями толщины фрагмента по его высоте; неоднородностью керамзитоперлитобетона по толщине и, частично, его высоте и т.д..

Границы доверительных интервалов относительно случайного эксцентриситета m , построенные при уровне значимости $\alpha=0,05$, соответствуют значения 0,001 (нижняя граница) и 0,030 (верхняя граница). Разброс значений коэффициента поперечных деформаций ρ^{max} , рассчитанных для каждого фрагмента на ступенях загрузки предшествующих разрушению, относительно среднего характеризуется коэффициентом вариации $C_{V\rho}=18,2\%$.

Значение коэффициента вариации для величины ω^{max} составляет $C_{V\omega}=8,8\%$. Сопоставление результатов статистического анализа отношений, рассчитанных для моделей и фрагментов внутренних стеновых панелей показывает их достаточно близкую сходимость. Большое среднее значение отношения $\frac{N_{\text{тр}}^{\circ}}{N_{\text{р}}^{\circ}}$, а также несколько сдвинутые границы доверительных интервалов, полученные для фрагментов, свидетельствуют об их большей, по сравнению с моделями, трещиностойкости. Это связано с улучшенными, по сравнению с моделями, условиями формирования фрагментов за счет равномерного воздействия на них в процессе уплотнения.

В целом результаты сопоставления указанных отношений позволяют предварительно сделать вывод о возможности изучения работы внутренних стеновых панелей на геометрически подобных моделях без проведения аналогичного трудоемкого эксперимента на опытных элементах (фрагментах) в натуральную величину. Дополнительным обоснованием этого вывода послужили результаты статистического анализа прочностных характеристик опытных моделей и фрагментов, полученных по испытаниям сопутствующих образцов.

Опытные модели и фрагменты и, соответственно, сопутствующие образцы были изготовлены в различных – лабораторных и производственных – условиях из бетонов одинаковых составов разных замесов. Это послужило причиной разброса значений прочностей указанных опытных элементов одинаковых составов.

Для проверки равенства (однородности) средних значений прочностей сопутствующих образцов моделей и фрагментов был использован критерий равенства средних двух совокупностей.

Результаты соответствующих расчетов свидетельствуют об однородности средних значений кубиковых прочностей моделей и фрагментов одинаковых составов: указанные значения прочностей принадлежат к одной генеральной совокупности. Это позволяет сделать дополнительный вывод о стабильности оптимальных составов керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем, принятых для изготовления опытных моделей и фрагментов.

Выводы

1. Работу внутренних стеновых панелей можно изучать на геометрически подобных моделях без проведения аналогичного трудоемкого эксперимента на опытных элементах (фрагментах) в натуральную величину.

2. Помимо общеизвестного влияния прочности бетона на его предельные деформации также влияет консистенция смеси, с увеличением которой предельная сжимаемость пластифицированного керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем увеличивается.

3. Максимальные величины продольных деформаций, полученные по результатам испытания опытных фрагментов, зависят от класса керамзитоперлитобетона и исходной подвижности смеси.

4. Для установления фактических показателей несущей способности и трещиностойкости внутренних стеновых панелей кассетного способа производства, с достаточной точностью и надежностью можно использовать результаты испытаний геометрически подобных моделей внутренних стен, изготовленных по принципу простого подобия оригиналу.

5. Опытные фрагменты внутренних стеновых панелей удовлетворяют нормативным требованиям по несущей способности, трещиностойкости и деформативности.

6. Для оптимизации составов керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем рекомендуется использовать разработанную методику комплексного подхода, которая позволяет получить экономические по стоимости составы.

Литература

1. *Керамзитобетонные конструкции на малоцементном известосодержащем вяжущем [Текст] / [С.А. Кравченко, К. Мади, И.А. Столевич и др.] // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Науково-технічний збірник. – Рівне, 2006. – Вип. 14. – С. 68 - 74.*

2. *Конструкції будинків і споруд. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантаженням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості: ДСТУ Б В.2.6-7-95. -- Замість ГОСТ 88-2985. - [Чинний від 1995-11-16]. [Текст] - К.: Держкоммістобудування України, 1997.- 23 с. - (Національні стандарти України).*

3. *Бетонные и железобетонные конструкции [Текст] / СНиП 2-03.01-84*. - Госстрой СССР – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 79 с. (Государственный стандарт).*

4. *Смирнов А.Е. Панельные внутренние стены из конструктивного керамзитобетона с малой концентрацией керамзита. В сб.: Легкобетонное домостроение. [Текст] ЦНИИЭП жилища, М., 1983, 85с.*

5. *Испытание сборных железобетонных конструкций. [Текст] /Комар А.Г., Дубровин Е.Н. и др., М., Высшая школа, 1980, 269с.*

6. *Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний [Текст] / Справочник. – М.: «Машиностроение», 1985. – 231 с.*

7. *Вилков К.И. Конструкционный керамзитобетон при обычных и сложных деформациях. [Текст] – М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.*

© С.А. Кравченко, А.І. Костюк, О.О. Постернак, І.А. Столевич

УДК 691.327.32:666.973.2

С.А. Кравченко, к. т. н., доцент

А.І. Костюк, к.т.н., професор

О.О. Постернак, к. т. н., доцент

І.А. Столевич, к. т. н., доцент

Одеська державна академія будівництва і архітектури

**ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ МОДЕЛЕЙ І
ФРАГМЕНТІВ ВНУТРІШНІХ СТІНОВИХ ПАНЕЛЕЙ З
КЕРАМЗИТОПЕРЛИТОБЕТОНУ НА БАГАТОКОМПОНЕНТНОМУ
В'ЯЖУЧОМУ**

Наведені експериментальні данні та їх аналіз по оцінці несучої здатності та деформативності моделей та фрагментів внутрішніх стінових панелей з керамзитоперлітобетону.

Ключові слова: *керамзитоперлітобетон, міцність, деформативність.*

UDK 691.327.32:666.973.2

S.A. Kravchenko, Ph.D.

A.I. Kostuk, Ph.D.

A.A. Posternak, Ph.D.

I.A. Stolevic, Ph.D.

Odessa state academy of building and architecture

**ESTIMATION OF BEARING STRENGTH AND DEFORMABILITY OF
MODELS AND FRAGMENTS OF INTERNAL WALL PANELS FROM
LIGHT WEIGHT CONCRETE ON MULTICOMPONENT KNITTING**

Experimental data over and their analysis is brought as evaluated by bearing strength, and deformability of models and fragments of internal wall panels from light weight concrete.

Keywords: *light weight concrete, durability, deformability*

СТВОРЕННЯ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ВАЛУ ТА ВИРІШЕННЯ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

Приведені методика та результати моделювання напружено-деформованого стану валу поворотного механізму методом кінцевих елементів за допомогою програмного комплексу FEMAP 10.2.0.

Ключові слова: кінцево-елементний аналіз, напружено-деформований стан, втомне руйнування.

Вступ.

Найбільш розповсюдженою причиною виходу з ладу деталей машин є втомне руйнування, що нерідко призводить до тяжких наслідків, оскільки виникає раптово [1-3]. Одним з конструктивних елементів різних механізмів та машин, що працюють в умовах змінних навантажень та виходять з ладу внаслідок втомного руйнування, є вали. В даному випадку як об'єкт дослідження розглядається вал поворотного механізму.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.

Кінцево-елементний аналіз успішно застосовується для чисельного моделювання задач теплопровідності та напружено-деформованого стану твердих тіл. В роботі [4] представлено результати розрахунків, за допомогою пакету ANSYS, напружень та деформацій чашки, що є конструктивним елементом центрифуги. В [5] запропоновано алгоритм створення тривимірної кінцево-елементної моделі з метою проведення розрахунків дисків газотурбінних двигунів для середовища HyperMesh. Аналіз цих та інших [6, 7] робіт дозволив зробити висновок про доцільність використання методу кінцевих елементів (КЕ) для аналізу напружено-деформованого стану досліджуваного валу.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.

Режими експлуатації поворотного механізму, складовим елементом якого є досліджуваний вал, передбачають різку зміну величини та напрямку навантаження на вихідній шестерні, що призводить до утворення тріщин та подальшого втомного руйнування валу в місці з'єднання валу з шестернею через шпонку. Отже, вал постійно перебуває у складному напружено-деформованому стані, визначення якого є складною задачею

Постановка завдання.

Метою даного дослідження є визначення напружено-деформованого стану деталі на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, шляхом створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану, з метою чисельного розрахунку напружень та деформацій, що виникають при експлуатації валу в поворотному механізмі. Це дозволить в подальших дослідженнях визначити границю витривалості та прогнозувати термін експлуатації механізму.

Основний матеріал і результати.

Для чисельного моделювання валу поворотного механізму обрано програмний комплекс FEMAP 10.2.0 фірми Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. для операційної системи Windows NT (2000, SP3; XP, SP2; Vista; Seven), що має дві складові: універсальний пре- та постпроцесор FEMAP 10.2.0, а також аналізатор NX Nastran 7.1 [4].

Інструменти FEMAP дозволяють проводити геометричне та кінцево-елементне моделювання конструкцій, задавати початкові та граничні умови навантаження, тобто створювати крайові задачі (препроцесор) для їх подальшого кінцево-елементного розрахунку з застосуванням NX Nastran (процесор) з подальшим переглядом та фіксацією результатів в середовищі FEMAP (постпроцесор).

Початковим етапом проведення розрахунків елемента конструкції є аналіз геометрії тіла, умов його навантаження, властивостей матеріалу та створення розрахункової моделі. Розрахункова модель – це певне наближення до реального тіла із реального матеріалу з реальними умовами експлуатації. Вона дозволяє здійснити чисельний розрахунок тіла. Тобто це також геометрія, матеріал, початкові та граничні умови, але адаптовані до розрахунків.

Отже, об'єкт дослідження, вал, є тілом обертуту з довжиною 206,5 мм, найбільшим діаметром 77 мм, наскрізним осьовим отвором діаметром 20 мм та виготовлений зі сталі 40X ГОСТ 4543-71.

Для створення геометричної моделі валу в площині XZ, у відповідності з кресленням деталі, створено профіль у вигляді замкнутого контуру за допомогою команд головного меню «Geometry». Для подальшого створення «твердого» тіла на основі даного профілю командою «Geometry→ Boundary Surface→ From Curves...» побудовано відповідну поверхню. Операцією обертання поверхні, що реалізується командою «Geometry→ Solid→ Revolve...», створено твердотільну модель (Solid) валу. При цьому в діалоговій панелі «Vector Locate – Enter Axis of Revolution» вказувався вектор обертання, а після натискання кнопки «ОК» в діалоговій панелі «Revolve Option» в секції «Length» зазначався кут обертуту («Full 360»), за допомогою кнопки «Surface» вибралася створена раніше поверхня. Для створення пазів на поверхні валу робоча площина суміщалася з дотичною відповідного ступеня валу (команда «Tools→Workplane...»), де створювався відповідний профіль пазу та поверхня (команда «Geometry→ Boundary Surface→ From Curves...»), що йому відповідає. Після вибору команди «Geometry→ Solid→ Extrude...» в діалоговій панелі «Extrude Option» вибиралися відповідні поверхні (кнопка «Surface»), в секції «Material» вказувалося, що з матеріалу «твердого» тіла буде видалено матеріал («Remove-Hole»), в секції «Direction» – напрямком, а в секції «Length» – довжина видавлювання («To Depth»). Таким чином, була отримана геометрична модель досліджуваного валу (рис. 1).

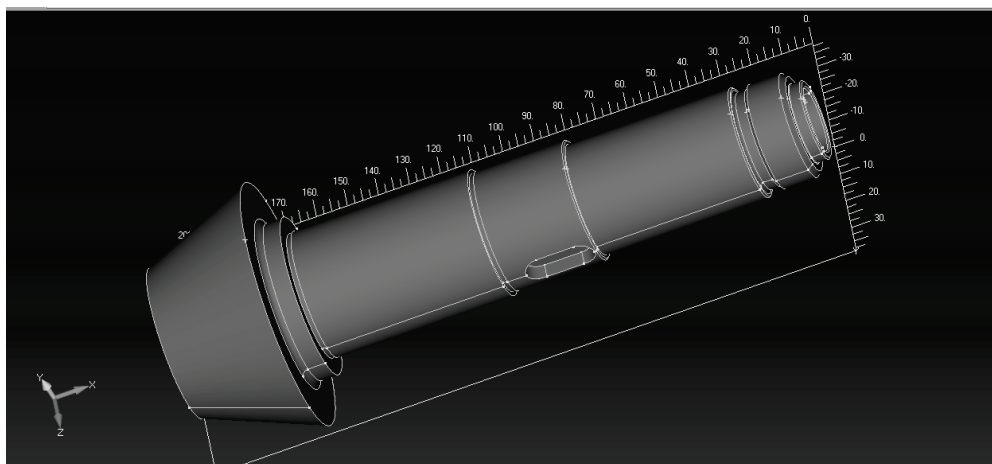


Рис. 1. Геометрична модель валу.

Наступним виконувалося завдання властивостей матеріалу (сталь 40X) та атрибутів кінцевих елементів. Для введення нового матеріалу в діалоговій панелі «Define Material – Isotropic», що викликається командою «Model→ Material...», вказувалося назва матеріалу та необхідні для рішення крайової задачі значення фізико-механічних властивостей матеріалу (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, густина матеріалу). Командою «Model→

Property...» ініціювалася діалогова панель «Define Property», де кнопкою «Elem/Property Type...» викликала відповідна панель, в якій було обрано тип кінцевих елементів «Solid» в секції «Volume Elements» та встановлено опцію «Parabolic Elements», з метою призначення в КЕ другого порядку апроксимації майбутнього рішення, при цьому підвищується точність, але і час рішення також. Для створення тетрагональної трьохвимірної кінцево-елементної сітки на основі створеного «твердого» тіла застосовувалася команда «Mesh→ Geometry→ Solids...». Вона викликає діалогову панель «Automesh Solids», в якій було обрано раніше створені властивості КЕ, встановлено опцію «Midside Nodes», що створює проміжні вузли КЕ для апроксимації геометрії тіла. Це дозволяє майже точно апроксимувати криволінійні поверхні, що забезпечує більш точне вирішення задачі, але призводить до значного збільшення необхідної дискової та оперативної пам'яті та часу вирішення задачі. Після натискання кнопки «ОК» виконувалася генерація КЕС, результат представлено на рис. 2.

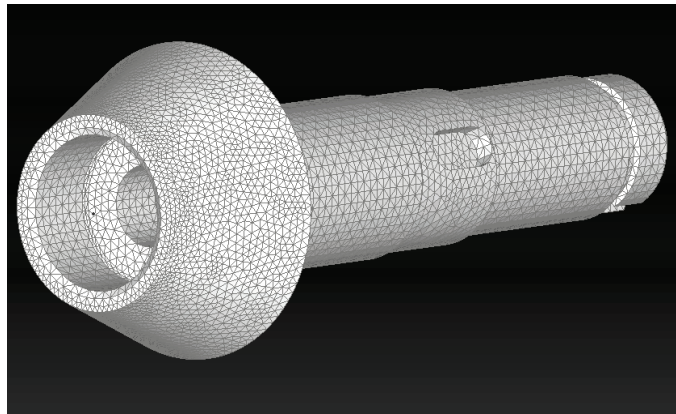


Рис. 2. Кінцево-елементна модель валу.

Далі необхідно задати граничні умови, що моделюють закріплення валу в поворотному механізмі (граничні умови 1-го роду). Команда «Model→ Constraint→ On Surface...» викликає стандартну діалогову панель вибору об'єктів «Entity Selection – Enter Surface(s) to Select». Вибравши опорну поверхню шпонкового пазу в діалоговій панелі «Create Constraints on Geometry» в секції «Advanced Types», було встановлено перемикач «TY», що забороняє переміщення відносно осі OY. З метою моделювання встановлення валу на шарикопідшипники для відповідних поверхонь в секції «Advanced Types» з варіантного списку обрано «1..Basic Cylindrical» (циліндрична система координат) та встановлено перемикач «TR», що забороняє зміну радіусу. Для завершення моделювання граничних умов 1-го роду необхідно визначити положення деталі відносно осі OZ. З цією метою командою «Model→ Constraint→ On Point...» було ініційовано діалогову панель «Entity Selection – Enter Point(s) to Select» та обрано точку на опорній поверхні шпонкового пазу. В діалоговій панелі «Create Constraints on Geometry» в секції «Advanced Types», було встановлено перемикач «TZ», що забороняє переміщення відносно осі OZ. Закріплення на моделі відображаються у вигляді блакитних трикутників, цифра біля яких означає обмежену ступінь свободи (рис. 3). Момент, що діє на конічну поверхню вала (граничні умови 2-го роду) було змодельовано за допомогою пари сил, що прикладаються до двох кривих. Команда «Model→ Load→ On Curve...» викликає діалогову панель для вибору об'єктів «Entity Selection – Enter Curve(s) to Select». Після вибору першої кривої в діалоговій панелі «Create Load on Curve» в секції «Load» обрано перемикач «FX» та задано значення навантаження 1000 Н. Для другої поверхні все виконувалося аналогічно, лише значення навантаження вводилося зі знаком мінус. Навантаження на моделі представляються у вигляді стрілочок за напрямком навантаження та його числовим значенням (рис. 3)

На даному етапі модель готова до виконання розрахунку. Команда «File→Analysis...» викликає діалогову панель «Export Method», після натискання кнопки «Create/Edit Set» було створено новий аналіз та кнопкою «Done» ініційовано процес виконання розрахунку.

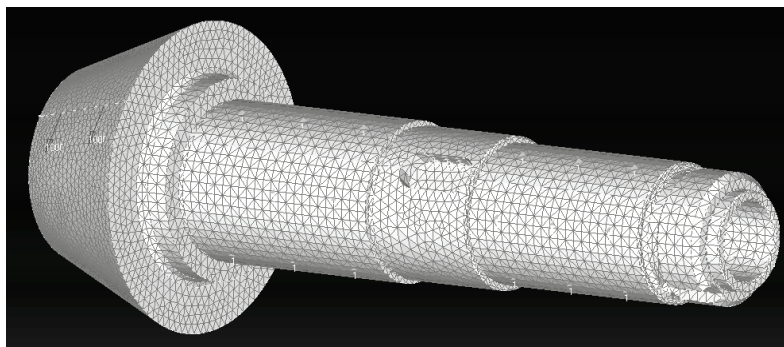


Рис. 3. Кінцево-елементна модель валу з граничними умовами.

Для відображення напружено-деформованого стану валу командою «View→ Select» викликано відповідну діалогову панель «View Select», де в секції «Model Style» обрано опцію «Draw Model», в секції «Deformed Style» – «Deform», в секції «Contour Style» – «Beam Diagram». Кнопка «Deformed and Contour Data...» ініціює діалогову панель «Select PostProcessing Data», де в секції «Output Vectors» зі списку було обрано рядок «1..Total Translation», що відповідає сумарним векторними переміщенням, а в секції «Contour» – «60031..Solid Von Mises Stress», що відповідає еквівалентним напруженням по гіпотезі енергії формозміни (Мізеса) для об'ємних КЕ. Після натискання кнопки «ОК» кінцево-елементна модель представляється в деформованому стані (рис. 4).

В правій частині графічного інтерфейсу програми представлена кольорова діаграма, що відображає значення еквівалентних напружень за гіпотезою Мізеса для об'ємних КЕ.

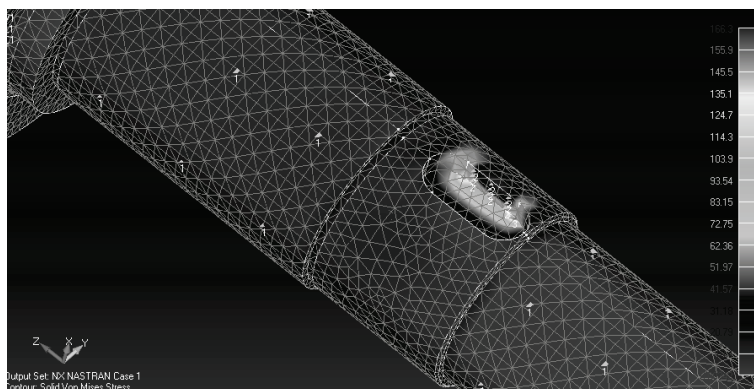


Рис. 4. Зображення деформованого стану валу.

Програма також дозволяє переглядати текстову інформацію про результати виконання аналізу. З цією метою виконувалася команда «List→ Output→ Unformatted...». В діалоговій панелі «Entity Selection – Select Output Set(s) to List» вибирали всі елементи, а в діалоговій панелі «List Unformatted Output» вибирали рядок «1..Total Translation» для отримання інформації про сумарні векторні переміщення, а в для перегляду інформації про еквівалентні напруження по гіпотезі Мізеса – «60031..Solid Von Mises Stress». Знизу від робочої площини в інформаційній панелі «Messages» представляється список з номерами КЕ та значеннями відповідних величин.

Висновки. Таким чином, результати моделювання дозволяють визначити місце локалізації та значення напружень і деформацій, що виникають в процесі експлуатації валу поворотного механізму.

Література

1. Драпкин Б.М. Свойства сплавов в экстремальном состоянии / Б.М. Драпкин, В.К. Кононенко, В.Ф. Безьязычный. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.: ил.
2. Саргсян А.Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов. – Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 286 с.: ил.
3. Березин И.Я. Сопротивление материалов. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях: учебное пособие / И.Я. Березин, О.Ф. Чернявский; под общей редакцией О.Ф. Чернявского. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 47с.
4. Лавренко Я.І. До питання визначення ресурсу конструктивних елементів при змінних навантаженнях./ Я.І. Лавренко // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування. – 2009. – №56. – С. 88–92.
5. Рудаков К.Н. Разработка методики расчетов дисков газотурбинных двигателей методом конечных элементов в трехмерной постановке / К.Н. Рудаков, Шакиб Хамед// Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування. – 2008. – 53. – С. 88–94.
6. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций / К.Н. Рудаков. – К.: НТУУ «КПИ», 2011. – 317с.
7. Рычков С.П. MSC. visualNASTRAN для Windows/ Рычков С.П. – М.: ИТ Пресс, 2004. – 552 с.

© К.С. Барандич, С.П. Вислоух

УДК 539.3

Е.С. Барандич, аспирант

С.П. Вислоух, к.т.н., доцент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ВАЛА И РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Приведены методика и результаты моделирования напряженно-деформированного состояния вала поворотного механизма методом конечных элементов с помощью программного комплекса FEMAP 10.2.0.

Ключевые слова: конечно-элементный анализ напряженно-деформированное состояние, усталостное разрушение.

UDC 539.3

C.S. Barandysh, PhD student

S.P. Vysloukh, Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

GENERATING FINITE-ELEMENT MODEL OF THE SHAFT AND SETTLEMENT BOUNDARY VALUE PROBLEM OF STRESS-STRAIN STATE

The paper presents methods and simulation results of the stress-strain state of the shaft of rotating mechanism by using finite element software system FEMAP 10.2.0.

Keywords: finite element analysis, the stress-strain state, fatigue fracture.

С.О. Білоконь, асистент

В.О. Андрієнко, старший викладач

Черкаський державний технологічний університет

В.С. Антонюк., доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

С.В. Храпатий, кандидат фізико-математичних наук, доцент

Інститут біології Київського національного університету імені Тараса Шевченка

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗОНДА АТОМНО-СИЛОВОГО МІКРОСКОПУ З ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Наведено результати аналізу руйнівних факторів електростатичної взаємодії між кремнієвим зондом та діелектричною поверхнею. Представлено експериментально-статистичну модель такої взаємодії. Встановлено, що така взаємодія зводиться до мінімуму при збільшенні вологості навколишнього середовища до $RH \leq 85\%$ або збільшенні рухливості носіїв заряду до $\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ см}^2/(\text{Вт} \cdot \text{с})$. Показано, що збільшення рухливості носіїв заряду зменшує похибки сканування, внаслідок чого точність результатів збільшується на 20...22%.

Ключові слова: атомно-силовий мікроскоп, трибоелектричний заряд, рухливість заряду, електростатична взаємодія, діелектрик.

Вступ. В останнє десятиріччя новий напрямок науки і техніки «нанотехнології» набуває все більш стрімкого розвитку. Так, науковці різних галузей від машинобудування до фармакології прагнуть до мініатюризації систем та компонентів, що ними використовуються. Це дозволяє використовувати принципово нові властивості матеріалів, які починають проявлятися на нанометричному рівні. Проте, використання нанометричних об'єктів неможливе без застосування і вдосконалення методів їх дослідження.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Найбільш популярним на сьогоднішній день є метод атомно-силової мікроскопії, що проявляється в його високій роздільній здатності, простоті використання, а також універсальності (метод має можливість досліджувати не тільки рельєф наноб'єктів, але й їх фізико-механічні властивості (мікротвердість, зносостійкість, локальні термічні властивості, електропровідність тощо) [1].

Проте, у даного методу є й недоліки, внаслідок адгезійної взаємодії між досліджуваною поверхнею і поверхнею зонда може відбуватись «затуплення» або руйнація вимірювального елемента – зонду мікроскопа, що приводить до хибності результатів сканування [2].

Окрім того, що часта заміна зонду (термін надійної експлуатації складає 40-60 хвилин) є економічно не вигідною, а у деяких випадках така процедура не є можливою через необхідність проведення довготривалої серії експериментів.

Як встановлено в роботах [3, 4], на якість сканування впливають сили пружної взаємодії та капілярні сили, а також визначені шляхи підвищення такої якості.

Постановка завдання. Метою роботи є побудова експериментально-статистичної моделі електростатичної взаємодії між кремнієвим зондом та діелектричною поверхнею внаслідок аналізу результатів дослідження руйнівних факторів цієї взаємодії.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Як відомо [5, 6], при контакті кремнієвого зонду з досліджуваним діелектричним об'єктом відбувається перерозподіл зарядів на їх поверхнях, тоді, як при відведенні зонда, нерівність розподілу зарядів зберігається (рис. 1).

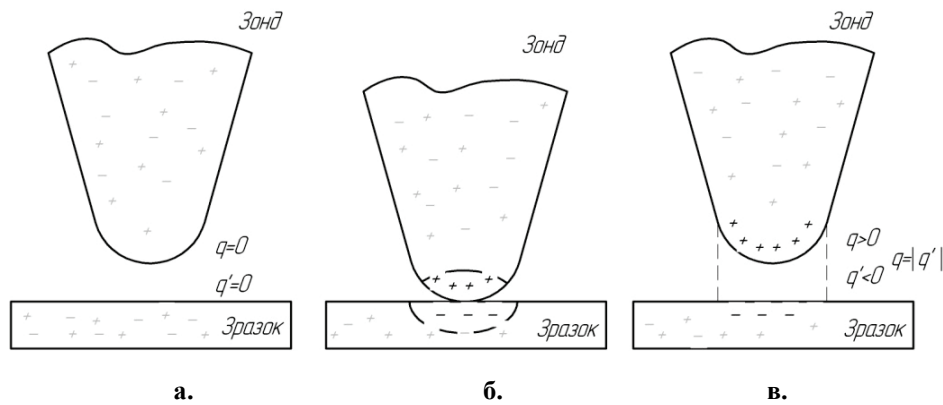


Рис.1. Схема утворення електростатичного заряду при взаємодії кремнієвого зонду з діелектричною поверхнею на різних етапах: а – підведення зонда до поверхні (зонд і поверхня електростатично нейтральні); б – контакт зонда з поверхнею (утворення зони формування вільного заряду); в – відведення зонда від поверхні (розподіл заряду по поверхні)

При кожному подальшому механічному контакті зонда з поверхнею відбувається накопичення заряду, як на зонді, так і на ділянці поверхні, яка сканується. З часом зонд накопичує критичний заряд, що приводить до спотворення результатів сканування внаслідок зсуву зонда під дією електростатичних сил, а в окремих випадках – до електростатичного пробую (рис. 2).

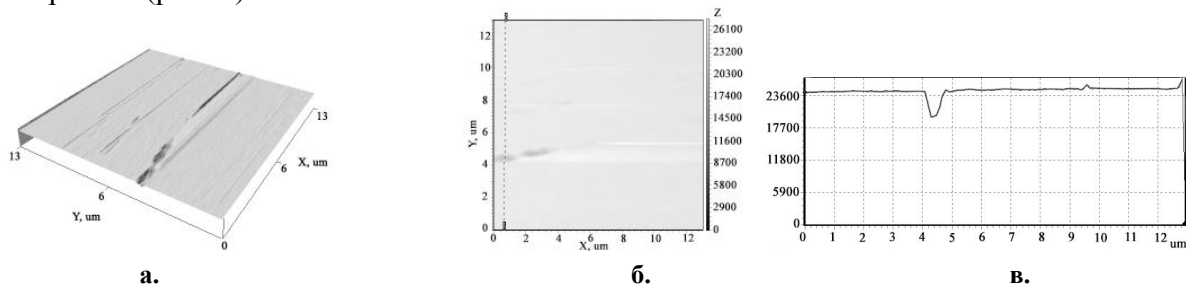


Рис.2. Поверхня діелектричного зразка (наноструктуроване покриття SiO_2 на кремнієвій підкладинці) із слідами електростатичного пробую при його скануванні кремнієвим зондом: а – тривимірне зображення рельєфу, б – топограма поверхні, в – профіль поверхні зразка з місцем електростатичного пробую

Виходячи з теорії електростатичної взаємодії діелектриків, основною величиною, що визначає обмін зарядами, є робота виходу електрона з середовища, що накопичує заряд. Конденсуючий матеріал, робота виходу у якого менша, втрачає електрони легше, а його поверхня заряджається позитивно. Відповідно, поверхня з більшою роботою виходу заряджається негативно. При цьому, чим більша різниця робіт виходу, тим сильніше заряджається границя розділу. Тертя матеріалів різної електричної природи приводить до виникнення трибоелектричного ефекту, який здійснюється за такими фізичними механізмами: перехід електронів з металу в діелектрик; заряд двох діелектриків при дифузії електронів та іонів.

Істотну роль в появі трибоелектричного заряду може грати різний ступінь нагрівання тіл при їх терті, що викликано переходом носіїв заряду з локальних неоднорідностей більш нагрітої поверхні («дійсна» трибоелектрика). Причиною трибоелектрики також може служити механічне видалення ділянок поверхні піроелектриків або п'єзоелектриків.

Аналіз літературних джерел показав, що в більшості робіт накопичення заряду на зонді не розглядається [7], а роботи, присвячені опису електризації діелектричних поверхонь при дії на них зондів АСМ не приводять якісних способів їх зменшення. Тому, в роботі розглянуто механізм такої взаємодії та приведені рекомендації для її усунення.

Постановка завдання. Задача експериментально-статистичного моделювання проводилась виходячи зі стандартної методології із застосування методу планування експери-

менту [8-9]. Для вибору оптимальних технологічних та зовнішніх чинників, що впливають на приведений термін експлуатації зондів АСМ та точність діагностування нанорельєфу поверхонь і механічних характеристик була використана методика в основі якої лежить метод планування багатофакторного експерименту.

Основний матеріал і результати. За параметр оптимізації було обрано силу електростатичної взаємодії за умови, що її значення має прагнути до нуля. Незалежними змінними (факторами оптимізації) було обрано: X_1 – вологість (RH), X_2 – тиск зонда на зразок (p), X_3 – рухливість носіїв заряду (μ), табл. 1.

Таблиця 1. Експериментальні рівні варіювання

Фактори оптимізації	Кодоване значення факторів	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
			верхній	основний	нижній
Вологість, RH, %	X_1	50	100	50	0
Тиск зонда на зразок, p, ГПа	X_2	19,5	39	19,5	0
Рухливість носіїв заряду, μ , м ² /В·с	X_3	0,0705	0,14	0,0705	10 ⁻³
Сила електростатичної взаємодії, $F_{ес}$, нН	Y	6000,125	12000	6000,125	0,25

При цьому враховувалися фізична незалежність вхідних та вихідних параметрів, нормальність розподілу ймовірних вимірів, стійкість експерименту до перешкод, порядок виконання вимірів не порушуючи ортогональність планування.

В даній роботі використовувався план трьохфакторного експерименту. Використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для трьох факторів оптимізації:

$$C_m \cong b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2,$$

де x – безрозмірна змінна ($x_i = \frac{X_i - X_i^{(0)}}{\Delta X_i}$); b – коефіцієнт регресії.

Для виключення систематичної похибки досліди рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел. На основному рівні проведено чотири паралельних експерименти, на основі яких встановлено дисперсію досліду при двох ступенях свободи та 5%-вому рівні значущості $S_c^2 = 18936,54$.

За даними експерименту розраховано коефіцієнти регресії представлені в таблиці 2:

Таблиця 2. Коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі)

$b_0 = 2168,31$	$b_{11} = 351,39$	$b_{22} = 594,76$	$b_{33} = 87,11$
$b_1 = -1290,98$	$b_{12} = -1273,04$	$b_{23} = -2789,95$	
$b_2 = 2937,28$	$b_{13} = 942,08$		
$b_3 = -2479,99$			

За цими даними, табличне значення t-критерію при 15 дослідах та рівні значимості 0,05 складає 4,3. Довірчі інтервали при розрахунку коефіцієнтів регресії: $b_0 = 341,63$; $b_i = 209,21$; $b_{ii} = 307,94$; $b_{ij} = 295,86$.

Отримана модель залежності сили електростатичної взаємодії від трьох визначених факторів має вигляд:

$$F_{кап} = 2168,31 - 1290,98 \cdot RH + 2937,28 \cdot p - 2479,99 \cdot \mu - 1273,04 \cdot RH \cdot p - 2789,95 \cdot p \cdot \mu + 942,08 \cdot RH \cdot \mu + 351,39 \cdot RH^2 + 594,76 \cdot p^2 + 87,11 \cdot \mu^2$$

В результаті дослідження роботи отриманої моделі були встановлені залежності сили електростатичної взаємодії F_{ec} від тиску зонда на зразок p та рухливості носіїв заряду μ (рис. 3) для граничних значень вологості оточуючого середовища.

Як можна побачити із цих залежностей, із збільшенням вологості оточуючого середовища до 100%, зменшення тиску зонда на зразок до 0 Па (зонд не торкається поверхні при динамічному скануванні) та збільшенням рухливості носіїв заряду до $0,14 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, сила електростатичної взаємодії між зондом і поверхнею досягає мінімальних значень $F_{ec} \leq 1 \cdot 10^{-12} \text{ Н}$, що усуває руйнування поверхні зонда та досліджуваної поверхні.

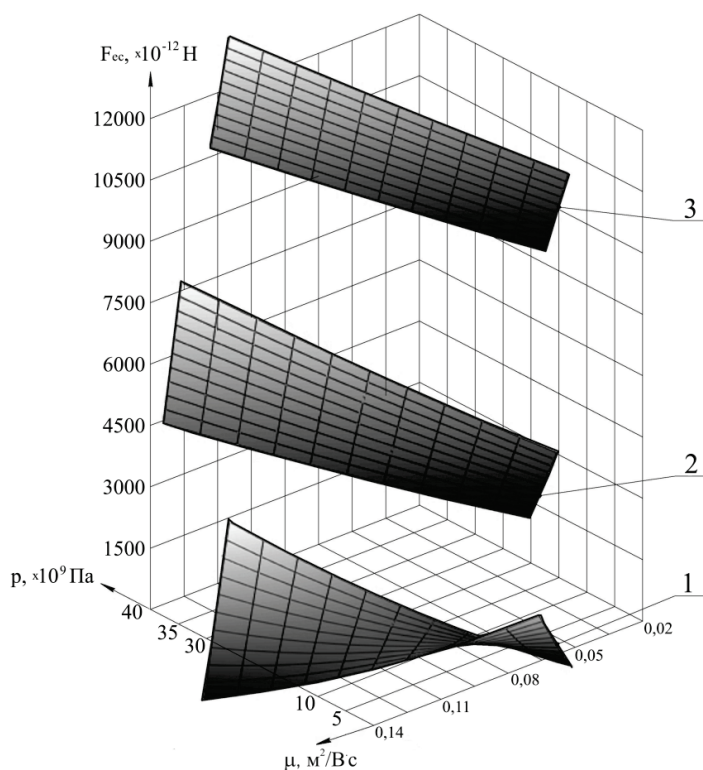


Рис.3. Залежність сили електростатичної взаємодії F_{ec} від тиску зонда на зразок p та рухливості носіїв заряду μ для граничних значень вологості оточуючого середовища: 1 - $RH = 100\%$; 2 - $RH = 50\%$; 3 - $RH = 0\%$

Таким чином, встановлено чинники, які найбільшим чином впливають на мінімізацію сил електростатичної взаємодії, а саме: вологість оточуючого середовища ($RH \leq 85\%$) та рухливість носіїв заряду μ . Проте збільшення вологості оточуючого середовища зменшує точність й достовірність результатів сканування, що пов'язано з підвищення ступеня впливу капілярних сил. Тому переважним чинником оптимізації залишається рухливість носіїв заряду ($\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$)

Висновки. При скануванні кремнієвим зондом діелектричної поверхні, на зонді АСМ можливе накопичення трибоелектричного заряду, що необхідно враховувати при обробці результатів сканування.

Встановлено, що чинники, які мають найбільший вплив на мінімізацію сил електростатичної взаємодії є вологість оточуючого середовища ($RH \leq 85\%$) та рухливість носіїв заряду μ . Проте збільшення вологості оточуючого середовища зменшує точність й достовірність результатів сканування, тому переважним чинником оптимізації залишається рухливість носіїв заряду.

Збільшення рухливості носіїв заряду до $\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ зменшує похибки сканування, пов'язані з накопиченням залишкового трибоелектричного заряду на поверхнях діелектриків збільшується на $20 \dots 22\%$.

Література

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. / В.Л. Миронов // Российская академия наук. Институт физики микроструктур г. Нижний Новгород, 2004 г. - 110 с.
2. Толстихина А.Л. Артефакты при АСМ-измерениях в воздушной среде: их источники и способы устранения / А.Л.Толстихина // Сборник докладов IX Международной конференции «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», г.Минск, 12-15 октября 2010 г. – С. 46 – 49.
3. Билоконь С.А. Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии / С.А. Билоконь, М.А. Бондаренко, В.С. Антонюк. – Наноинженерия. – 2012. - №6 (12). – С. 41-45.
4. Билоконь С.А. Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии / С.А. Билоконь, О.В. Свиридова, В.С. Антонюк, М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, И.А. Рева – Наноинженерия. – 2013. - №1 (19). - С. 10-13.
5. Рехвиашвили С.Ш. Проводящие кронштейны для атомно-силового микроскопа / С.Ш. Рехвиашвили // Физика и химия перспективных материалов. Сборник научных трудов. Начальник: КГБУ. – 1998. – С. 103-107.
6. Bharat Bhushan. Handbook of Nanotechnology. / Bharat Bhushan. – New York. Springer, 2004. – 1258 p.
7. Лысова О.А. Атомно-силовая микроскопия сегнетоэлектрических микро- и нанодоменных структур : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ольга Александровна Лысова. – Москва, 2011.
8. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: монографія / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 488 с.
9. Душинський В.В. Основи наукових досліджень. Теорія та практикум з програмним забезпеченням / В.В. Душинський. – К.: НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.

©С.О. Білоконь, В.О. Андрієнко, В.С. Антонюк., С.В. Храпатий

УДК 519.252:537.24

С.А. Билоконь, асистент

В.А. Андрієнко, старший преподаватель

Черкасский государственный технологический университет

В.С. Антонюк., доктор технических наук, профессор

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

С.В. Храпатый, кандидат физико-математических наук, доцент

Институт биологии Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗОНДА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Приведены результаты анализа разрушительных факторов электростатического взаимодействия между кремниевым зондом и диэлектрической поверхностью. Представлена экспериментально-статистическая модель такого взаимодействия. Установлено, что такое взаимодействие сводится к минимуму при увеличении влажности окружающей среды до $RH \leq 85\%$ или увеличении подвижности носителей заряда до $\mu = 0,12...0,14 \text{ см}^2/(\text{Вт} \cdot \text{с})$. Показано, что увеличение подвижности носителей заряда уменьшает погрешности сканирования, в результате чего точность результатов увеличивается на 20...22%.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, трибоэлектрический заряд, подвижность заряда, электростатическое взаимодействие, диэлектрик.

S.A. Bilokon, graduate student

V.A. Andrienko, senior teacher

Cherkasy state technological university

V.S. Antonyuk., doctor of engineering sciences, professor

National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute»

S.V. Khrapaty, candidate of physics and mathematical sciences, associate professor

Institute of biology of the Kyiv national university of the name of Taras Shevchenko

DESIGN OF ELECTROSTATIC CO-OPERATION OF PROBE OF ATOMIC-FORCE MICROSCOPE WITH DIELECTRIC SURFACE

Results over of analysis of destructive factors of electrostatic co-operation between a silicic probe and dielectric surface were brought. An experimentally-statistical model over is brought such co-operation. Co-operation is taken to the minimum at the increase of humidity of environment to $RH \leq 85\%$ or increase of mobility of carriers of charge to $\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ cm}^2/(\text{Bm} \cdot \text{c})$. The increase of mobility of carriers of charge diminishes the errors of scan-out. As a result of it exactness of results increases on 20...22%.

Keywords: *atomic-force microscope, tribology electricity, mobility of charge, electrostatic co-operation, dielectric.*

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В СОВРЕМЕННОМ ВАГОНОСТРОЕНИИ

Проведен анализ системы неразрушающего контроля. Рассмотрены акустические, радиационные, магнитные, капиллярные и вихретоковые неразрушающие методы контроля. Раскрыта физическая сущность различных методов НК.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, дефектоскопия, подвижный состав.

Вступление. Железнодорожный транспорт составляет основу транспортной системы стран СНГ. Ежегодно железнодорожная отрасль Украины обеспечивает перевозку более 300 млн. т. груза и около 500 млн. пассажиров.

Постановка проблемы. Актуальной задачей сегодня является поддержание на высоком уровне технического состояния средств эксплуатируемой железнодорожной техники, а также создание новых единиц подвижного состава с повышенными требованиями к качеству и надежности.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Неразрушающий контроль (НК) – это метод контроля, при котором не нарушается пригодность объекта к применению. Значение НК при изготовлении современного подвижного состава железных дорог (ПСЖД) переоценить трудно, так как методы и средства НК позволяют проводить тотальный контроль качества ответственных деталей и узлов подвижного состава [1-4].

Формулировка цели. Целью настоящей работы является проведение анализа системы неразрушающего контроля.

Изложение основного материала. По виду контролируемых параметров элементов и систем основные методы НК подразделяется на:

- НК геометрических размеров объекта;
- НК структуры и физико-механических свойств материалов и изделий;
- НК объектов на отсутствие нарушений сплошности (дефектоскопия).

Классификация методов НК которые используются для контроля элементов и систем по виду применяемых физических явлений представлена в табл. 1.

Таблица 1. Классификация методов НК по виду применяемых физических явлений

Метод НК	Сущность метода
Акустический НК [2, 3]	Метод основан на применении упругих колебаний и волн, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте. При проведении контроля в ультразвуковом диапазоне частот акустических колебаний, контроль называют ультразвуковым
Радиационный НК [4]	Метод основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом
Магнитный НК [5]	Метод основан на использовании магнитных свойств контролируемого объекта
Вихретоковый НК [6]	Метод основан на анализе внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля
Капиллярный НК [7]	Метод основан на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объекта контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя

Из представленных в табл. 1. методов НК капиллярный метод контроля предназначен для выявления поверхностных нарушений сплошности; вихрековый и магнитный – поверхностных и расположенных на небольшой глубине (подповерхностных) нарушений сплошности; ультразвуковой и радиационный – внутренних, поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности.

Акустические методы контроля среди других методов НК занимают очень важное место и весьма интенсивно развиваются в настоящее время. Известно много акустических методов неразрушающего контроля, некоторые из которых применяются в нескольких вариантах.

Акустические методы делят на две большие группы: использующие излучение и прием акустических колебаний и волн (активные методы) и основанные только на приеме колебаний и волн (пассивные методы).

Активные методы делят на методы прохождения, отражения, комбинированные (использующие как прохождение, так и отражение), импедансные и методы собственных частот.

Методы прохождения используют излучающие и приемные преобразователи, расположенные по разные стороны или по одну стороны контролируемого изделия. Применяют импульсное или (реже) непрерывное излучение и анализируют сигнал, прошедший через контролируемый объект.

В методах отражения используют как один, так и два преобразователя; применяют импульсное излучение.

В комбинированных методах используют принципы, как прохождения, так и отражения акустических волн.

Различают интегральные и локальные методы. В интегральных методах анализируют собственные частоты изделия, колеблющегося как единое целое, в локальных – колебание отдельных его участков.

Импедансные методы используют зависимость импедансов изделий при их упругих колебаниях от параметров этих изделий и наличия в них несплошностей.

Пассивные акустические методы основаны на анализе упругих колебаний волн, возникающих в самом контролируемом объекте.

При дефектоскопии элементов и систем наибольшее распространение получил ультразвуковой импульсный эхо-метод, который относится в активным акустическим методам отражения. Ультразвуковой импульсный эхо-метод основан на регистрации эхосигналов отраженных от несплошности в объекте контроля.

Ультразвуковым импульсным эхо-методом контролируются такие детали и узлы ПСЖД, как: оси, колеса, колесные центры, бандажи колесных пар, ведущие и ведомые зубчатые колеса тягового редуктора, сварные соединения экипажной части локомотива и др.

Радиационные методы НК получили широкое применение при выявлении внутренних несплошностей металла. Радиационными методами хорошо выявляются такие дефекты металлов и сварных швов как поры, раковины, непровары, шлаковые включения и др., имеющие объемный характер. Это обусловило преимущественное применение этих методов для контроля литья и сварных соединений.

При радиационном контроле применяют такие виды проникающего ионизирующего излучения, как: рентгеновское излучение (источники: рентгеновские аппараты, ускорители, радионуклидные источники β -излучения с мишенью), гамма-излучение (радионуклидные источники излучения), нейтронное излучение (источники: ускорители нейтронов, радионуклидные источники излучения).

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации и, соответственно, делятся на радиографические, радиоскопические и радиометрические.

Радиографические методы радиационного НК основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающее устройство с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее распространен в связи с его простотой и документальным подтверждением получаемых результатов.

Радиоскопический контроль (радиационная интроскопия) – метод радиационного НК, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического видения несплошностей и рассмотрение изделий под разными углами, «экспрессность» и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия – метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества).

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применяемой аппаратуры.

Магнитные методы НК применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля.

Операция намагничивания (помещения объекта контроля в магнитное поле) при этом виде контроля является обязательной. Съем информации может быть осуществлен с полного сечения образца (изделия) либо с ее поверхности.

В зависимости от конкретных задач неразрушающего контроля, марки контролируемого материала, требуемой производительности метода могут использоваться различные информативные параметры. К числу наиболее распространенных относятся следующие информативные параметры: коэрцитивная сила, намагниченность, индукция (остаточная индукция), магнитная проницаемость, напряженность магнитного поля, эффект Баркгаузена.

По способу получения первичной информации различают следующие методы магнитного вида неразрушающего контроля: магнитопорошковый метод; магнитографический метод; феррозондовый метод; метод, основанный на эффекте Холла; индукционный метод; пондеромоторный метод; магниторезисторный метод. С помощью этих методов можно осуществлять контроль сплошности изделий, контроль структуры и физико-механических свойств, контроль геометрических размеров.

Из выше перечисленных методов только магнитопорошковый требует обязательного участия в контрольных операциях человека, остальные методы позволяют получать первичную информацию в виде электрических сигналов, что делает возможным полную автоматизацию процесса контроля. Магнитопорошковый и магнитографический методы являются контактными, т.е. требуют соприкосновения преобразователя (магнитный порошок или магнитная лента) с поверхностью объекта контроля, при осуществлении контроля остальными методами съем информации осуществляется бесконтактно (хотя и на достаточно близких расстояниях от поверхности).

С помощью магнитных методов могут быть выявлены закалочные и шлифовочные трещины, волосовины, закаты, усталостные трещины и другие поверхностные нарушения сплошности шириной раскрытия несколько микрометров.

Наибольшее распространение для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов типа нарушений сплошности промышленной продукции получил магнитопорошко-

вый метод, несмотря на недостатки (контактность метода, обязательное участие оператора). Распространение метод получил благодаря своей надежности, сравнительной дешевизне и простоте аппаратуры, наглядности и др. Магнитопорошковый метод магнитного НК основан на использовании в качестве индикатора магнитного порошка.

При изготовлении магнитопорошковым методом для выявления поверхностных и подповерхностных несплошностей контролируются такие детали и узлы, как: оси, колеса, колесные центры, бандажи колесных пар, ведущие и ведомые зубчатые колеса тягового редуктора, сварные соединения рам-тележек, крепежные приспособления и др.

Вихретоковые методы (ВТМ) НК основаны на анализе внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного расположения измерительного *вихретокового преобразователя* (ВТП) и объекта. В качестве преобразователя используют обычно индуктивные катушки (одну или несколько). Синусоидальный (или импульсный) ток, действующий в катушках ВТП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на зажимах катушки или ее сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно его.

Особенность вихревого контроля в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта контроля. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Поэтому этими методами можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов.

Простота конструкции преобразователя – еще одно преимущество ВТМ. В большинстве случаев катушки помещают в предохранительный корпус и заливают компаундами. Благодаря этому они устойчивы к механическим и атмосферным воздействиям, могут работать в агрессивных средах в широком интервале температур и давлений. Небольшие размеры преобразователя позволяют контролировать изделия сложной формы.

Вихретоковый НК получил наибольшее распространение при контроле изделий из электропроводящих ферромагнитных материалов. При контроле изделий из ферромагнитных материалов применяют дополнительные устройства намагничивания объекта контроля, для исключения влияния изменения магнитной проницаемости в объекте контроля на наводимую ЭДС в приемной катушке ВТП.

ВТМ контролируются такие элементы, как: зона прижимного бурта бандажа колесной пары локомотива, лопатки моторвентилятора тепловоза и др.

Капиллярные методы НК предназначены для обнаружения невидимых или слабо-видимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов типа нарушения сплошности в объектах контроля, определения их расположения, протяженности (для дефектов типа трещин) и ориентации по поверхности.

Этот вид НК позволяет диагностировать объекты любых размеров и форм, изготовленных из черных и цветных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики, а также других твердых ферромагнитных материалов.

Основные капиллярные методы контроля подразделяют в зависимости от типа проникающего вещества на следующие:

метод проникающих растворов – жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора;

метод фильтрующих суспензий – жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве проникающего пенетранта ин-

дикаторной суспензии, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы.

Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на:

люминесцентный, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом ультрафиолетовом излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

контрастный (цветной), основанный на регистрации контраста цветного в видимом излучении индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

люминесцентно-цветной, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или длинноволновом ультрафиолетовом излучении;

яркостный, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности объекта контроля.

Капиллярные методы применяются при контроле таких элементов, как: крышки радиаторных секций тепловозов, ответственные элементы и системы, выполненные из цветных металлов и нержавеющей сталей и др.

Комплексное применение методов НК. Объективный анализ применения различных методов НК привел к признанию целесообразности применения комплексных систем контроля, которые используют разные по физической природе методы исследования, что, в свою очередь, позволяет исключить недостатки одного метода, взаимодополнить методы и тем самым реализовать принцип «избыточности» для повышения надежности и достоверности контроля элементов и систем ПСЖД.

Комплексное применение методов НК для диагностики и обнаружение дефектов в агрегатах и системах имеет целью повышение эффективности и достоверности контроля. Решение этой задачи состоит в оптимальном сочетании различных методов НК, применение которых наиболее эффективно при контроле различных элементов и систем ПСЖД.

Рациональное использование комплекса неразрушающих методов контроля позволяет в некоторых случаях увеличить его эффективность. При этом понятие комплексности не ограничивается только сочетанием методов НК с целью дублирования результатов контроля. Под комплексным контролем подразумевают рациональное сочетание различных неразрушающих методов, которые могут и должны обеспечивать достоверную оценку качества изделия в целом.

Выводы. В работе был проведен анализ системы НК. Рассмотрены акустические, радиационные, магнитные, капиллярные и вихретоковые неразрушающие методы контроля. Раскрыта физическая сущность различных методов НК. Показана сфера применения различных методов НК, их достоинства и недостатки. Приведены примеры элементов и систем, которые контролируются различными методами НК. Рассмотрена эффективность комплексного применения различных методов НК.

Литература

1. *Современное вагоностроение: Монография. Т 2. Неразрушающий контроль и техническая диагностика. Подготовка поверхности и окраска вагонов / [Цыган Б.Г., Цыган А.Б., Мокроусов С.Д., Щербаков В.П.] – Кременчуг: ООО «Кременчугская городская типография», 2010. – 532 с.*

2. *ГОСТ 20415-82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения. Введ. 01.07.1983г. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 4с.*

3. *ДСТУ EN 571-1-2001. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. 2.1. Загальні вимоги. Введ. 28.12.2001р. – К.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2002. – 9с.*

4. *Клюев В.В., Соснин Ф.Е. Теория и практика радиационного контроля. / М.: Машиностроение, 1997. – 170с.*

5. ГОСТ 24450-80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 4с.

6. ГОСТ 24289-80. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 14с.

7. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 17с.

© М.О. Морнева

УДК 629.4.027

М.О. Морнева, к.т.н., доцент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

АНАЛІЗ СИСТЕМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В СУЧАСНОМУ ВАГОНОБУДУВАННІ

Проведено аналіз системи неруйнівного контролю. Розглянуто акустичні, радіаційні, магнітні, капілярні і вихореструміві неруйнівні методи контролю. Розкрито фізична сутність різних методів НК.

Ключові слова: *неруйнівний контроль, дефектоскопія, рухомий склад.*

UDK 629.4.027

M.O.Morneva, Ph.D.

Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk

ANALYSIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING IN MODERN RAILCAR

The analysis of non-destructive testing. We consider acoustic-cal, radiation, magnetic, capillary, and eddy current non-destructive inspection methods. Revealed the physical nature of the various NDT methods.

Keywords: *non-destructive testing, inspection, rolling stock.*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АГРЕГАТОВ САМОЛЕТА ИЗ КОМПОЗИТОВ

Рассмотрена хронология применения композиционных материалов в конструкции самолетов семейства Ан. Проанализировано применение композитов в высоконагруженных агрегатах современных пассажирских и транспортных самолетов. Разработаны конструктивно-силовые схемы рампы и трапа из композитов. Рассмотрен процесс проектирования композитного трапа грузолюка транспортного самолета.

Ключевые слова: самолет, композит, проектирование, агрегат, фюзеляж.

Вступление. Благодаря уникальным свойствам ПКМ, которые проверены временем и эксплуатацией, сейчас существует множество как отечественных, так и зарубежных компаний, научных институтов, занимающихся разработкой новых армирующих (АМ) и связующих материалов, технологических процессов и специального оборудования для изготовления композитных деталей, последние достижения которых представлены на международных выставках и конференциях.

Обзор последних источников исследований. На сегодняшний день полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение во всех отраслях народного хозяйства, но, конечно же, особое место среди применяемых материалов они заняли в самолетостроении [1]. По сравнению с традиционными материалами ПКМ обладают преимуществами, позволяющими изготавливать детали сложной геометрической формы, уменьшить массу летательного аппарата (ЛА), тем самым увеличив его топливную эффективность, улучшить аэродинамические характеристики самолета и т.п.

В конструкции самолетов семейства Ан стекло-, угле- и боропластики начали активно применяться с 60-х годов XX века (рис. 1).

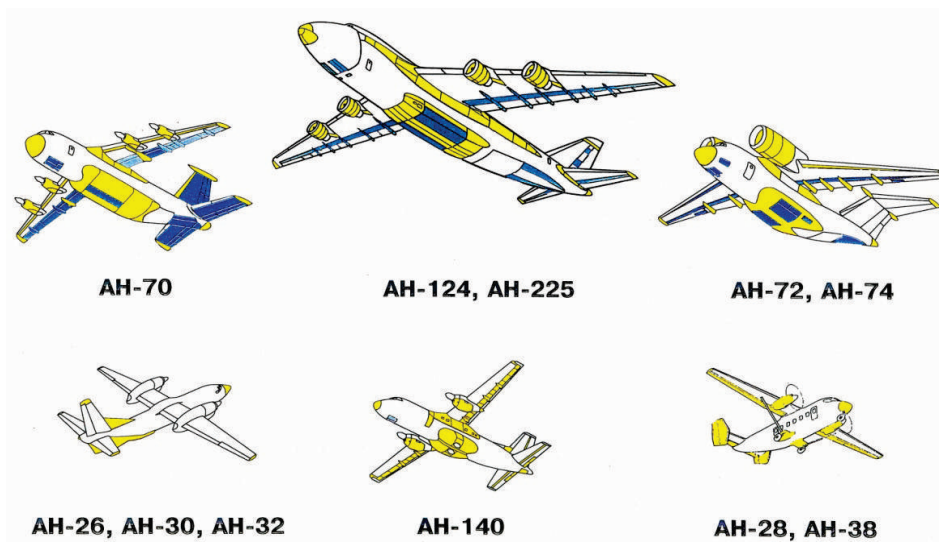


Рисунок 1 – Применение ПКМ в конструкции самолетов семейства Ан

Постепенно ПКМ прошли долгий путь освоения от простых малонагруженных до более сложных средне- и высоконагруженных конструкций. Примерами последних являются багажные полки самолетов Ан-24, комплексы деталей интерьера самолета Ан-26 и мотогондолы самолета Ан-28, обтекатель шасси, зализы крыла с фюзеляжем самолета Ан-

72, масса которого была снижена на 350 кг благодаря применению ПКМ, после чего в СССР началось серийное производство композитных деталей для пассажирских и транспортных самолетов.

При проектировании же самолета Ан-124 впервые были созданы такие крупногабаритные конструкции из ПКМ, как обтекатель радиолокационной станции (РЛС), боковые створки грузолюка, корпуса воздухозаборников диаметром 2,4 м, панели зализа, створки и панели обтекателя шасси, законцовки крыла и стабилизатора, подвижные обтекатели монорельсов закрылков (рис. 2). Применялись интегральные как монолитные, так и трехслойные конструкции [2].



Рисунок 2 – Применение ПКМ в конструкции самолета Ан-124

Опыт, полученный при проектировании самолета Ан-124, позволил применить более смелые решения в конструкции Ан-70, а именно, помимо традиционных композитных агрегатов, изготовить интегральную углепластиковую конструкцию хвостового оперения, таким образом, впервые в СНГ была создана композитная конструкция киля и стабилизатора методом автоматизированной намотки. Благодаря применению композиционных материалов масса самолета была снижена на 2250 кг.

Доля ПКМ в современных региональных пассажирских самолетах Ан-148 и Ан-158 достигает 17%. Из композитов изготовлены створки и панели обтекателя шасси, поперечные балки и панели пола, отсек вспомогательной силовой установки [3, 4], обтекатель РЛС, концевые аэродинамические поверхности (КАП) крыла (Ан-158), зализ крыла и фюзеляжа, мотогондолы двигателей, почти все агрегаты механизации крыла, панели хвостового оперения (рис. 3).

Таким образом, в течение 55 лет происходило постепенное увеличение объема ПКМ в конструкции самолетов семейства Ан.

Зарубежные фирмы, занимающиеся самолетостроением, также уделяют огромное внимание ПКМ. Следует отметить такие пассажирские самолеты, как Boeing 787 и A350 XWB фирмы Airbus, объем ПКМ в конструкции которых составляет 50% и 52% соответственно (рис. 4).

Отдавая предпочтение ПКМ, постепенно в конструкции самолета появляются все новые и новые композитные агрегаты. Например, на последнем салоне Jec Composites в Париже и в Ле Бурже была представлена композитная дверь для узкофюзеляжного самолета, которая разработана фирмой Latécoere в рамках европейского проекта Maximus, которым руководит фирма Airbus.



Рисунок 3 – Применение ПКМ в конструкции самолетов Ан-148/158



Рисунок 4 – Самолеты Boeing 787 и A350 XWB



Рисунок 5 – Пассажирская дверь, разработанная фирмой Latécoere в рамках европейской программы Maximus

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Композиты широко применяются не только в современных пассажирских, но и в транспортных самолетах, примером чего является самолет А400М фирмы Airbus. В январе 2007 года компанией European Aeronautic Defence and Space Co. (EADS) Military Air Systems Business Unit (Аугсбург, Германия) по заказу Airbus для сборки первого фюзеляжа А400М была изготовлена первая створка грузолюка – наибольшая на данный момент авиационная конструкция из КМ, изготовленная с использованием технологии вакуумной инфузии (рис. 6).

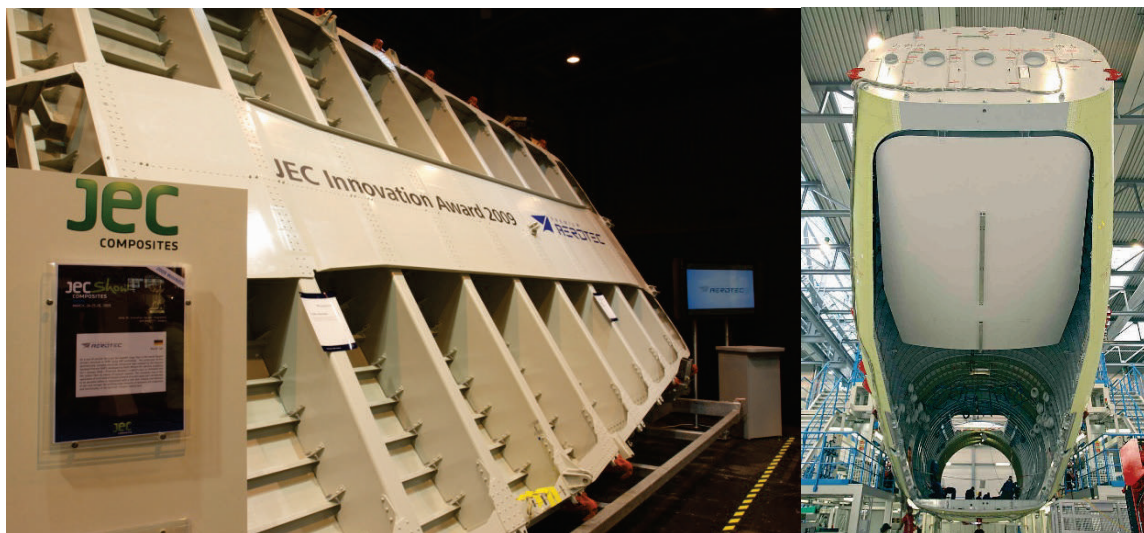


Рисунок 6 – Створка грузолюка самолета А400М была представлена на выставке JEC Composites Show в Париже, Франция

Таким образом, большая доля агрегатов самолетов как отечественных, так и транспортных фирм выполнена из композитов, но в литературе и других источниках отсутствует информация о применении ПКМ для изготовления рампы и трапов грузолюка транспортного самолета, что является следующим шагом в проектировании высоконагруженных конструкций из ПКМ, чему и посвящена данная статья.



а

б

Рисунок 8 – Элементы грузолюка:

а – самолет Ан-70, б – самолет С-130.

Важными элементами грузового люка любого транспортного самолета являются рампа и трапы (рис. 8), которые служат для погрузки, разгрузки и швартовки грузов, транспортируемых самолетом. Наличие рампы, трапов, а также погрузочно-разгрузочного оборудования, установленного на самолете, позволяет загружать и выгружать самоходную гусеничную и колёсную технику, несамоходную колёсную технику, платформы с

грузами, а также осуществлять погрузку и выгрузку поддонов различных контейнеров и других видов грузов. Техника и грузы, в зависимости от их типа и массы, размещаются на полу грузовой кабины и на рампе самолета в один или два ряда, согласно допустимыми нагрузками, определяемым для каждого самолета.

Разработка конструктивно-силовых схем (КСС) данных агрегатов достаточно подробно рассмотрена в работах [5, 6]. Остановимся на вопросе проектирования съемных трапов, являющихся элементами бортового оборудования транспортного самолета и служащих для обеспечения погрузки-выгрузки автомобилей и другой техники. К трапу предъявляются требования легкости (для обеспечения его установки обслуживающим персоналом), жесткости (чтобы прогиб не вызывал нерасчетных видов нагружения) и прочности (для достаточного эксплуатационного ресурса). Анализ рассмотренных в работе [5] КСС показывает, что для трапа рационально применить КСС, состоящую из тонкой обшивки, окантовочных и продольных балок, которые будут постоянно воспринимать нагрузку от колеса во время движения техники по обшивке агрегата.

Целевая функция проектирования трапа:

$$M \rightarrow \min, \quad (1)$$

где M – масса.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Для изготовления трапа возможно применение стекло-, угле- и органопластиков. Конечно же, углепластики обладают более высокими физико-механическими характеристиками по сравнению со стеклопластиковыми, но их стоимость достигает 900 \$ за кг, в отличие от стеклопластиков, где в среднем цена составляет около 100 грн за кг. В свою очередь использование углепластика накладывает ограничения на применение материалов кронштейнов навески и крепежа ввиду исключения возможности появления электрохимической коррозии и, как следствие, разрушения конструкции в процессе эксплуатации. Также углепластики более чувствительны к ударным повреждениям, которые сложно исключить в условиях работы трапов. **Постановка задания.** Для композитных трапов лучше использовать стеклопластики, органопластики же целесообразно применить лишь для внешнего слоя обшивки, который подвержен абразивному износу.

Основной материал и результаты. Любой расчет ведется с учетом коэффициента безопасности, который каждое предприятие, проектирующее самолеты, определяет и прописывает в своих внутренних регламентирующих документах.

В данном случае коэффициент безопасности примем равным 2, но помимо этого при проектировании композитных деталей вводятся дополнительные коэффициенты, учитывающие разброс физико-механических характеристик (ФМХ) ПКМ ($k_1=0,9$), влияние климатического воздействия ($k_2=0,9$), чувствительность материала к концентрации напряжений ($k_3=0,9$), влияние масштабных факторов (для растяжения $k_4=0,9$, для сжатия $k_5=0,8$).

Вначале по известным формулам механики сопротивления материалов определяются опорные реакции и строятся эпюры внутренних силовых факторов (осевой и поперечной силы, изгибающего момента). При этом рассматриваются несколько расчетных случаев нагружения, расчет ведется по наиболее опасному.

Расчет данного композитного трапа ведется для Урала-4320 (максимальная нагрузка на одно колесо составляет около 2500 кг). При эксплуатации возможно нахождение как одного, так и сразу двух колес автомобиля на секции трапа (габариты которого составляют 600x2000 мм). Конечно же, наиболее опасным, является случай, когда колесо находится посередине трапа (рис. 8).

Размер колеи, габаритов и профиля колеса, внутреннего давления в шинах, а также возможных вариантов размещения колес по ширине трапа влияют на количество и шаг установки его продольных балок.



Рисунок 8 – Погрузка грузового автомобиля на платформе П-7 при помощи съемных трапов, закрепляющихся на рампе

Как видно из сказанного выше, основным конструктивным элементом любого агрегата являются балки и обшивка, алгоритмы проектирования которых подробно рассмотрены в работе [7]. Параметры стенок и полок балок определяются с учетом принятых в [7, 8] допущений.

Масса композитного трапа, спроектированного согласно указанным выше требованиям, составляет около 16 кг, в то время, как его аналог, выполненный из традиционных металлических сплавов, весит около 24 кг. Конечно же, себестоимость композитного трапа выше себестоимости металлического, но точка безубыточности в случае применения композиционных материалов наступает достаточно быстро, ввиду экономии большого количества топлива при полете самолета.

Выводы. Таким образом, на сегодняшний день фирмы-самолетостроители имеют большой опыт по проектированию агрегатов самолета из ПКМ: разработано множество армирующих и связующих материалов, постоянно совершенствуются технологические процессы изготовления композитных деталей, разрабатывается и внедряется новое оборудование, наработано достаточное количество методик прочностного расчета, проверенного и скорректированного длительной эксплуатацией. Но все-таки до сих пор существуют возможные варианты дальнейшего применения ПКМ в высоконагруженных конструкциях самолета, что и было показано в данной работе на примере проектирования композитного трапа транспортного самолета.

Литература

1. Попов, Э.В. Применение полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях началось с планеров легких самолетов [Текст] / Э.В. Попов, В.С. Савинич, Я.А. Сосунов, А.Г. Шведов // Крылья Родины. – 2013. – № 11-13. – С. 24-31.
2. Петропольский, В.С. Композиты в конструкциях «Руслана» [Текст] / В.С. Петропольский // Родина. – 2012. – 1 дек. – С. 2.
3. Кива, Д. С. Конструкции из композиционных материалов в самолете Ан-148 [Текст] / Д. С. Кива, А.З. Двейрин, А.М. Баранников, В.С. Петропольский, В.И. Цариковский // Сборник статей конференции Славполикот «Композиционные материалы в промышленности». – Я., 2007. – Вып. 37. – С. 5–9.
4. Двейрин, А.З. Проектирование агрегатов фюзеляжа самолета из композитов [Текст] / А.З. Двейрин, Я.С. Карпов, В.А. Костюк, Я.О. Головченко // Технологические системы. – 2014. – № 1 (66). – С. 38-42.
5. Карпов Я.С. Общий подход к проектированию конструктивно-силовой схемы дискретно-оперных агрегатов самолетов из композитов / Я.С. Карпов, Я.О. Головченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (75). – Х., 2013. – С. 7 – 12.

6. Головченко Я.О. Выбор рациональных конструктивно-силовых схем агрегатов самолета из композитов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 63.– X., 2014. – С. 5 – 11.

7. Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник / Я.С. Карпов. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.

8. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 270 с.

© Я.О. Головченко

УДК 629.735

Я.О. Головченко, аспірант

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

ПРОЕКТУВАННЯ АГРЕГАТИВ ЛІТАКА З КОМПОЗИТИВ

Розглянута хронологія застосування композиційних матеріалів у конструкції літаків сімейства Ан. Проаналізовано застосування композитів у високонавантажених агрегатах сучасних пасажирських і транспортних літаків. Розроблено конструктивно-силові схеми рамп і трапа з композитів. Розглянуто процес проектування композитного трапа вантажного люка транспортного літака.

Ключові слова: літак, композит, проектування, агрегат, фюзеляж.

UDC 629.735

I.O. Golovchenko, postgraduate student

National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute»

COMPOSITE AIRCRAFT AGGREGATES DESIGN

The chronology of composite materials application in the design of family An planes was considered. Application of composites in the high-loaded units of modern passenger and transport planes was analysed. Constructive-bearing schemes of composite stage and trap was developed. Design process of the transport plane cargo hatch composite trap was considered.

Keywords: aircraft, composite design, aggregate, fuselage.

В.М. Волкогон, д.т.н., с.н.с.

Д.А. Котляр, к.т.н., с.н.с.

С.К. Аврамчук, к.т.н., с.н.с.

Ю.О. Федоран, пров. інж.

М.В. Бобер, наук. співр.

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГАРЯЧЕПРЕСОВАНИХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВІ КАРБІДІВ ВОЛЬФРАМУ ДЛЯ ТЕРМОЦЕНТРОБІЖНОГО РОЗПИЛЕННЯ

Проведено аналіз недоліків одержання електродів з реліту шляхом переплавлення в печах електроопору з наступним термовідцентровим розпиленням. Досліджено формування подвійного карбіду вольфраму ($WC + W_2C$) в умовах гарячого пресування подрібненого реліту та суміші реліту з вольфрамом і вуглецем (96 та 4 ваг. % відповідно). Показано, що при температурі пресування ~ 1900 °C формується заготовка електроду з потрібними структурними характеристиками, вольфрам повністю переходить в карбід та напівкарбід з такими ж просторовими групами ґраток, що і в реліті.

Ключові слова: карбід вольфраму, реліт, гаряче пресування, рентгеноструктурний аналіз.

Вступлення. Карбіди вольфрама являються основною складовою інструментальних, износостойких и других материалов. Особое место занимает релит, представляющий собою эвтектический сплав в котором содержится 20 мас.% карбида и 80 мас.% полукарбида вольфрама.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Традиционно его получают плавлением вольфрам-углеродной смеси в печах электросопротивления при температуре ~ 3100 °C с последующей кристаллизацией в литнике в виде цилиндрической заготовки диаметром ~ 30 мм и длиной ~ 200 мм [1, 2]. Печи электросопротивления обеспечивают высокую продуктивность, но при плавлении смеси из нескольких компонентов свойства которых отличаются (табл. 1) нарушается однородность их распределения в объеме стержня, что влияет на электросопротивление и температуру его плавления на разных участках.

Таблица 1. Физические характеристики составляющих смесей, которые использовали при получении стержней двойного карбида вольфрама

Наименование материала	ρ , г/см ³	λ , Вт/(см·°C)	$T_{пл}$, °C	Удельное сопротивление, мкОм · см
W	19,3	1,30	3380	5,5
WC	15,6	1,79	2870	19,2
W ₂ C	17,2	0,29	2800	81,0

Использование релита ($WC + W_2C$) в качестве компонента износостойкого покрытия предполагает, что дисперсность его частиц должна соответствовать 50-150 мкм. Одним из способов получения порошков такой дисперсности является термоцентробежное распыление цилиндрических заготовок релита на установке, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины [3]. Качество этих заготовок должно отвечать целому ряду требований, одно из которых – однородность химического состава по всему объему [4], что предполагает постоянство температуры расплава на протяжении всего периода распыления заготовки.

Как показывает опыт в ряде случаев распыление литых заготовок происходит неоднородно. На рис. 1 приведен фрагмент заготовки релита после завершения процесса распыления. Над краями заготовки наблюдается нависание расплава с образованием овальных выступов в местах отрыва капель. В центре заготовки наблюдается холмообразная поверхность с небольшой площадкой на вершине.



Рис. 1. Фрагмент литой заготовки релита после распыления ($\times 3,5$)

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Количественный рентгенофазовый анализ [5] проб с вершины и основания фрагмента заготовки показал, что составы обеих проб идентичны (65 мас. % W_2C и 35 мас. % WC). Следует отметить, что при изготовлении заготовки заливка расплава двойного карбида вольфрама в литник осуществляется под углом 45° , при этом из-за разницы в удельном весе его составляющих (расчетная плотность W_2C - $17,18 \text{ г/см}^3$, а WC - $15,67 \text{ г/см}^3$) доля более тяжелой компоненты в нижней части стержня может быть больше чем в верхней. Анализ проб показал, что содержание W_2C в нижней части стержня составляет 68 мас. %, а в верхней – 64 мас.%. Такое изменение концентрации карбидов, по-видимому, приводит к возрастанию вязкости расплава, что при постоянной мощности дуги и скорости вращения заготовки тормозит распыление центрального участка зоны расплава в которой угловая скорость минимальна.

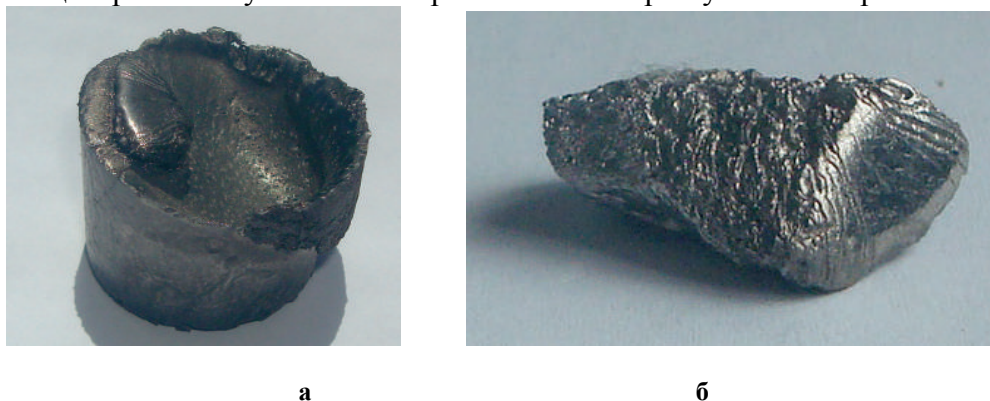


Рис.2. Фрагмент заготовки релита после распыления:

а - общий вид; *б* - извлеченный из заготовки непроплавленный элемент ($\times 1,0$)

Неоднородностью состава заготовки можно также объяснить образование конусообразного непроплавленного элемента на другом фрагменте заготовки после расплытия (рис. 2), на котором наблюдается кратерообразная поверхность с образовавшимся непроплавленным выступом.

По данным количественного рентгенофазового анализа этот фрагмент содержит вольфрам (80 мас. %) и полукарбид вольфрама (20 мас. %). Можно предположить, что данный элемент лишь частично прореагировал с углеродом при плавлении и из-за более высокой плотности ($W-19,3 \text{ г/см}^3$, релит- 17 г/см^3) опустился в расплаве при остывании на дно (низ) заготовки. В процессе расплытия, когда зона расплава достигла уровня залегания элемента, мощности дуги не хватило для его оплавления ($T_{\text{пл.}W} = 3380 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл.релита}} \sim 2800 \text{ }^\circ\text{C}$).

Таким образом, совокупность перечисленных факторов при изменении концентрации компонент может способствовать снижению величины перегрева обеспечивающую необходимую текучесть, а следовательно, повышению вязкости расплава, что усложняет процесс расплытия соответствующего участка стержня.

Стабильность процесса термоцентробежного расплытия заготовок релита, полученных в печах электросопротивления, зависит от способа их формования, определяющего объемную однородность по составу и, как следствие, различие физических характеристик по объему.

Постановка задания. С целью обеспечения однородности структуры электрода, от которой зависит стабильность процесса каплеобразования, нами была применена технология горячего прессования. Для этого была выполнена разработка узла нагрева, схема которого приведена на рис. 3. Нагрев осуществлялся с помощью тиристорного преобразователя частоты тока ТПЧТ-120 мощностью 120 кВт смонтированным на гидравлическом прессе марки П-125 с максимальным усилием 125 тонн.

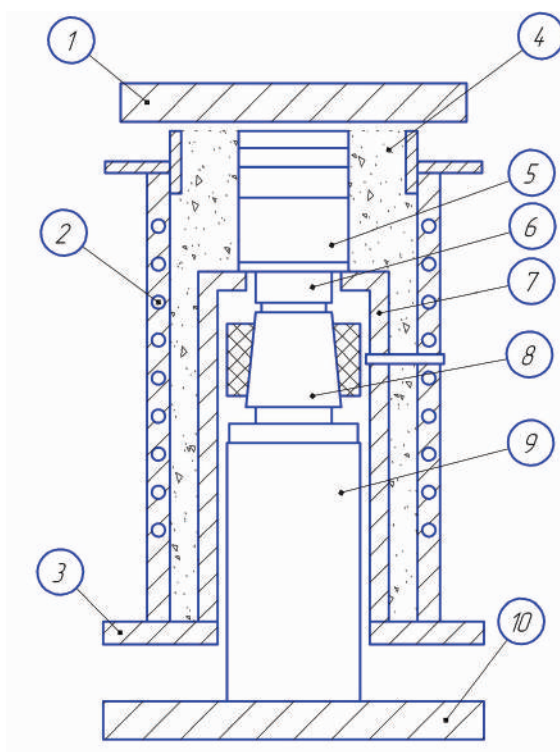


Рис. 3. Индукционный узел нагрева: 1 – верхняя водоохлаждаемая плита,

2 – медная водоохлаждаемая катушка индуктора, 3 – средняя водоохлаждаемая плита, 4 – Теплозащитная засыпка (BN), 5 – верхняя подставка, 6 – заглушка, 7 – экран нагреватель, 8 – пресс-форма, 9 – нижняя подставка, 10 – водоохлаждаемая плита прессы

Основные размеры индуктора:
 высота – 680 мм;
 внутренний диаметр – 400 мм;
 наружный диаметр профиля витков 30 мм;
 количество витков – 14.

Размеры графитового нагревательного экрана: высота – 780 мм, внутренний диаметр - 240 мм и наружный диаметр - 300 мм.

Экран-нагреватель выполнен из графита марки ЭГО, а верхняя, нижняя подставки, заглушка и пресс-форма из графита марки МПГ-7. Максимальная температура – 2200°C. Высота зоны однородного нагрева – 180 мм.

Изготовление заготовок двойного карбида вольфрама для распыления осуществляли следующим образом. В первом случае получение стержней из дробленого релита ($WC + W_2C$) осуществляли с использованием индукционной печи диаметром нагревателя 175 мм и высотой зоны однородного разогрева 60-70 мм. Скорость нагрева соответствовала 125 °C / мин, а давление – 30 МПа. Порошок дробленого релита просеивали на сите 200 мкм и засыпали в графитовую (МПГ-7) прессформу. Начало прессования дробленого релита происходил после достижения температуры 2200 °C и давлении 20 МПа и заканчивался при температуре 2500 °C. Во втором варианте использовали порошки релита, вольфрама и сажи. При этом для смеси (смешивание в барабане на протяжении 24 часов) 50 вес. % релита и смеси вольфрама с ламповой сажей (96 и 4 вес. % соответственно) прессование заготовки осуществляли при 1800-1950 °C.

Таблица 2. Результаты эмиссионного анализа исходных порошков для получения стержней $WC + W_2C$ горячим прессованием

Название материала	W	Co	Mo	Fe	Ni	Si	Al	Ti	Cu	Mg	Mn	B
WC + W ₂ Cвих.	Основа	>1	10-2	0,1	0,1	0,1	10-3	10-2	10-4	> 10-3	10-3	+
WC + W ₂ Cстар. прес.	Основа	~1	10-2	<0,1	10-2	0,1	-	10-3	10-4	> 10-3	10-3	+
Wвих.	Основа	-	-	10-3	10-3	10-3	-	< 10-3	-	10-3	-	+

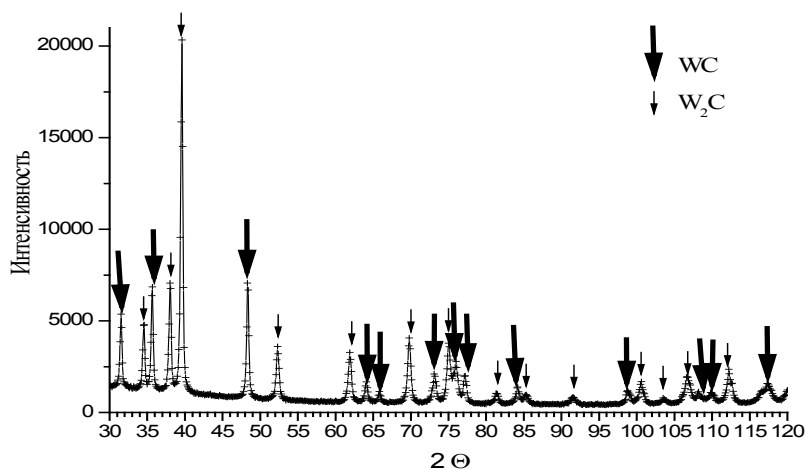
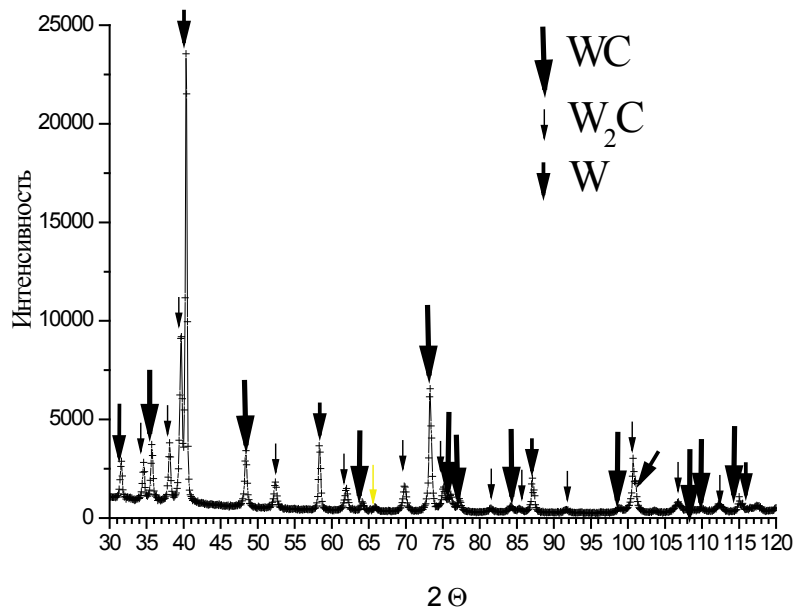
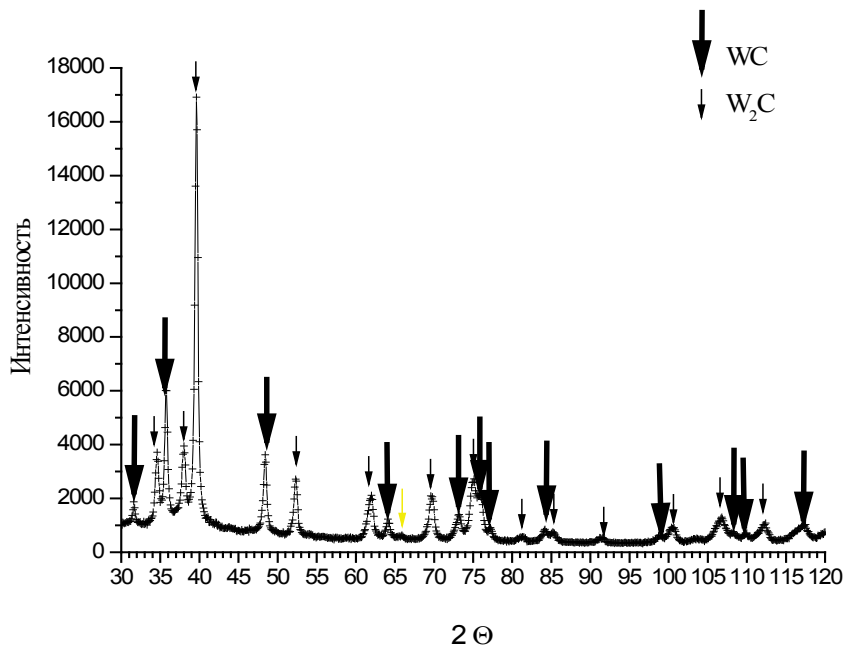


Рис. 4. Исходный порошок ре лита



a



б

Рис. 5. Смесь релита с вольфрамом и сажей:

а- исходная; б- после горячего прессования

Фазовый состав порошков, которые использовали при изготовлении горячепрессованных стержней сплава, определяли с помощью дифрактометра «ДРОН-3М» в монохроматическом $\text{CuK}\alpha$ – излучении методом пошагового сканирования (35 кВ, 35 мА; время экспозиции в точке 3-7 с, шаг $0,05^\circ$). Обработку данных рентгеновских исследований с учетом коэффициента текстуры фаз осуществляли с использованием программы для полнопрофильного анализа рентгеновских спектров от смеси поликристаллических фазовых

составляющих PowderCell 2.4 [6]. Результаты эмиссионного спектрального анализа исходных порошков приведены в табл. 2.

Порошки вольфрама и ламповой сажи, релита засыпали в необходимых количествах в шаровую мельницу и смешивали «всухую» в течении 24-х часов. Полученную смесь загружали в графитовую пресс-форму 8 для получения цилиндрических заготовок диаметром 29мм и высотой-120мм поверхность которой в местах контакта со смесью защищена обмазкой на основе нитрида бора. Готовую пресс-форму помещали в индукционный узел нагрева между заглушкой 6 и нижней подставкой 9 и с помощью гидравлического пресса устанавливали начальное давление ~2 МПа. Затем включали нагрев и, при достижении необходимой температуры в зоне пресс-формы, давление доводили до 20 МПа. Процесс твердофазного спекания контролировали с помощью кругового индикатора и пирометра. Время окончания спекания ~ 1 час. После остывания в индукторе до температуры – 1000 °С, пресс-форму до полного остывания помещали в графитовый контейнер.

Рентгеноструктурные исследования дробленных исходных порошков релита, который использовали для получения стержней, их смеси с вольфрамом и сажой, а также состава горячепрессованного стержня показали следующее. У исходных порошков релита отсутствует свободный вольфрам (рис. 4) и отмечается наличие карбида вольфрама (32 вес. %), а также полукарбида вольфрама (68 вес. %).

После горячего прессования смеси релита с вольфрамом и сажой наблюдается полный переход вольфрама в карбид (28 мас. %) и полукарбид (72 мас. %) (рис. 5). После распыления соотношение карбида и полукарбида в гранулах составляло – 10 и 85 мас. % соответственно, остаток – W [7, 8]

Как в исходном релите, так и после горячего прессования и распыления W_2C фаза имела гексагональную решетку с пространственной группой $P3m1$, а WC фаза – гексагональную с пространственной группой $P6m2$.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования системы WC - W_2C , полученной из различных составов исходных материалов – порошков дробленного релита, вольфрама и сажи при формировании стержней для распыления порошков двойного карбида вольфрама, показали возможность снижения температуры их получения до $T \sim 1900$ °С путем использования технологии горячего прессования смесей указанных порошков.

Литература

1. Самсонов Г.В. Карбиды вольфрама / Г.В. Самсонов, В.К. Витрянюк, Ф.И. Чаплыгин. – К.: Наукова думка, 1974. – 174с.
2. Киффер Р. Твердые материалы / Р. Киффер, Ф. Бенезовский. – М.: Металлургиздат, 1968. – 312с.
3. Пат. На изобретение № 20516 А Кл. В22F 9/10. Украина. Способ получения гранулированных тугоплавких материалов / К. А. Юценко, А. П. Жудра, А. И. Белый, В. И. Дзыкович. — Заявл. 14. 10. 94; Опубликовано. 15.07.97.
4. Дзыкович В. И. Влияние процесса термоцентробежного распыления на свойства сферических частиц карбидов вольфрама / В.И. Дзыкович // Автоматическая сварка. — 2009. — № 4. — С. 52–55.
5. Котляр Д.А. Дослідження процесів формування в умовах гарячого пресування електродів з подвійного карбиду вольфраму при його взаємодії з вольфрамом і вуглецем/ Д.А. Котляр, С.К. Аврамчук, Ю.О. Федоран, А.В. Степаненко, О.І. Бєлий // Вісник матеріалознавства.- 2014.- Вып. №7.-С 75 – 79.
6. ftp://ftp.bat.de/Powder_Cell/pcw23.exe. [Электронный ресурс]
7. Махненко В.И. Математическое моделирование процесса получения сферических гранул плавящихся карбидов вольфрама / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, А.П. Жудра // Автоматическая сварка. — 2004. — № 2. — С. 3–10.
8. Дзыкович В. И. Влияние процесса термоцентробежного распыления на свойства сферических частиц карбидов вольфрама // Автоматическая сварка. — 2009. — № 4. — С. 52 – 55.

© В.М. Волкогон, Д.А. Котляр, С.К. Аврамчук, Ю.О. Федоран, М.В. Бобер, В.С. Антонюк

УДК 621.81:621.337

В.М. Волкогон, д.т.н., с.н.с. ; Д.А. Котляр, к.т.н., с.н.с.;

*С.К. Аврамчук, к.т.н., с.н.с.; А. Федоран, вед. инж. ; М.В. Бобер, науч. сотр.
Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины*

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМОВАНИЯ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА ДЛЯ ТЕРМОЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Проведен анализ недостатков получения электродов из релита путем переплавления в печах электросопротивления с последующим термоцентробежным распылением. Изучено формирование двойного карбида вольфрама ($WC+W_2C$) в условиях горячего прессования дробленого релита и смеси релита с вольфрамом и углеродом. Показано, что при температуре прессования $\sim 1900^\circ C$ формируется заготовка электрода с необходимыми структурными характеристиками, вольфрам полностью переходит в карбид и полукарбид с такими же пространственными группами кристаллических решеток, что и в релите.

Ключевые слова: *карбид вольфрама, релит, горячее прессование, рентгеноструктурный анализ.*

UDC 621.81:621.337

V.M. Volkogon, Sc. D.; D.A. Kotlyar, Ph. D.; S.K. Avramshuk, Ph. D.;

*Y.O. Fedoran, lead Engineer; M.V. Bober, Researcher
Frantsevich Institute for Problems of Materials Science*

V.S. Antonyk, Sc. D.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

SOME FEATURES OF FORMING HOT PRESSING BLANKS BASED TUNGSTEN CARBIDE FOR THERMAL CENTRIFUGAL SPRAYING

The analysis of the shortcomings of tungsten carbide electrodes manufacturing by remelting furnaces resistivity followed by termotsentrobezhnym spray. The formation of the double tungsten carbide ($WC+W_2C$) in hot pressing a mixture of crushed relite and relite and tungsten and carbon is studied. It is shown that at a temperature of $\sim 1900^\circ C$ pressing emerging billet electrode with the necessary structural characteristics, tungsten is fully transferred in carbide and semicarbide with the same space group of the crystal lattices as in relite.

Keywords: *tungsten carbide, relit, hot pressing, x-ray analysis.*

ВПЛИВ КУТА КОНУСУ ЗПРОФІЛЬОВАНОГО ПУАНСОНУ НА СИЛОВІ РЕЖИМИ ТА ЯКІСТЬ ВИРОБІВ ПРИ РОЗДАЧІ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК ІЗ СТАЛІ 12Х18Н10Т

Методом скінченних елементів створені моделі та проведено розрахунковий аналіз відкритої роздачі зпрофільованими пуансонами з різним кутом конусу. Деформуюча поверхня пуансона утворена перетином кіл постійного діаметру, які розміщені під кутом з однаковим кроком. Формоутворенню в холодному стані підлягали трубчасті заготовки з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Визначені зусилля роздачі, кінцеві форми та розміри zdeформованих заготовок, напружено-деформований стан і ступінь використання ресурсу пластичності в них. Визначено кут пуансону, який забезпечує максимальний коефіцієнт роздачі.

Ключові слова: роздача, трубчаста заготовка, конусний зпрофільований пуансон, метод скінченних елементів, зусилля роздачі, коефіцієнт роздачі.

Вступ. У різних галузях промисловості користуються попитом циліндричні, конічні і криволінійні перехідники без фланців та з фланцями, які розташовані як перпендикулярно до осі заготовки, так і похило для відгалуження трубопроводів на необхідний кут. Технології виготовлення вказаних виробів залежно від вимог і умов виробництва можуть змінюватися. Широко розповсюджена технологія виготовлення шляхом роздачі трубчастих заготовок в гарячому стані. В якості вихідних заготовок використовують заготовки, які отримані розподілом труб обробкою різанням, або безвідхідним різанням труб зсувом в штампах. При відсутності труб з необхідного матеріалу можна використовувати заготовки, що отримані витягуванням з подальшими пробиванням дна та відборткуванням. Використання мірних заготовок з труб, в порівнянні з заготовками, що отримані методами глибокого витягування з листової заготовки, дає значну економію металу та виключення операцій доопрацювання заготовок.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. В теперішній час напрацьований досвід виготовлення перехідників за допомогою операцій роздачі трубчастих заготовок в холодному стані [1-3]. Найбільше розповсюджена відкрита роздача, коли на внутрішню та зовнішню поверхні заготовки при формоутворенні відсутня дія жорстких упорів. Основний показник, по якому проводиться проектування технології роздачі, – це коефіцієнт роздачі $k = D / D_0$ (D – діаметр торця zdeформованої заготовки, D_0 – діаметр вихідної трубчастої заготовки). При відкритій роздачі величина коефіцієнту k обмежена по причині втрати стійкості стінки заготовки при роздачі, або руйнуванням торця zdeформованої частини. Коефіцієнт роздачі залежить від відносної товщини заготовки S_0 / D_0 (S_0 - товщина стінки трубчастої заготовки), а також від коефіцієнту тертя, який впливає на зусилля роздачі та втрату стійкості стінки.

Вплив коефіцієнту тертя на напружений стан та зусилля роздачі приведений в джерелах [2,4,5] в аналітичних залежностях, які отримані методом спільного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності. Використання методу скінченних елементів (МСЕ) дозволяє встановити всі необхідні параметри процесу роздачі для проектування технології та оцінити якість виробів [6]. До показників якості відносяться форма та розміри zdeформованої заготовки, розподіли ступеню використання

ресурсу пластичності та інтенсивності деформацій і напружень, по яких можна встановити пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією.

На рис. 1 приведена схема відкритої роздачі Трубчаста заготовка 1 висотою H , діаметром D_0 та товщиною стінки S_0 розміщена в оправці 2 і встановлена на плиті 3. Зусилля деформування P_d прикладається за допомогою зпрофільованого конусного пуансону 4. Для зменшення впливу сил тертя на зусилля відкритої роздачі та втрату стійкості стінки заготовки використаний пуансон, у якого деформуюча поверхня утворена перетином кіл постійного діаметру d з центрами, що розташовані під кутом α з кроком t (рис. 2) [7]. При формоутворенні виробів таким пуансоном зменшується площа контакту здеформованої частини заготовки з пуансоном та знижуються сили тертя, що приводить до зменшення зусилля роздачі. Величини діаметру d та кроку t повинні бути такими, щоб забезпечити рівну по довжині здеформовану частину заготовки.

Актуальною задачею є встановлення величини кута конусу α , який забезпечує мінімальне зусилля роздачі та збільшення коефіцієнту роздачі.

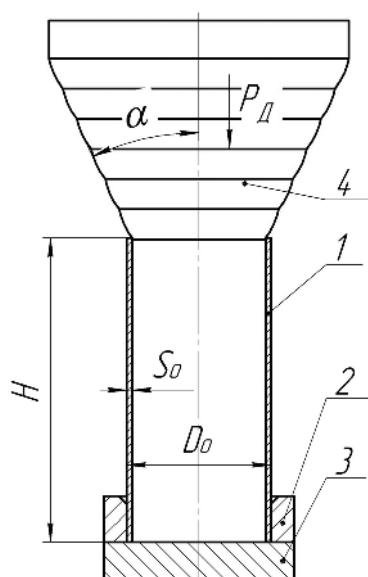


Рис. 1. Схема процесу відкритої роздачі трубчастої заготовки

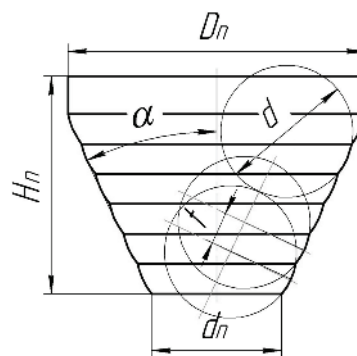


Рис. 2. Ескіз зпрофільованого конусного пуансону

Постановка завдання. Метою даної роботи є вивчення, з використанням МСЕ, впливу кута конусу α , діаметра d та кроку t зпрофільованого пуансону на зусилля деформування, напружено-деформований стан заготовки та коефіцієнт роздачі.

МСЕ дозволяє комплексно враховувати конструктивні фактори (геометричну форму пуансону), технологічні фактори (форму та розміри вихідної заготовки, тип змащення, швидкість деформування) та фізико-механічні фактори (пружні властивості металу, діаграму істинних напружень і діаграму пластичності металу, що деформується).

В роботі було проведено дослідження відкритої роздачі трубчастих заготовок шляхом моделювання в програмному комплексі DEFORM, що був наданий на правах тимчасової ліцензії компанією «ТЕСИС». Вихідними даними для моделювання були: розміри заготовки з нержавіючої сталі - діаметр $D_0 = 38$ міліметрів (мм), висота $H = 80$ мм, товщина стінки $S_0 = 1,5$ мм. Коефіцієнт тертя 0,1. Кут α брали 15° , 25° , 35° та 45° .

Процес роздачі розподілявся на певну кількість кроків навантаження з виявленням моменту втрати стійкості стінки заготовки.

Основний матеріал та результати. Моделюванням встановлені діаметр $d = 6$ мм та крок $t = 1,8$ мм, які забезпечують рівну по довжині здеформовану частину заготовки. Розрахункові залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону показана на рис. 3. Зі

збільшенням кута конусу α зпрофільованого пуансону кінцеве переміщення пуансону до моменту втрати стійкості деформованої заготовки спадає. Максимального значення переміщення пуансону до втрати стійкості в стінці заготовки набуває 44,4 мм при роздачі зпрофільованим пуансоном з кутом $\alpha = 15^\circ$, а мінімального – 14,3 мм при роздачі пуансоном з кутом $\alpha = 45^\circ$. Втрата стійкості в стінці деформованої заготовки відбувається при однаковому максимальному значенні зусилля в межах 71 – 73 кН.

Залежність коефіцієнтів роздачі k від кута конусу зпрофільованого пуансону зображена на рис. 4. Чим більший кут пуансону, тим менший коефіцієнт роздачі.

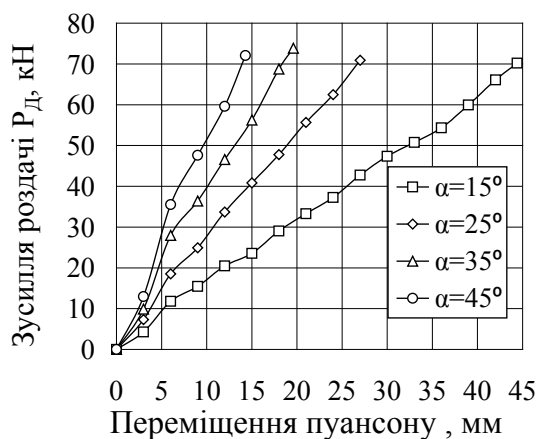


Рис. 3. Залежність зусилля роздачі від переміщення пуансону

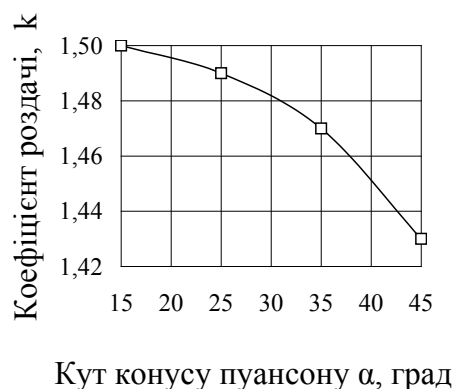


Рис. 4. Залежність коефіцієнту роздачі в від кута конусу зпрофільованого пуансону

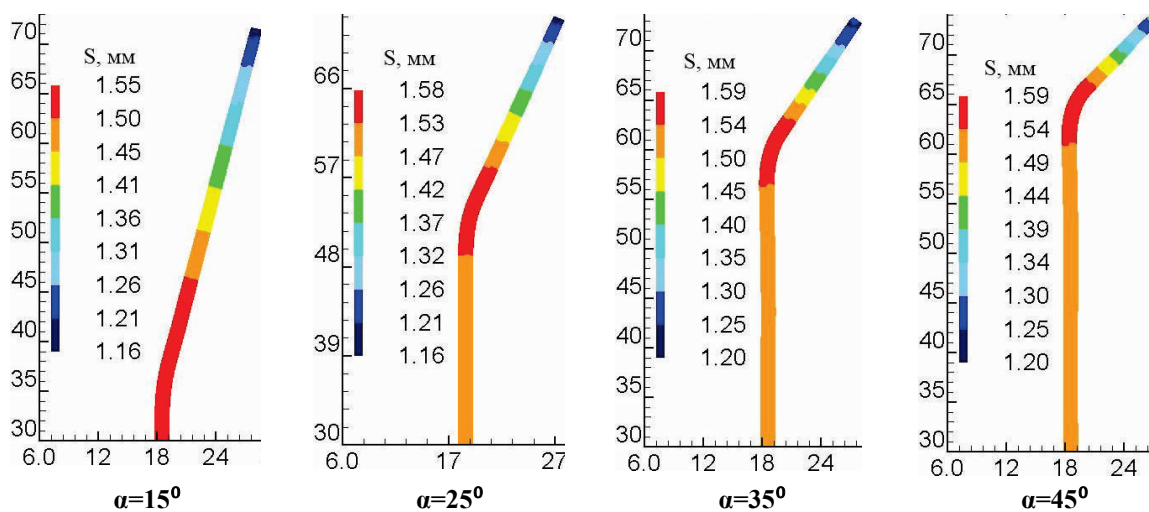


Рис. 5. Кінцева форма та товщина S стінок деформованих частин заготовок. Товщина в міліметрах

. В результаті моделювання встановлені кінцеві форми і розміри деформованих заготовок. Зміна товщини в деформованих частинах заготовок, які отримані різними пуансонами, зображена на рис. 5

В деформованих частинах заготовок спостерігається дві зони: зона потовщення та зона потоншення стінок. Зона потоншення значно більша за зону потовщення. Зона потовщення локалізується в місці радіусу переходу від циліндричної до конічної частини деформованої заготовки. Зі збільшення кута конусу зпрофільованого пуансону величина потовщення зростає.

Мінімальне значення величина потовщення складає 1,55 мм при роздачі зпрофільованим пуансоном з кутом конусу $\alpha=15^\circ$, а максимального – 1,59 мм при роздачі пуансоном з кутом $\alpha=45^\circ$. Зона потоншення має місце в конічній частині здеформованої заготовки. Величина потоншення зростає з наближенням до торця заготовки.

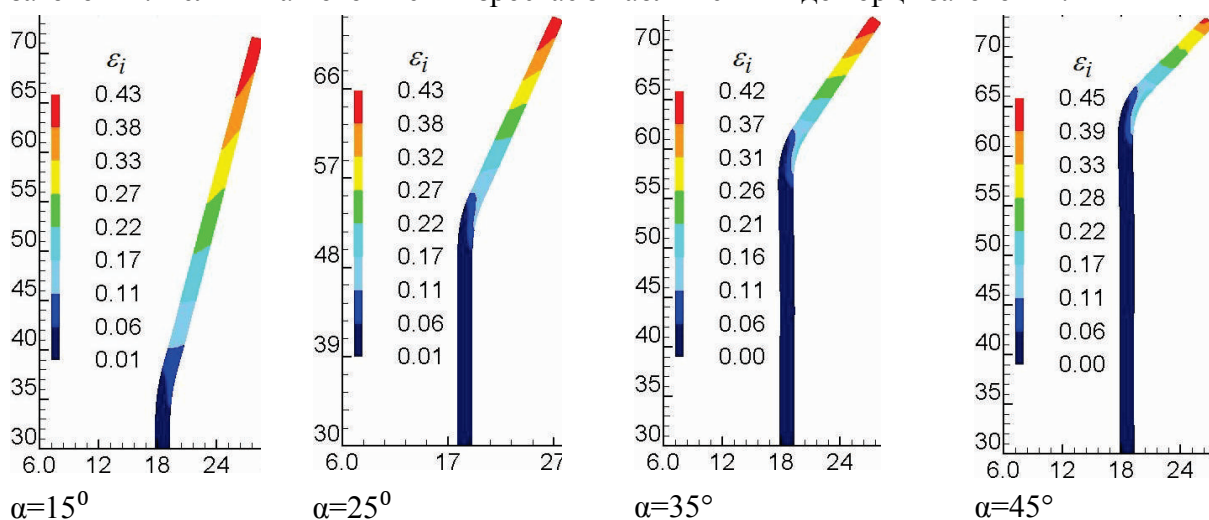


Рис. 6. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в об'ємі здеформованої заготовки

Моделюванням МСЕ встановлений напружено-деформований стан в здеформованих заготовках. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією та зміцнення здеформованого металу можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ϵ_i та інтенсивності напружень σ_i . Розподіли ϵ_i в здеформованих частинах заготовок, які отримані роздачею пуансонами з різним кутом конусу, приведені на рис. 6. Досягнуті величини ϵ_i залежать від отриманого коефіцієнту роздачі k .

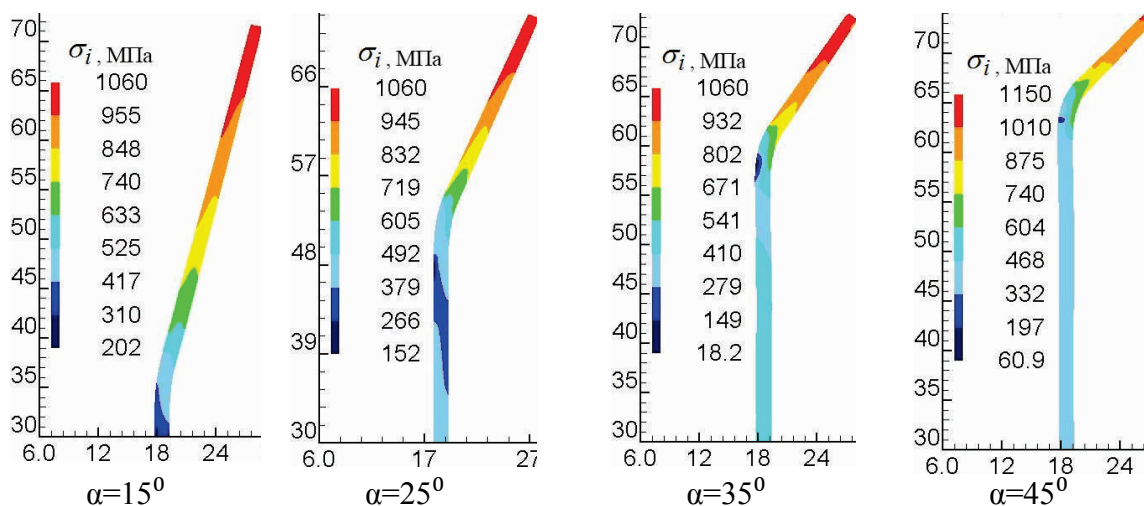


Рис. 7. Розподіли інтенсивності напружень σ_i в здеформованих частинах заготовок

Найбільші значення ϵ_i зосереджені в області торців здеформованих частин заготовок з поступовим зменшенням до місця переходу здеформованої конусної частини в циліндричну. Максимального значення величина інтенсивності деформацій $\epsilon_i=0,45$ набуває при роздачі зпрофільованим пуансоном з кутом конусу $\alpha=45^\circ$, а мінімального $\epsilon_i=0,42$ при роздачі з кутом конусу зпрофільованого пуансону $\alpha=15^\circ$.

На рис. 7 зображено розподіли інтенсивності напружень σ_i в здеформованих частинах заготовок. Вигляд розподілів σ_i аналогічний

розподілу інтенсивності деформацій ε_i . Найбільшого значення величина інтенсивності напружень σ_i набуває 1150 МПа при роздачі зпрофільованим пуансоном з кутом конусу $\alpha=45^\circ$, а мінімального – 1060 МПа при роздачі пуансоном з кутом конусу $\alpha=15^\circ$.

По напружено-деформованому стану був визначений ступінь використання ресурсу пластичності ψ здеформованого металу в заготовках після роздачі. Розподіли величин ψ в здеформованих частинах заготовок, які отримані роздачею з різним кутом конусу зпрофільованого пуансону, приведений на рис. 8.

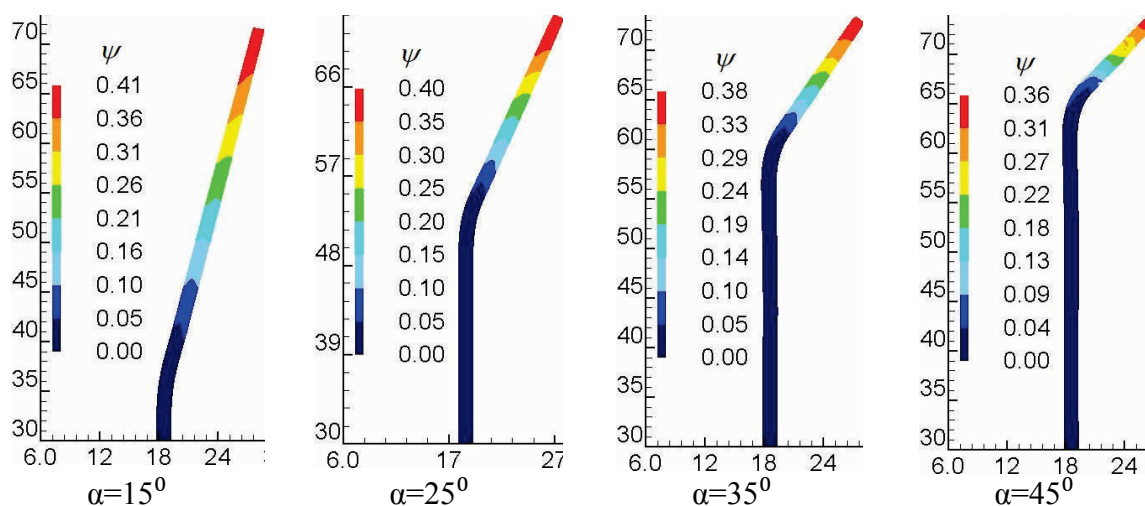


Рис. 8. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності ψ в здеформованих частинах заготовок



Рис. 9. Оснащення на випробувальний стенді TIRA test 2300



Рис. 10. Вихідна трубчаста заготовка



Рис. 11. Здеформована заготовка та зпрофільований конусний пуансон

Максимального значення величина ступеня використання ресурсу пластичності в об'ємі здеформованої заготовки набуває $\psi=0,41$ при роздачі зпрофільованим пуансоном з кутом конусу $\alpha=15^\circ$.

По результатах розрахунків було виготовлене оснащення та проведені експериментальні дослідження. На рис. 9 показано оснащення для роздачі зпрофільованим конусним пуансоном, яке встановлене на випробувальному стенді TIRA test 2300. Вихідна трубчаста заготовка зображена на рис. 10. В якості змащення при роздачі використовува-

ли ВНИИНП-232. Здеформована заготовка, яка отримана роздачею, та зпрофільований конусний пуансон показані на рис. 11.

Висновки. Методом скінченних елементів розроблені математичні моделі та проведений розрахунковий аналіз процесів роздачі трубчастих заготовок з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т зпрофільованим конусним пуансоном. Розрахунком виявлені енергосилові режими формоутворення при роздачі, кінцеві форми та розміри zdeформованих заготовок та напружено-деформований стан в них. Встановлено, що кут конусу зпрофільованого пуансону $\alpha = 15^{\circ}$ забезпечує максимальний коефіцієнт роздачі.

Література

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1979. 520 с.
2. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка: Формоизменяющие операции / Ю.А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. - 288 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с.
4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. Изд. 2-е перераб и доп.. М: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. Сосенушкин Е.Н. Анализ процесса раздачи трубных заготовок при штамповке изделий с коническими поверхностями / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, Д.В. Хачатрян и др. // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 135.
6. Калюжний В.Л. Двухстороння роздача трубчасті заготовки з подальшим утворенням плоского фланця / В.Л. Калюжний, В.В. Піманов, Я.С. Олександренко та ін. // Пластическая деформация металлов: Коллективная монография. Днепропетровск, 2014. – С. 311 – 315.
7. Калюжний В.Л. Визначення профілю пуансону для роздачі трубчастих заготовок з різною відносною товщиною / В.Л. Калюжний, Я.С. Олександренко, І.П. Куліков // Тези доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти». – Київ, 2014. – С. 76 – 77.

©Олександренко Я.С., Куліков І.П.

УДК.621.983

Олександренко Я.С., інженер

Куліков І.П., інженер

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ВЛИЯНИЕ УГЛА КОНУСА СПРОФИЛИРОВАННОГО ПУАНСОНА НА СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ ПРИ РАЗДАЧЕ ТРУБЧАСТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Методом конечных элементов созданы модели и проведен расчетный анализ открытой раздачи спрофилерованными пуансонами с разным углом конуса. Деформирующая поверхность пуансона образована пересечением окружностей постоянного диаметра и расположенных под углом с одинаковым шагом. Формообразованию в холодном состоянии подлежали трубчатые заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Определены усилия раздачи, конечные формы и размеры сдеформированных заготовок, напряженно-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности в них. Установлен угол конуса пуансона, который обеспечивает максимальный коэффициент раздачи.

Ключевые слова: раздача, трубчатая заготовка, конусный профилированный пуансон, метод конечных элементов, усилия раздачи, коэффициент раздачи.

**INFLUENCE CONE ANGLE OF THE PUNCH PROFILED ON POWER
MODES AND QUALITY PRODUCTS AT THE DISTRIBUTION OF STEEL
TUBE BLANKS 12X18H10T**

Finite element method developed models and design analysis conducted open bulging profiled punches with different angle of the cone. The deforming surface of the punch formed by the intersection of the circles of constant diameter and angled at an equal pitch. Shaping cold subject tubular blanks of stainless steel 12X18H10T. Determined efforts bulging, the final shape and dimensions of deformed workpieces, stress-strain state and the degree of resource utilization plasticity in them. Set the cone angle of the punch, which provides maximum bulging ratio.

Keywords: *bulging, tubular blank, profiled conical punch, finite element method, effort bulging, coefficient bulging.*

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН РАДІАЛЬНОГО БИТТЯ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ

Наведено методику вимірювання радіального биття шліфувальних кругів, перевагами якої є безконтактність реалізації, точність і простота виконання.

Ключові слова: радіальне биття, шліфувальний круг, мікроскоп, рельєф круга, оптична система.

Постановка проблеми. При обробці металів різанням в системі верстат-приспособування-інструмент-деталь виникають вібрації, що приводять до зниження якості оброблюваних поверхонь. З метою застосування ефективних методів гасіння цих коливань необхідно розробити раціональні методики визначення їх амплітудно-частотних характеристик.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Однією із причин виникнення механічних коливань при виконанні шліфувальних операцій є радіальне биття на шліфувальному крузі. Воно виникає при першому встановленні шліфувального круга на верстат при відсутності правки і балансування та після певного часу виконання шліфувальної операції збільшується в наслідок виникнення хвилястості на робочій поверхні круга [1-4].

В зв'язку з тим, що поверхня круга має складний рельєф, класичні методи вимірювання радіального биття недостатньо точні. З метою забезпечення заданих технологічних параметрів шліфування, необхідно розробити більш точну методику вимірювання величини радіального биття.

Формулювання цілей статті. Метою статті є аналіз існуючих способів вимірювання радіального биття шліфувальних та представлення розробленої авторами методики.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день існує багато способів вимірювання радіального биття шліфувальних кругів при обробці металів та сплавів. Один із методів – профілографування, суть якого полягає в тому, що в якості щупа використовують струмопровідну голку, яка має певну геометрію і переміщується відносно заданої поверхні. Установка дозволяє одночасно із записом профілограми фіксувати контакт твердо-сплавної контактної голки з струмопровідною зв'язкою круга. Це дозволяє відмежувати інформацію про геометрію поверхні зв'язки від геометрії виступаючих із зв'язки зерен [5]. Але такий метод потребує використання дорогого обладнання і складної обробки отриманих даних.

Існує спосіб, згідно якого на досліджувану робочу поверхню круга наносять багатошарове покриття, загальною товщиною не менше загальної висоти рельєфу, шари якого попарно-контрастні між собою, зернами алмазу і матеріалом зв'язки за кольором або фактурою. Товщина кожного шару вибирається однаковою і постійною в напрямку нормалі до поверхні, що є прилеглою до вершин найбільш виступаючих зерен круга. Шліф зрізають на глибину, доторкаючись вершин найбільш виступаючих алмазних зерен. Після зрізу видно як конфігурація і відстань між кордонами шарів на шліфі дозволяє проаналізувати існуюче радіальне биття круга [5]. Але такий спосіб також складний у практичній реалізації.

Існує спосіб вимірювання радіального биття з використанням індикатора годинникового типу, але геометрія щупа не дозволяє детально дослідити нерівності робочої поверхні шліфувальних кругів.

Авторами запропоновано методику визначення радіального биття безконтактним способом, який дозволяє візуально контролювати процес дослідження робочої поверхні шліфувального круга у поєднанні з достатньою точністю та простотою виконання.

Для реалізації даного способу був використаний цифровий USB мікроскоп Supereyes B008.

Однією з особливостей макрозйомки є наявність низької глибини різко зображуваного простору (ГРЗП) оптичної системи [6]. Використовуючи цю обставину мікроскоп було розміщено під кутом до досліджуваної поверхні. Таким чином було створено умови перетину площини робочої поверхні шліфувального круга та площини ГРЗП, розміщеної перпендикулярно оптичній вісі мікроскопа на відстані фокусування оптичної системи.

Всі об'єкти поверхні, що потрапляють в кут огляду оптичної системи і знаходяться за межами лінії перетину цих площин зображуються не сфокусовано. Таким чином було отримано горизонтальну смугу сфокусованого зображення фрагменту робочої поверхні шліфувального круга.

При обертанні шліфувального круга, освітленого джерелом світла, в центрах вимірювального стенду поле зору оптичної системи мікроскопа переміщується по поверхні інструмента. Внаслідок наявності радіального биття шліфувального круга смуга різко зображеного фрагменту поверхні вертикально переміщується: при збільшенні діаметру на знімках смуга різкості розташовується вище центру кадру, при зменшенні радіусу – нижче центру кадру (рис. 2).

З метою фіксації даних про радіальне биття, за допомогою механічного пристрою шліфувальному кругу був наданий рівномірний обертальний рух. За допомогою програми Live WebCam, яка може здійснювати збереження кадрів із заданим інтервалом часу з відеореєстру, отриманого з мікроскопу, була створена серія фотознімків із різним просторовим

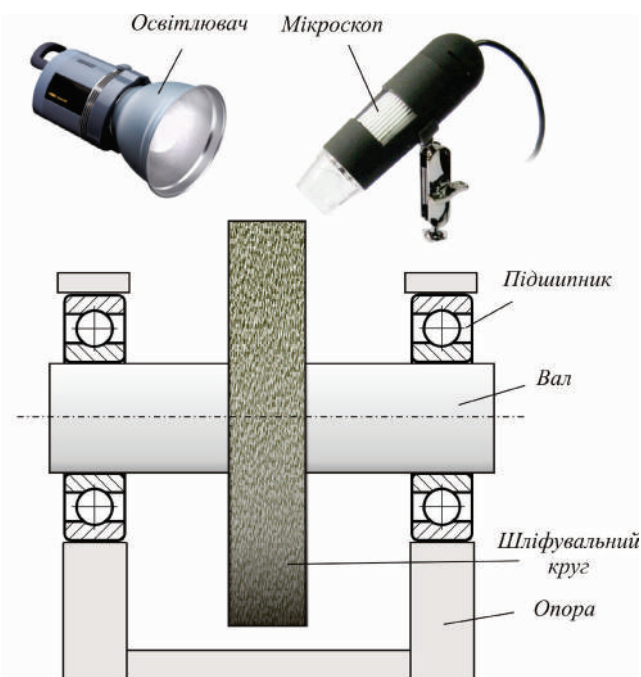


Рисунок 1 – Схема установки для визначення радіального биття шліфувального круга

розміщенням смуги різкості зображення поверхні шліфувального круга.

З метою кількісної оцінки перепадів діаметру круга на отримані знімки накладено растрову шкалу в форматі PNG. Цей формат дозволяє забезпечити прозорість певних ділянок зображення. Отримані фотографії по чергово зіставляються із шкалою і проводиться фіксація величин відхилення смуги різкості від нульової відмітки. (рис. 2).

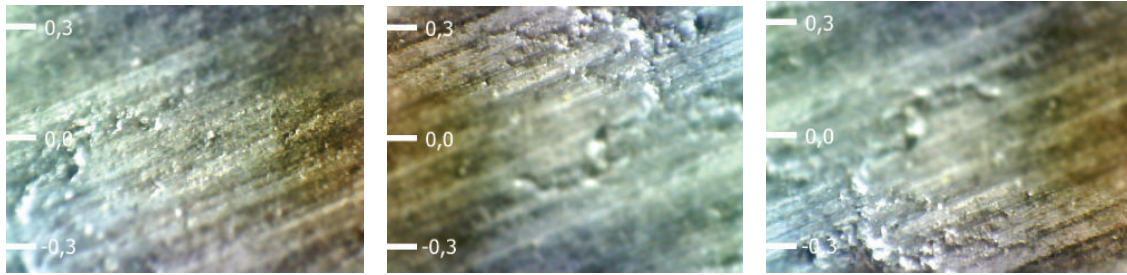


Рисунок 2 – Фотографії робочої поверхні круга з накладеною растровою шкалою

Враховуючи кут нахилу оптичної системи відносно робочої поверхні круга і кратність збільшення мікроскопу можна розрахувати величини перепадів радіусу шліфувального круга (рис. 3).

Точки O та O_1 – проєкції лінії перетину області ГРЗП та робочої поверхні інструменту при значеннях його радіусів R_{min} і R_{max} . Розрахунок величини перепаду діаметру круга OA виконується на основі відомих параметрів трикутника O_1OA : величина відрізка O_1O визначається по відповідній фотографії, а кут α – кут нахилу оптичної вісі мікроскопа до робочої поверхні круга. Таким чином, враховуючи кратність збільшення мікроскопу k , величина зміни радіуса шліфувального круга становить: $OA = (O_1O \cdot \cos\alpha)/k$.

Висновки: авторами запропоновано методику безконтактного вимірювання радіального биття шліфувальних кругів. Її перевагою є простота реалізації і низька собівартість обладнання, що використовується.

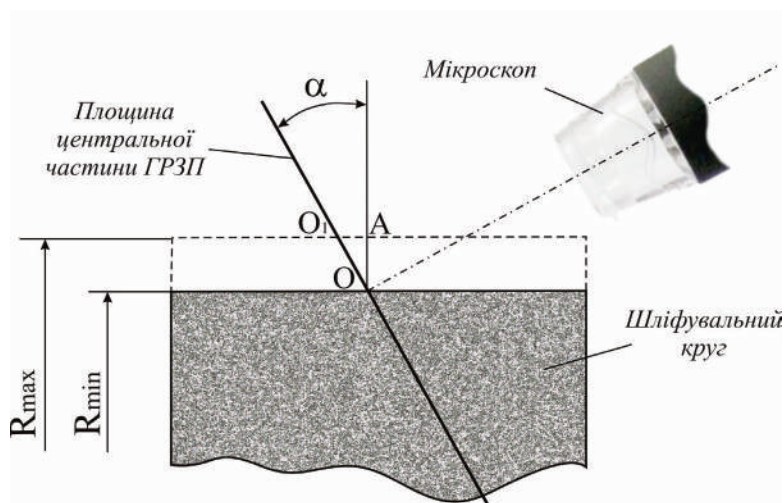


Рисунок 3 – Величина перепаду радіусу шліфувального круга

Література

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов / Байкалов А.К. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.
3. Бурдун Г.Д. Методы и средства контроля качества алмазного инструмента / Бурдун Г.Д., Суругин В.Ф., Даревский В.Г. – М.: Машиностроение, 1979. – 119 с.
4. Вейц В.Л. Вынужденные колебания в металлорежущих станках / Вейц В.Л., Доншанский В.К., Чиряев В.И. – Л.: Машигиз, 1959. – 287 с.

5. Доброскок В.Л. Повышение стабильности процесса шлифования путем управления рельефом рабочей поверхности алмазных кругов / Доброскок В.Л. – Ростов на Дону: Диссертация канд. техн. наук, 2001. – 253с.

6. Яштолд-Говорко В. А. Фотосъемка и обработка. Съемка, формулы, термины, рецепты / Яштолд-Говорко В. А. – М.: «Искусство» изд. 4-е, сокр., 1977. – 343 с.

© А.М. Шпилька

УДК 62-97/-98

*Доброскок В.Л., д.т.н., профессор
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

Шпилька А.Н. ст. вкл.

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Представлена методика измерения радиального биения шлифовальных кругов, преимуществами которой являются бесконтактность реализации, точность и простота исполнения.

Ключевые слова: *радиальное биение, шлифовальный круг, микроскоп, рельеф круга, оптическая система.*

UDK 62-97/-98

*Dobroskok V.L., Doctor of Science, professor
National technical university «Kharkiv polytechnic institute»*

Shpilka, A.N. senior lecturer

Poltava national technical university named after Yuri Kondratyuk

FINDING THE VALUE OF GRINDING WHEELS RADIAL RUNOUT

The article reviews several existing methods of analysis radial runout of the grinding wheels. There are considered a way of the wheel radial runout measurement, which is an advantage is nonengaging realization, accuracy and simplicity of accuracy.

Keywords: *radial runout, grinding wheel, microscope, wheel relief, lightwave system.*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В данной статье показано, что полимерсодержащие СОТС оказывают определяющее влияние на формирование состояния приповерхностного слоя стали в процессе ее механохимической обработки: способствуют созданию благоприятного структурно-напряженного состояния, образованию остаточных напряжений сжатия, при обработке закаленных сталей в поверхностном слое создаются специфические структуры затрудняющие развитие трещин, улучшают микрогеометрию поверхности.

В работе было выделено ряд проблем. Среди них наиболее важная – выяснение действительного состава газообразных продуктов в результате превращения полимерной присадки СОТС в зоне резания и оценка взаимодействия химических элементов, входящих в состав газа, с поверхностью обрабатываемой заготовки.

Ключевые слова: деформация и разрушение металла, адсорбционное понижение прочности, водород, трещина, пластическая деформация, хемосорбция, смазывающе-охлаждающая технологическая среда, поверхность металла.

Введение

Тема данной статьи, как следует из ее названия – физическая химия поверхностей, образующихся при механической обработке детали. Напомним, хотя это достаточно очевидно, что мы всегда имеем дело с поверхностями раздела между двумя фазами и что в общем случае на свойства этой поверхности влияет изменения в любой из двух контактирующих фаз.

В соответствии с тремя состояниями вещества, применительно для нашего случая, можно выделить следующие типы поверхности раздела:

Газ – твердое тело;

Жидкость - твердое тело,

Твердое тело – твердое тело.

Необходимым общим условием стабильного существования поверхности раздела между двумя фазами является положительное значение свободной энергии образования поверхности раздела: будь она отрицательной или нулевой, даже случайные флуктуации одной из фаз вызвало бы непрерывное расширение поверхности вплоть до полного диспергирования одного материала в другом. Примером поверхности раздела, свободная энергия которой в расчете на единицу площади такова, что диспергирующим силам не оказывается какого-либо противодействия, являются поверхности раздела между разреженными газами, или двумя смешивающимися жидкостями.

Вместе с тем, даже в случае двух не смешивающихся контактирующих фаз, например твердых тел, присутствие третьего компонента, например жидкой или газовой среды, может так изменить свободную энергию межфазовой поверхности, что становится иногда возможным самопроизвольное взаимное проникновение. Понятно, что этот процесс зависит не только от физико-механических свойств контактирующих фаз, но и от уровня действия внешнего усилия и состояния поверхности контактирующих фаз.

Исходя из этого концептуального положения рассмотрим сначала как формируется поверхность обрабатываемой стали в процессе её механохимической обработки и каково её возможное влияние на эксплуатационные показатели изготавливаемых стальных дета-

лей, а затем сравним этот процесс с формированием поверхности стали в результате ее обработки в смазочно-охлаждающих технологических средствах (СОТС) нового поколения, содержащих полимерный компонент, которые изменяют механизм обработки переноса его в плоскость механохимическую.

Обзор источников исследований и публикаций. Известно, что для обычной механической обработки стали резанием в присутствии физически активных сред эксплуатационные параметры детали во многом зависят от состояния ее поверхности. Так, если поверхность железа подвергнуть сначала механической полировки, а затем электрополировке, то характерная для слоя Бейбли структура, сменится картиной, характерной для кристаллического металла или его окисла (Рис. 1а), что в свою очередь вызовет изменение физико-механических свойств материала, а значит и эксплуатационную долговечность детали [1,2]

Влияние предыстории на состояние поверхности связано также с существованием поверхностных дефектов. Известно [3,4], что реальные кристаллы не являются совершенными; они могут состоять из микрокристаллических доменов, ограниченных плоскостями скольжения, либо включать в нормальную кристаллическую решетку множество дефектов: избыточное и недостающие слои атомов и винтовые и ступенчатые дислокации. В некоторых случаях дислокации занимают до 20% объема кристалла, обычно число выходов дислокаций на поверхность составляет $10^5 - 10^6 / \text{см}^2$, а энергия, наклоненная в них, превышает поверхностную энергию кристалла [5].

Все вышеуказанное показывает, насколько природа поверхности твердого кристаллического тела зависит от её предыстории.

Кроме этого необходимо учитывать, что при механической обработке стали, сьем режущим инструментом поверхностного слоя сопровождается не только объемными деформациями – он всегда связан с развитием новой поверхности [6]. Соответственно межатомные взаимодействия на этой обнажающей поверхности и особенно физико-химическое влияние окружающей жидкости или газовой среды приобретают важное, и во многих случаях, определяющее значение, и именно поэтому обработка твердых тел и материалов представляют собой не чисто механический, а и физико-химический процесс [7,8].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Вместе с тем, исследования в области резания металлов продолжают ограничиваться, в основном, изучением только физико-механических процессов и явлений составляющих процесс резания и исходя из анализа полученных результатов рассматривающих схему стружкообразования, определяют деформации, напряжения, силу, работу резания, и рассчитывают оптимальные режимы обработки. Очевидно, что установленные таким путем закономерности проявляются только в идеальных условиях, например, в случае глубокого вакуума, тогда как практически во всех других – в обработку металла резанием и давлением вмешиваются атмосфера и радикально вмешиваются различные составляющие СОТС [9,10].

Постановка задачи. Основной задачей работы является выяснение действительного состава газообразных продуктов в результате превращения полимерной присадки СОТС в зоне резания и оценка взаимодействия химических элементов, входящих в состав газа, с поверхностью обрабатываемой заготовки.

Основной материал и результаты. При использовании СОТС в механической обработке, когда имеют место высокие контактные давления между инструментом и обрабатываемым материалом, только наличие в СОТС поверхностно-активных компонентов (органических кислот, мыл, спиртов и др.), адсорбирующихся на новых, образующихся в процессе резания участках поверхности, в значительной мере обеспечивают их невытесняемость. Кроме этого, адсорбция компонентов СОТС и связанное с ней понижение свободной поверхностной энергии обрабатываемого металла резанием (или давлением) обеспечивают пластифицирование тончайшего поверхностного слоя вследствие понижения

поверхностного потенциального энергетического барьера, преодолеваемого дислокациями при их перемещении в приповерхностном слое. В итоге происходит не только снижение усилий механической обработки металла, но и одновременно с этим, формируются в его поверхностном слое специфические структуры, влияющие на работоспособность изделий в эксплуатационных условиях.

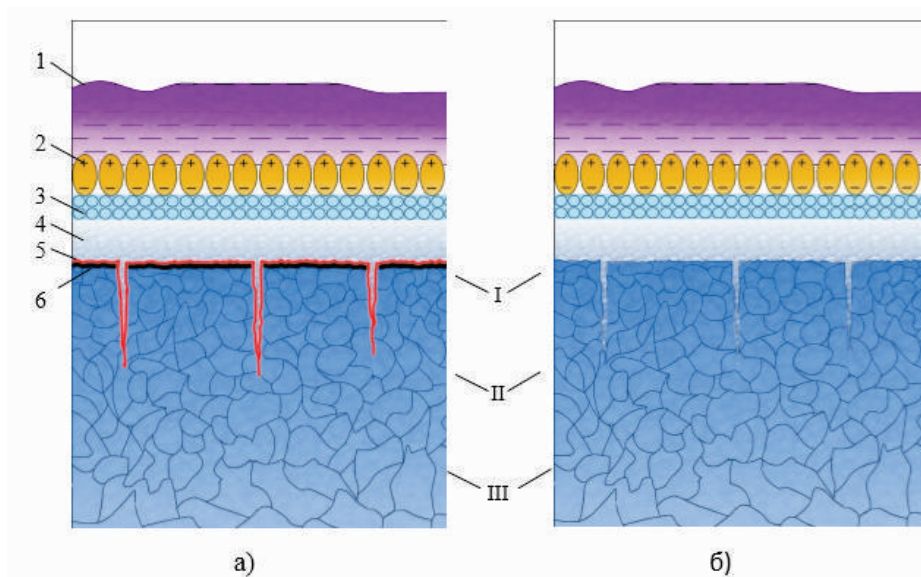


Рис. 1. Поверхность металла в зоне резания после обработки:
а) COTS; б) COTS с добавкой полимера.

- 1, ● - Ионизированные пылевые частицы;
- 2, ● - Слой жирных молекул;
- 3, ● - Слой водяных молекул;
- 4, ● - Адсорбированный слой кислородных ионов и нейтральных молекул воздуха;
- 5, ● - Оксидный слой (до 0,1 мкм);
- 6, ● - Слой Бейблери (до 0,1 мкм);
- (I), ● - Область крупномасштабной деформации – до 5 мкм.;
- (II), ● - Область слабой деформации – до 60 мкм.;
- (III), ● - Металл, не затронутый поверхностными процессами.

Следует иметь в виду, что роль поверхностно-активных сред может быть двойкой. Например, когда формирование изделия необходимо осуществить путем технологической операции снятия с металлической заготовки приповерхностного слоя, роль активных жидких и газовых сред положительная. В этом случае, как уже отмечалось, влияние окружающей среды на процессы резания начинается с поверхности заготовки и способствует облегчению процесса деформации и разрушения. И, наоборот, влияние активной среды становится отрицательным, когда сформированное механической обработкой изделие эксплуатируется при совместном влиянии на него механических нагрузок и различных сред. В этих процессах, как в первом, так и во втором случае влияние среды начинается с поверхности: в первом – с поверхности обрабатываемой заготовки, а во втором – с поверхности эксплуатируемой детали. Однако, при механической обработке ищут способы усиления влияния среды, а при эксплуатации изделий наоборот, - ищут пути уменьшения

влияния окружающей среды, хотя механизм влияния среды и в первом, и во втором случае одинаков.

Таким образом, первичное, исходное влияние жидкой или газовой среды на процессы деформации и разрушения металла происходит на его поверхности.

Во многом определяющая роль поверхности в процессах влияния среды на энергосиловые параметры деформации и разрушения металла при резании связана с тем, что поверхность затрудняет перемещение (зарождение и размножение) дислокаций, и это влияние, благодаря дальнему действию упругих полей дислокации, обнаруживает весь приповерхностный слой на глубину по крайней мере порядка средних размеров дислокационных сегментов или даже заметно большую. Этим обстоятельством и определяется то, в какой мере пластичность оказывается «поверхностным» свойством: именно в этой мере, в какой приповерхностный слой указанной глубины определяет существенную долю общего сопротивления снимаемого слоя металла приложенным усилиям в процессе резания.

Во многих случаях помеха со стороны поверхности движению приповерхностных дислокаций обуславливается наличием внешней твердой пленки, например окисной (Рис. 1а), которая в соответствии с соотношением упругих констант, может отеснять дислокации вглубь и вместе с тем препятствовать перемещению точек выхода дислокаций на поверхность.

В современных технологических операциях процесс резания, который представляет собой сложный комплекс физико-химических явлений (механических, тепловых, электрических, диффузионных и др.), происходящих при взаимодействии инструмента с материалом обрабатываемой детали в условиях больших контактных давлений и температур, осуществить без эффективных СОТС практически невозможно. Поэтому при разработке СОТС в ее состав, повышающий обрабатываемость металла, вводят различные поверхностно-активные вещества, которые путем обратимой физической адсорбции вызывают понижение прочности металла в связи с проявлением эффекта Ребиндера. Вклад этого эффекта в суммарные энергетические затраты на процесс резания достаточно весом. Однако, уже многие десятилетия попытки научного сообщества повысить результативность этого эффекта при механической обработке металлов не дают существенных положительных результатов.

Вместе с тем, достигнутые в последнее время важнейшие успехи в смежных областях науки повлекли за собой быстро углубляющееся понимание процесса разрушения твердого тела при влиянии на него различных жидких и газовых сред, что позволило предложить, разработать и внедрить некоторые составы СОТС нового поколения [11]. Высокая эффективность таких средств в одном случае достигается за счет применения при резании и шлифовании легкоплавких металлических смесей [7,12], а в другом – за счет введения в состав СОТС высокомолекулярных соединений [8,9,11].

Вероятно, высокая эффективность СОТС на полимерной основе [8] обусловлена принципиальным изменением механизма ее влияния на процессы деформации и разрушения металла, поскольку полимерный компонент СОТС в результате многостадийных пиролитических превращений, приобретает в зоне обработки химическую активность [8,9].

Такие химические превращения СОТС дали основания авторам назвать такую обработку механохимической (МХО) [10].

Именно группа явлений сопутствующих многостадийным преобразованиям макроцепи полимера до стадии низкотемпературной плазмы [8] по-видимому и формирует, при МХО физическое состояние поверхности (Рис.1б) что являлось предметом данного исследования.

Среди разнообразия процессов и явлений, которые наблюдаются при МХО, особое внимание уделялось формированию поверхности обрабатываемого металла, и поскольку при МХО, впрочем также, как и при резании в обычных СОТС, от состояния поверхности, то есть от внутреннего строения кристаллов и их внешней формы, величины зерна, хими-

ческого состава, скопления остаточных напряжений, зависят не только энергетические затраты на процесс образования стружки, но и эксплуатационные характеристики деталей.

Здесь необходимо подчеркнуть, что познание законов такого исключительно сложного по своей многоплановости и экстремальности условий протекания процесса, которым является процесс деформирования и разрушения металла в период его срезания с заготовки при непрерывном поливе жидкости с несколькими десятками растворенных и эмульгированных в ней компонентов, чрезвычайно затруднено не только по вышеотмеченным обстоятельствам, но также из-за отсутствия каких либо, пусть даже фрагментарных данных относительно соответствующего набора входных параметров (например, поля температур, давлений, концентраций, геометрии системы в зоне разрушения) без знаний которых бессмысленно строить какие бы то ни было теоретические модели.

Вместе с тем, в работе было выделено ряд проблем, решение которых, по нашему мнению, дает возможность продвинуться в правильном направлении. Среди них наиболее важная – выяснение действительного состава газообразных продуктов в результате превращения полимерной присадки СОТС в зоне резания и оценка взаимодействия химических элементов, входящих в состав газа, с поверхностью обрабатываемой заготовки.

Первоначально проводилась оценка устойчивости молекулярной массы полимерной присадки СОТС во время резания стали, поскольку такие данные могут подтвердить или опровергнуть тезис о пирополимерных превращениях присадки. Другими словами, если в процессе резания металла происходит снижение молекулярной массы полимерной присадки в СОТС, то это может быть свидетельством ее деструкции или деполимеризации и причины высокой эффективности полимерсодержащих СОТС следует искать именно в этом направлении.

Устойчивость полимерной присадки СОТС определяли в процессе сверления стали для чего через равные промежутки времени производился отбор полимера из СОТС с последующей оценкой ее молекулярной массы.

Как следует из полученных данных (Рис. 2) в процессе сверления молекулярная масса полимерной присадки СОТС (В работе исследовались полиэтилен(ПЭ) и полихлорвинил (ПВХ), которые нашли широкое применение в качестве добавок к промышленным составам СОТС и показали высокую эффективность) непрерывно снижается, т.е. в данном случае происходит деструкция макроцепей полимерной присадки.

В общем случае, механизм деструкции полимеров условно следует разделить на реакции деполимеризации или реакции последовательного отрыва мономерных звеньев от конца цепи, и реакции деструкции, обусловленные превращения заместителей [13,14]. В первом случае при расщеплении основной цепи полимера все еще сохраняются мономерные звенья, а во втором – заместители в основной цепи полимера полностью отщепляются с образованием летучих продуктов. Полученные результаты (Рис. 2) не дают возможности разделить эти процессы, идущие параллельно во время механической обработке. Поэтому, для выявления уровня влияния этих процессов проводился дифференциально-термический анализ, который осуществлялся посредством гравитермических исследований веса полимерной присадки, который измерялся в процессе ее нагрева, со скоростью 200°С в минуту от 20 до 1000°С.

Из полученных результатов (Рис.3) видно, что на дифференциальной кривой выхода летучих продуктов при термодеструкции полимера проявляется два максимума: при температурах 220 - 230°С и 450- 470°С. Сопоставляя результаты испытаний, представленные на рис. 2 и 3 можно видеть, что уже при низкой температуре ($\approx 250^{\circ}\text{C}$), т.е. на начальном этапе механической обработки наблюдается максимум выхода летучих продуктов, т.е. уже на этом этапе происходят разрывы макроцепи полимера с образованием осколков и активных радикалов. В дальнейшем, с повышением температуры в зоне резания, наблюдается второй этап расщепления цепи, который характеризуется отщеплением заместителей с образованием летучих продуктов.

Из этих данных можно сделать вывод, имеющий определенное значение для практики: если полагать, что высокая эффективность СОТС на конечной стадии превращенный полимерной присадки связана с образованием летучих продуктов, то тогда с увеличением параметров механической обработки стали будет расти и выход летучих продуктов, вызванный ростом температуры в зоне обработки и термодеструкции полимерной составляющей СОТС, что приведет к увеличению эффекта от применения таких СОТС.

Следовательно, факт непрерывного снижения молекулярной массы полимерной присадки к СОТС и выход летучих продуктов в процессе резания является свидетельством того, что под влиянием комплекса специфических условий, протекающих в зоне обработки, происходят глубокие физико-химические превращения полимерных цепей, что в основном, и является ответственным за эффект облегчения обрабатываемости стали.

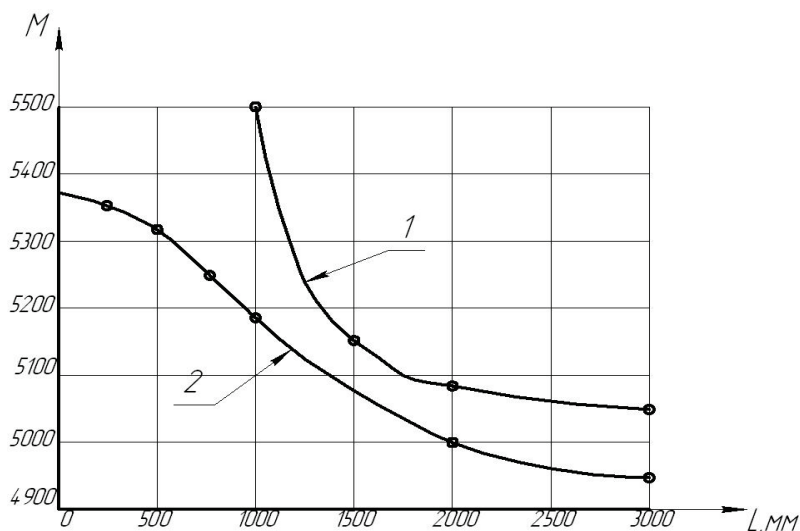


Рис.2. Изменение молекулярной массы (M) полимерной присадки ПЭ (1) и ПВХ (2) в СОТС в зависимости от глубины сверления (L) стали 9ХС (HRC 42...46), $n=720$ об/мин $S=0,2$ мм/об, сверло Р6М5 Ø 3 мм.

Состав газовой фазы, который образуется при деструкции полимера в условиях, моделирующих процесс резания т.е. в температурном диапазоне от 200 до 850°C и непосредственно в зоне резания при сверлении стали определяли на газовом хроматографе CHROM-5 (70°C, Рогарак-р, расход газа носителя 30 мл/мин.). Высокая чувствительность хроматографа позволяла идентифицировать газы в количестве не менее 10 моль.

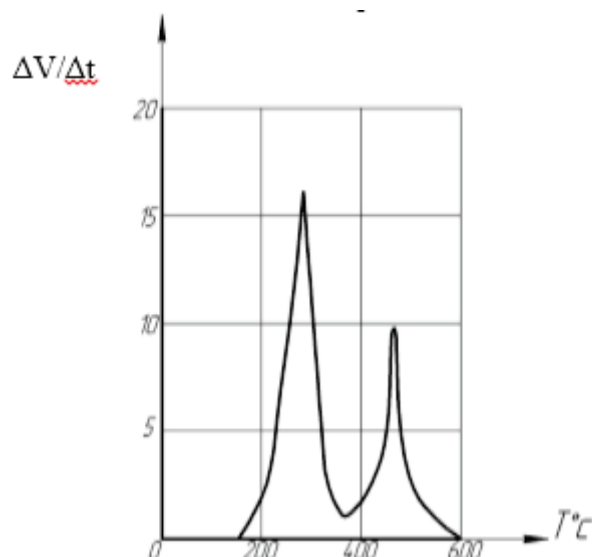


Рис. 3. Дифференциальная кривая выхода летучих продуктов ($\Delta V/\Delta t$) при пиролизе

Хроматографический анализ показал (Табл.1), что уже при температуре 220-230°C происходит интенсивное дегидрохлорирование полимера с образованием хлористого водорода, что согласуется с данными представленными на рис.3. Образование HCl становится возможным в связи отщеплением галогена и водорода у соседних звеньев макроцепи полимера [15]. Большая концентрация летучего продукта, который образуется из ПВХ уже при относительно низких температурах подтверждается также результатами других исследований [15,16].

Таблица 1. Продукты пиролиза ПВХ в условиях непрерывного подъема температуры (200° в мин.)

Температура пиролиза, °C	Продукты пиролиза	Количество молекул, %
220 - 230	Хлористый водород	99,5
	Бензол	0,2
	Другие углеводороды	0,3
450 - 470	Этен	16,6
	Этан	7,6
	Пропан	4,7
	Бутан	1,6
	Водород	0,2
	Метан	0,1
	Другие углеводороды	69,2

При более высоких температурах процесс пиролиза приобретает автокаталитический характер [15,16] с образованием ионизированного водорода, хлористого водорода, свободных радикалов и ион-радикалов [17,18].

Таким образом термодеструкция ПВХ начинается при низких температурах и уже в области температур 220-230°C наблюдается максимальный выход хлористого водорода и образуется небольшое количество непредельных углеводородов.

При более высоких температурах (выше 400°C) происходит карбонизация, приводящая к образованию свободного углерода [17]. Таким образом на последнем этапе деструкции полимерной присадки входящей в состав СОТС образуется смесь высокоактивных

газообразных продуктов насыщенных и перенасыщенных углеводородов, водорода, жидких углеводородов и углеродистого остатка с высокой концентрацией углерода.

Результаты дифференциально-термического анализа полиэтилена наиболее распространенной присадки в СОТС, несколько отличается от ПВХ. В этом случае полимер термостойчив до температуры 290°C. При дальнейшем подъеме температуры молекулярная масса ПЭ снижается незначительно и адекватно этому растет и выход газообразных продуктов, но уже при температуре 350°C наблюдается интенсивное образование газообразных веществ.

Таким образом, на последних этапах пиролитических превращений ПВХ и ПЭ, определяемых температурным диапазоном, примерно 250 – 350°C, (что легко достигается в зоне резания), образуется максимальное количество водорода (хлористого водорода) и углерода – веществ, обуславливающих, высокую эффективность полимерсодержащих СОТС. Следует отметить, что полученные результаты согласуются с данными приведенными в работах [18,19].

Для определения состава газообразующих продуктов пиролиза полимерной присадки и изучения влияния каждого химического элемента или соединения, входящих в состав газовой смеси, на их трибологическую активность при механической обработке стали была спроектирована и изготовлена специальная вакуумная камера – приставка к токарному станку. Испытания в камере давали возможность: отбирать пробы газа, образующегося при механической обработке для хроматографического анализа и проводить механическую обработку стали в контролируемом газовом составе с автоматической записью крутящего момента.

Обрабатываемой заготовкой являлся трубчатый образец из стали 45 диаметром 38 мм. Устройство для измерения крутящего момента состоит из измерительного моста и усилительно-измерительной аппаратуры. В качестве измерительного элемента служит тензометрическая балка с наклеенными тензодатчиками.

Результаты хроматографического анализа газообразных продуктов, образующихся при пиролизе полиэтиленовой эмульсии и сверления стали в СОТС с добавкой эмульсионного полиэтилена (таблица 2) свидетельствуют о том, что кроме высококипящих фракций (поз. 8, 9 и 10), которые отсутствуют при сверлении, состав газовой смеси одинаков как при пиролизе, так и при сверлении.

Таблица 2. Результаты хроматографического анализа газообразных продуктов.

№	Пиролиз	Сверление		Время удерживания, в сек.	Продукты реакции
	ПЭ эм.	ПЭ эм.	ПЭ + вода		
1	17	16	17	17	метан
2	-	28	-	30	этилен
3	30	33	34	34	этан
4	99	96	105	96	пропилен
5	145	-	-	105	пропан
6	400	400	410	400	изобутен
7	1260	1280	1200	1290	ацетон
8	1650	-	-	1620	пентен
9	4380	-	-	4350	гексен
10	6690	-	-	6630	гексан

Отсутствие фракций пентана, гексена и гексана в газовой смеси, образующейся при резании, вероятно, следует связывать с каталитической активностью чистых поверхностей стали возникающих в процессе ее механической обработке.

Аналогичные данные получены также в опытах по пиролизу и сверлению стали в среде поливинилхлоридных эмульсий. Отличие состоит лишь в наличии в составах газовой фракции хлорсодержащих углеводородов.

В вакуумной камере исследовалось также влияние большинства компонентов газовой смеси, приведенных в табл.2. на параметры резания стали.

Механическая обработка образца осуществлялась в воздухе, вакууме (10^5 мм.рт.ст.) и в химических соединениях, составляющих газовую смесь. Результаты этих исследований представлены на рис. 4, где показаны фрагменты записи крутящего момента, возникающего при сверлении стали в различных условиях.

Анализ этих результатов позволяют сделать следующие выводы:

- крутящий момент при обработке не зависит от давления газа в камере (в которых проводились испытания) в интервале от 5 до 100 мм.рт.ст.;

- в ряду изученных химических соединений крутящий момент при сверлении практически не зависит от природы веществ;

- все изученные продукты деструкции полимерной присадки в СОТС в процессе сверления демонстрируют, по сравнению с воздухом и вакуумом, снижение крутящего момента, примерно, на 50-60%;

- среди соединений, образующихся при резании стали в атмосфере каждого из изученных газов, не обнаружено никаких веществ, которые бы не находились среди продуктов пиролиза исходной присадки.

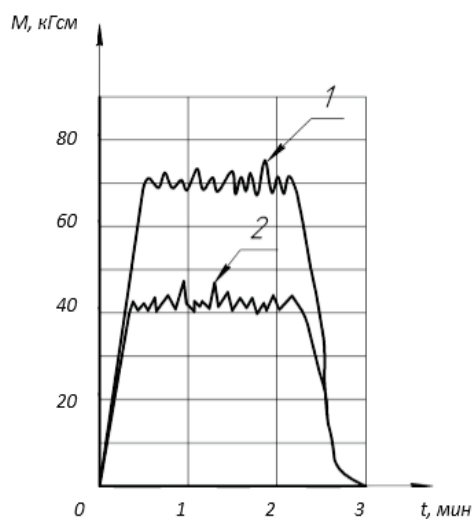


Рис. 4. Значения крутящего момента (М), возникающего при сверлении стали в гермокамере в различных химических соединений: 1 – вакуум; 2 – этилен, пропан, ацетон, бензол, толуол, четыреххлористый углерод.

При механической обработке стали в атмосфере ацетона, бензола, толуола, этилена, пропана, метана, пропилена, изобутана, гексана, пентена, нет высокомолекулярных непредельных углеводородов, что позволяет полагать, что такие соединения образуются в результате термомеханодеструкции исходных полимерных присадок, а не от каких-либо промежуточных продуктов.

Как известно, между величиной крутящего момента и характеристиками износа инструмента в более или менее широком интервале параметров резания наблюдается определенная линейная корреляция. Следовательно, любой из исследованных компонентов может быть ответственен за снижение износа инструмента при использовании СОТС с полимерной присадкой по крайней мере вдвое (Рис.4). С другой стороны, отсутствие какой-либо заметной зависимости крутящего момента от природы углеводородного газа указывает на единство природы элементарных актов, лежащих в основе трибохимического эффекта.

В связи с этим, можно допустить, что в зоне резания, вблизи режущей кромки, в условиях высоких температур, сдвиговых нагрузок и наличия экзoeлектронной эмиссии любой из исследуемых химических элементов может деструктировать до состояния химической плазмы с существенным преобладанием активных форм водорода и углерода (для ПЭ) и водорода, углерода и хлора (для ПВХ).

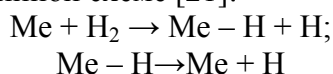
Вместе с тем органические вещества входящие в состав газовой смеси образующейся при механической обработке имеют различное химическое строение и свойства, а значит их влияние на процессы деформации и разрушения не могут вызывать одинаковый эффект (возможно для более тонкой оценки нужны более тонкие методы исследования). Поскольку факты свидетельствуют об обратном, то правомерен вывод о том, что газовая смесь является средой, представляющая собой на этапах пиролитических и механохимических превращений только промежуточный продукт, подвергаемый дальнейшим химическим преобразованиям. Подтверждением этому могут быть следующие результаты исследований.

Известно [18], что при контакте органической молекулы с нагретой металлической поверхностью (срезаемый слой металла) в зависимости от природы молекулы, состояния металлической поверхности и температуры, ее контакт может быть эффективным, либо не эффективным даже при очень высокой температуре (около 1900°C).

Например, при столкновении молекулы C₂H₂ с металлом (вольфрамом) нагретым до высокой температуры (1000°C), она прилипает к металлу одним из своих углеродных атомов, что приводит к локальному образованию карбида; другие атомы молекулы (водород) должны в этом случае немедленно перераспределяться между собой и вылететь в объем в виде более простых молекул (например H₂ в случае C₂H₂ и H₂ и CO в случае CH₃CHO и CH₃COCH₃); свободные радикалы при этом не образуются [19].

В результате этого поверхность металла будет науглероживаться, реакция при этом замедляется, а затем и вовсе прекращается и поверхность станет полностью инертной. В тоже время поскольку при резании стали непрерывно образуются новые ювенильные каталитически активные поверхности, химические превращения на новых поверхностях будут происходить непрерывно. Таким образом, в данном случае прослеживаются механизм каталитических реакций на конечном этапе которых образуется водород.

Способность поверхности сильно нагретых металлов генерировать в объем свободные атомы известна со временем ранних работ Ленгмюра на основе которых был создан один из простых методов получения атомарного водорода в малых количествах. В этом случае процесс идет по двухстадийной схеме [21]:



На возможность протекания аналогичного процесса при механохимической обработке, дает основание тот факт, что в этот процесс вмешивается непрерывно обнажающаяся в результате механической обработки ювенальная поверхность.

Изучение хемосорбции и простых химических реакций на поверхности металлов, подвергнутых ультравакуумной очистке (10⁻¹⁰ мм.рт.ст.), показало [22], что при этом достигается весьма значительное повышение химической активности молекул. Хемосорбция водорода, азота и кислорода и диссоциация на атомы уже при температуре жидкого воздуха - 188°C (в некоторых случаях и при температуре сжижения водорода - 253°C) протекает очень быстро, практически без энергии активации.

В нашем случае атомы чистой поверхности металла ведут себя так, как если бы каждый из них обладал одной, или более свободной валентностью [21]. На модельном языке химии скорее следует говорить об образовании между поверхностными атомами решетки большого числа дополнительных непрочных связей, легко разрывающихся при адсорбции. Дальнейшие исследования подтвердили это предположение.

Методом ОЖЕ – спектроскопии исследовалась поверхность металла после точения в полимерсодержащих СОТС. Анализ результатов, полученных в результате исследования поверхности металлов (СТ 45, Fe, Ti, Co, Ni, Mo) после их обработки в полимерсодержащих СОТС показал (рис. 5), что поверхность всех исследованных металлов практически полностью покрыта атомами углерода, концентрация которого постепенно убывает по мере удаления от поверхности.

В то же время, результаты спектрального анализа поверхности стали после резания в СОТС с добавкой полимера свидетельствуют о том, что на ней кроме углерода, содержится большая концентрация водорода [8]. Следовательно, на обнажающейся каталитически активной поверхности обрабатываемого металла в результате контакта органических соединений, входящих в состав газовой смеси, происходит химическая реакция с образованием водорода и углерода.

Таким образом полученные результаты позволяют полагать, что при механохимической обработке металла в зоне резания (вблизи режущей кромки инструмента) под влиянием высокой температуры и сдвиговых нагрузок происходит деструкция макроцепи полиэтилена входящего в состав СОТС с образованием газовой смеси, состоящей из химических элементов, содержащихся в макроцепи полимера, в различных сочетаниях водорода и углерода от C, до C₇₀. Если в качестве присадки к СОТС применяется ПВХ, то в состав смеси добавляется еще и соединение хлора.

Следовательно, непрерывное образование новой, ювенильной поверхности в процессе резания, обладающей высокой каталитической способностью, приводит к непрерывному катализу на этой поверхности химических элементов из газовой фазы с образованием химической плазмы, содержащей в активной форме атомы, входящие в состав полимерной присадки в СОТС. Процесс образования плазмы может ускоряться в результате столкновения химических элементов с электронами, эмиссия которых происходит в результате разрушения металла.

Возникающий на последней стадии физико-химических процессов водород, как известно [17,18], наиболее сильно из всех химических элементов облегчает процессы деформации и разрушения, что и обеспечивает чрезвычайно высокую эффективность СОТС на полимерной основе.

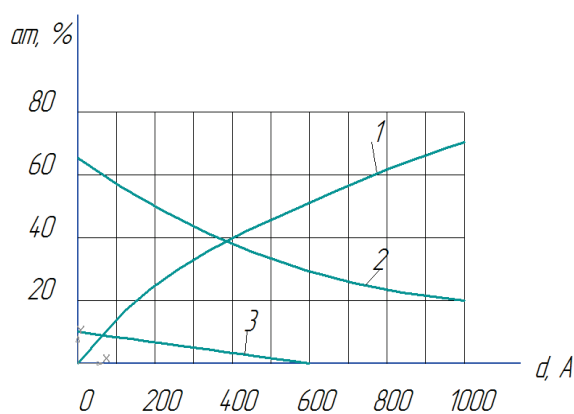


Рис. 5. Распределение химических элементов в поверхностном слое стали 45 твердостью HRC 42 после точения полимерсодержащей СОТС на основе ПЭ: 1 – железо; 2 – углерод; 3 – кислород. Режим обработки: резец ВК – б: $v=8,3 \text{ с}^{-1}$, $t=0,8 \text{ мм}$, $s=0,1 \text{ мм/об}$. Перед ОЖЕ – спектроскопией образцы подвергли ультразвуковой очистке в течении 7 мин и последующей выдержке в инертной атмосфере при $125 \text{ }^\circ \text{C}$ в течении 30 мин.

Различное состояние водорода в металле изменяет характер его адсорбции и поэтому может приводить к различному влиянию на процессы деформации и разрушения металла. Например, адсорбция водорода в виде H₂ не оказывает значительного влияния на прочностные характеристики и обрабатываемость металла [23], тогда как наибольшее влияние

вызывают ионы Н. Водород в виде Н⁺ хотя и изменяет прочностные свойства в меньшей степени, чем Н⁻, однако при ионизации водорода отрицательных ионов образуется значительно меньше, чем положительных. Так, например, при потенциале ионизации 180 эв на каждый положительный ион водорода возникает всего $0,1 \cdot 10^{-4}$ отрицательных [24,25]. Поэтому суммарный эффект от влияния Н⁺ получается значительно большим, чем от Н⁻ [26].

Следует иметь в виду, что прочность зависит не только от формы состояния водорода, но и от состояния поверхности деформируемого материала, поскольку поверхность одного и того же металла в связи с ее мозаичностью в отдельных микрообластях, обладает различными свойствами. Так, например, не все атомы на поверхности твердого тела находятся в одинаковых условиях; те из них, которые на острых выступах и шероховатостях, богаче энергией, чем атомы с нормальным числом ближайших соседей, и, следовательно, обладают избыточной поверхностной энергией и относительно высокой подвижностью. Кроме того, поскольку при наличии выступов микроскопического и молекулярного масштаба реальная площадь первоначального контакта между зернами мала, весьма вероятно, что даже при слабом внешнем давлении режущей кромки инструмента развиваются локальные давления, превышающие предел текучести, в результате чего микровыступы подвергаются пластической деформации. А уже при более высоком давлении в точках контакта передней и задней поверхности инструмента с металлом, локальная температура легко достигает температуры плавления обрабатываемого металла и возможно образование довольно глубокого и практически аморфного слоя (Рис. 1а) [27].

Таким образом, в связи со значительным различием физических, химических и механических свойств поверхности обрабатываемого материала, и режущего инструмента, а также химического состава СОТС, катализ образующихся продуктов на обнажающейся поверхности и образование водорода будет происходить с различной интенсивностью, а значит и эффективностью СОТС.

Что касается углерода, который накапливается в процессе механической обработки на поверхности режущего инструмента, то он, с одной стороны, играет роль смазки, разделяя трущиеся поверхности, а с другой, диффундируя в режущие кромки инструмента, повышает их износостойкость за счет образования твердых карбидных фаз [28].

Таким образом, формирование состояния поверхности, которая образуется в процессе резания полимерсодержащих СОТС, происходит в результате сложного комплекса физико-химических явлений (механических, тепловых, электрических, адсорбционных, диффузионных и др.), которые сопровождают взаимодействие инструмента с обрабатываемым металлом в условиях больших контактных давлений, температур и влияния активных форм водорода, и углерода (для ПЭ) или хлористого водорода, водорода и углерода (для ПВХ). Разнообразие сложных физико-химических явлений и процессов протекающих в зоне механохимической обработки стали во многом и определяет степень проявления эффекта от применения полимерсодержащих СОТС, что открывает возможность гибко варьировать условиями, в которых осуществляется обработка, управлять как в направлении усиления полезных, так и ослабления отрицательных факторов обуславливающих эффективность механохимической обработки.

Поскольку процесс резания принято считать процессом превалирующего пластического деформирования в энергетическом балансе которого до 90% и более приходится именно на работу пластической деформации срезаемого слоя, то и высокую эффективность полимерсодержащих СОТС следует отнести на счет их большого влияния на эту деформацию, а также на формирование приповерхностного слоя обработанного материала. В связи с этим представляет интерес выяснить механизм влияния различных форм состояния водорода именно на протекания пластической деформации.

Известно, что свойства поверхностного слоя начинают формироваться в зоне опережающего упрочнения (Рис.6). Сопутствующая ему пластичная деформация при контакте с

задней поверхностью резца вносит дополнительный вклад в общее упрочнение обработанной поверхности.

Поскольку при механохимической обработке водород снижает усилие резания и облегчает протекание процесса деформирования и разрушения [8,9], то в результате этого происходит улучшение качества поверхности (Рис. 7) и снижение микротвердости (Рис. 8, табл.3).



Рис.6 Структура пластически деформированной зоны стали 9XC (увеличение 100)

Характерным для полученных данных является то, что хотя введение полимера в жидкость приводит к снижению микротвердости на поверхности стали после механической обработки, однако уже на глубине, примерно, 10 мкм микротвердость после обработки с полимером становится больше, чем в среде без полимера

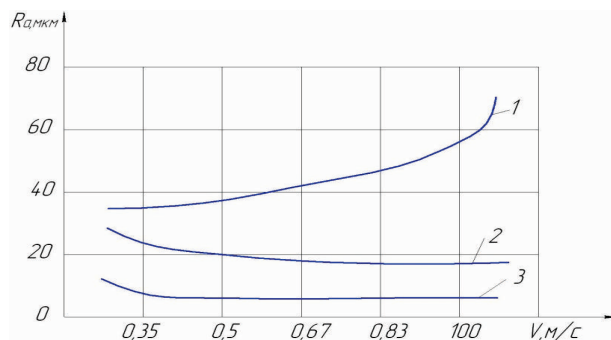


Рис. 7. Изменение шероховатости (Ra) обработанных образцов из стали 9XC (HRC 46...49) от скорости точения (v): 1 – в воде; 2 – в газообразном водороде; 3 – в воде с добавкой ПВХ (1,5%). Режимы резания: $S=0,25$ мм/об, $t=1$ мм: резец T15K6.

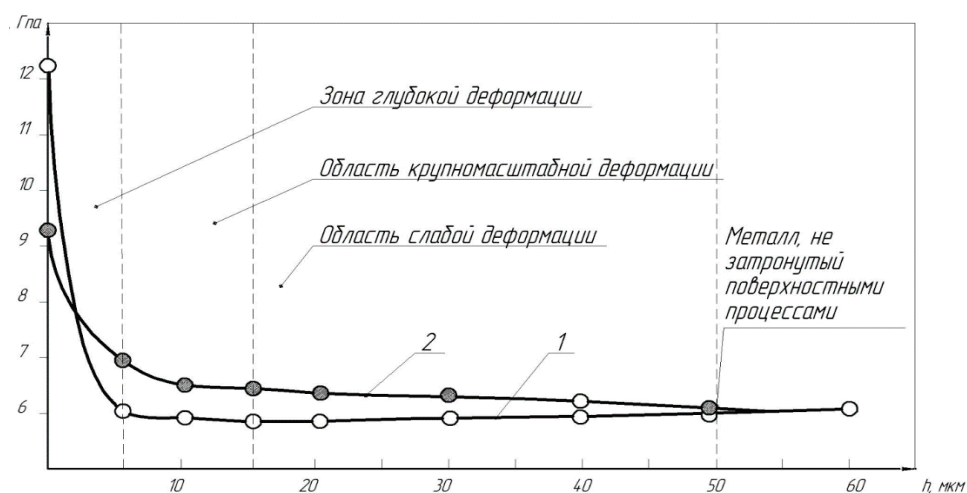


Рис. 8. Микротвердость H_v , после механической обработки стали (точения):

1 – в СОТС; 2 – в СОТС с добавкой полимера

Причем повышение микротвердости сохраняется на сравнительно большом расстоянии от поверхности (35 мкм). Аналогичный характер распределения H_{μ} , имеет место и для других структур, хотя по величине микротвердости наблюдается большое различие.

Например, при точении стали 9ХС различной твердости в различных средах, в поверхностном слое образцов образуются упрочненные слои различной глубины (Табл.3 и 4). На стали сорбитной (HRC 38-37), и тростиной структуры (HRC 38-37) глубина упрочненного слоя достигается 35-40 мкм и в микроструктуре обнаруживаются пластически деформированные слои более высокой микротвердости по сравнению с сердцевиной образца. В образцах из стали мартенситной структуры (HRC 57...64), образуются нетравящиеся белые слои глубиной до 10 мкм. Глубина упрочненных слоев при точении с увеличением подачи возрастает от 3 до 10 мкм. Они представляют собой карбиды, остаточный аустенит, размер частиц которого на порядок меньше по сравнению с обычной закалкой, и сильно дисперсный мартенсит [29,30]. Механизм воздействия водорода и других активных низкомолекулярных углеводородов, образующихся в результате деструкции полимерной составляющей, на формирование белых слоев пока неясен и требует отдельных исследований.

Таблица 3. Микротвердости H_{μ} (ГПа) на поверхности стали 9 ХС после точения в различных средах

Твердость HRC	Среда			
	Вода	Масло и-12	Вода + 1,5% латекс ПВХ	И – 12+1.5% ПЭ
63...64	14.1	10.8	12.4	8.3
57...58	12.1	7.5	9.7	5.3
36...37	7.5	5.9	5.1	4.8
10...32	4.8	4.6	4.5	4.2

Вместе с тем, при обработке закаленных дисперсно-упрочняемых сталей, дополнительное упрочнение, по-видимому, происходит в результате накопления большого числа дислокаций, движение которых тормозится локальными выделениями [31,32].

Таким образом, формирование микрорельефа обработанной поверхности при резании в полимерсодержащих СОТС следует рассматривать как результат одновременного проявления различных механизмов: пластической деформации у вершины движущейся трещины, ее ветвления и пластической деформации происходящей при трении задней поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью [34]. На интенсивность протекания этих процессов активное влияние оказывают низкомолекулярные продукты, образующиеся при деструкции полимерной компоненты СОТС.

Одной из основных физико-механических характеристик состояния поверхности, формируемого механической обработкой, является также знак и величина остаточных напряжений.

Так, шлифование стали сорбитной структуры в полимерсодержащей СОТС вызывает в поверхностных слоях образцов остаточные напряжения сжатия (рис.9), в то время как шлифование в СОТС без полимерной добавки – остаточные напряжения растяжения, ухудшающие работоспособность, в частности, сопротивление усталости [30].

Возникновение растягивающих напряжений свидетельствует об уменьшении в поверхностных слоях удельного объема металла, которое может иметь место, например, при отпуске. При шлифовании в полимерсодержащей СОТС остаточные напряжения сжатия возникают в связи с увеличением наклепа (степени деформации), насыщения углеродом и другими элементами, что, наоборот, приводит к увеличению удельного объема обрабатываемого металла.

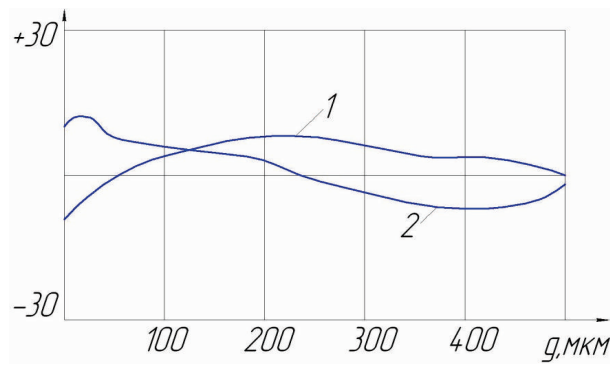


Рис. 9. Эпюра остаточных напряжений первого рода после шлифования образцов из стали 9ХС (УНС 36...38) в: 1-воде с добавкой ПВХ (1%); 2-воде.

Шлифование в воде по сравнению со шлифованием в полимерсодержащей СОТС сопровождается более значительной температурой и давлением в зоне контакта абразивный круг – деталь. При этом растет структурная неоднородность, увеличивается количество остаточного аустенита, образовавшегося в результате вторичной закалки, а увеличение блоков мозаики в поверхностных слоях образцов после шлифования в воде, по-видимому, вызвано отпуском стали (табл. 4).

Таблица 4. Тонкая кристаллическая структура стали после шлифования в различных средах.

Сталь	Среда	Величина блоков, нм	Искажения второго рода, дельта % , 10^8	Количество остаточного аустенита, %
9ХС НРС 36...38	вода	26,67	3,70	5
	вода + латекс ПВХ (1%)	16,40	1,05	не обнаружен

Если увеличение блоков мозаики в основном можно объяснить влиянием более высокой температуры, возникающей в зоне обработки при шлифовании в воде по сравнению со шлифованием в полимерсодержащей СОТС, то на рост искажений второго рода оказал влияние не только температурный фактор, но и более высокий уровень механических напряжений в приповерхностных слоях материала.

Выводы.

Таким образом, полимерсодержащие СОТС оказывают определяющее влияние на формирование состояния приповерхностного слоя стали в процессе ее механохимической обработки: способствуют созданию благоприятного структурно-напряженного состояния, образованию остаточных напряжений сжатия, при обработке закаленных сталей в поверхностном слое создаются специфические структуры затрудняющие развитие трещин, улучшают микрогеометрию поверхности.

В целом, механохимическая обработка создает такое структурно-напряженное состояние на поверхности стальных деталей, которое способствует повышению их работоспособности во время эксплуатации [11].

В заключении необходимо отметить, что все вышеизложенные представления о процессах и явлениях, наблюдаемых в поверхностном слое материала при его деформации и разрушении в активных средах, соблюдаются в том случае если дефекты материала имеют выход на внешнюю поверхность деформируемого тела, а в кинетическом процессе развития новой поверхности микротрещины она успевает покрываться адсорбционным слоем поверхностно-активных молекул. Только в этом случае развитие деформации и разрушение будет происходить при меньшем напряжении.

Литература

1. Г.В.Карпенко, Р.И.Крипякевич. Влияние на водорозжижения в процессе деформации стали на ее механические свойства. // ФХММ,-Киев.-Наук.думка-№5, -1977-с.75
2. I.I.Trillat., CR 224,1102 (1947)
3. W.J.Dunning, in Adhesion, Eley D.D., ed, Oxford University Press, 1961
4. A.W.Adamson, American Society of testing and materials, Special Technical Publication №340, 1962, p.32
5. J.E.Bailey, P.V.Hirsch, Phil.Mag.,5 , 485 (1960)
6. В.И.Лихтман, Е.Д.Щукин, П.А.Ребиндер. Физико-химическая механика материалов, изд. Ан СССР, М., 1962, с.303
7. Е.Д.Щукин, Л.С.Брюханова, З.М.Полукарова, Н.В.Перцов, ФХММ, Киев, Научна Думка, 12, № 4, 1976, с.43
8. А.И.Сошко, В.А.Сошко. Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металлов. Изд. Олди-плюс, Херсон, 2008, 2, с.388
9. А.И.Сошко. Механохимическая обработка металлов. Полимеры в технологических процессах обработки металлов.- Киев, 1977, с.16
10. А.И.Сошко, Я.Е.Шкарапата, О некоторых закономерностях влияния полимерсодержащих технологических составов на обработку металлов резанием, ФХММ, К.Изд. Наукова Думка, № 5, 1985, с.89
11. Справочник. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием, под ред. Энтелиса С.Г. – Машиностроение. М. – 1986, с. 352
12. Е.Д.Щукин. Понижение поверхностных энергий и изменения механических свойств твердых тел под влиянием окружающей среды, ФХММ, Киев, Изд. Наукова Думка, № 3, 1986, с.19
13. W.G.Oakes, R.B.Richards, Soe. 1956, с.3929
14. Химические реакции полимеров. Под редакцией Е.Феттеса, перевод с английского, Изд. Мир, М., Т.2, 1967, с.519
15. С.В.Havens, Ref. 43 , p.107
16. A.S.Kenyon, Ref. 43 , p.69
17. P.E.Bertsch Rubb. Norld. 1961, 144, p.33
18. Lenoiz Rech aeronaut, 1953, №36, p.36
19. P.Le Goff, M.Letort, R.Acad.Sci., 239, 1954, p.970
20. P.Le Goff, M.Letort, J.Chen.Phys., 54, 1957, p. 103
21. С.З.Рачинский. Теоретические основы контактного анализа, ч. 1-2, М. изд. АН СССР, 1936, с. 179
22. С.З.Рачинский сб. Строение вещества и спектрокопия, М., Изд. АН СССР, 1960, с.277
23. И.И.Василенко, М.Г.Хитаршвили. Влияние газообразного водорода на прочность стали, Физико – химическая механика материалов. - № 2, 1969, 178 с
24. А.Энгель, М.Штейнбек, Физика и техника электрического разряда в газах, изд. НИИП СССР, 1935, с. 117
25. А.Энгель, Ионизированные газы, Физматгиз, 1959, 173 с
26. В.П.Грановский, Электрический ток в газе, т.1, Техиздат, 1952, с.77
27. Ф.П.Боуден, Тейбор, Трение и смазка, М., Машигиз, 1960, с. 173
28. Э.А.Станчук, А.И.Сошко Повышение стойкости режущих инструментов диффузионным насыщением в процессе работы. Труды Николаевского кораблестроительного института 1981, 174, с.56
29. Развитие науки о резании металлов. Под ред. Н.Н.Зорева, Г.И.Грановского, М.Н.Ларина. М., Машиностроение, 1967, 416с.
30. Ю.Н.Бабей. Физические основы импульсного упрочнения сталей и чугуна, - Киев, Наук.Думка, 1988. – 246с
31. О.З.Бокштейн. Строения и свойства металлических сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – с.367
32. М.В.Захаров, А.М.Захаров. Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия, 1972, - с. 273
33. Л.С.Фризель. Наклеп и распространение трещин. Атомный механизм разрушения. – М.: Металлургия, 1967. – с.286

УДК 621.7\9

Сошко В.А., к.т.н., доцент,
Сімінченко І.П., старший викладач.
Херсонський національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТАНУ ПОВЕРХНІ СТАЛІ В ПРОЦЕСІ МЕХАНОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ

В даній статті показано, що полімервмісні МОТЗ роблять визначальний вплив на формування стану приповерхневого шару сталі в процесі її механохімічної обробки: сприяють створенню сприятливого структурно-напруженого стану, утворенню залишкових напружень стиску, при обробці загартованих сталей в поверхневому шарі створюються специфічні структури ускладнюють розвиток тріщин, покращують мікрогеометрію поверхні.

В роботі було виділено ряд проблем. Серед них найбільш важлива - з'ясування дійсного складу газоподібних продуктів в результаті перетворення полімерної присадки СОТС в зоні різання і оцінка взаємодії хімічних елементів, що входять до складу газу, з поверхнею оброблюваної заготовки.

Ключові слова: Деформація і руйнування металу, адсорбційне пониження міцності, водень, тріщина, пластична деформація, хемосорбція, смазуюче-охолоджуюча технологічна середу, поверхню металу.

UDC 621.7\9

Soshko VA, Ph.D., Associate Professor,
Siminchenko IP, Senior Lecturer.
Kherson National Technical University

FEATURES OF THE FORMATION OF THE STATE OF SURFACE STEEL DURING MECHANOCHEMICAL TREATMENT

In this paper, it is shown that polymer-SOTS have a decisive influence on the formation of the state of the surface layer of the steel during its mechanochemical treatment: help to create a favorable structurally stressed state, the formation of residual compressive stresses in the processing of hardened steel in the surface layer are specific structures impede the development of cracks, improve the surface microgeometry.

The paper has been allocated a number of problems. Among them, the most important - finding the actual composition of the gaseous products from the conversion of the polymer additive SOTS in the cutting area, and evaluation of the interaction of the chemical elements that make up the gas with the surface of the workpiece.

Keywords: Deformation and fracture of metal adsorption decrease in strength, hydrogen, crack, plastic deformation, chemisorption, lubricating and cooling the process fluid, the surface of the metal.

АНАЛІЗУВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МОДЕЛЮВАННЯ КОСМІЧНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розглянуто життєвий цикл моделювання космічних літальних апаратів та побудовано його ймовірнісну модель. Запропоновано систему рівнянь Колмогорова, що визначає потоки ймовірностей станів моделі життєвого циклу. Досліджено тривалості ітерацій етапів життєвого циклу, ймовірності внесення дефектів під час виконання реальних програмних проєктів та їх вплив на програмні ризики. Досліджено чисельні розв'язки математичної моделі життєвого циклу моделювання космічних літальних апаратів для різноманітних вхідних даних. Запропоновано способи зменшення ризиків.

Ключові слова: математична модель, життєвий цикл моделювання, рівняння Колмогорова, верифікація програмного забезпечення.

Вступ

Розроблення об'єктів космічної техніки вимагає надавати велику увагу якості програмного забезпечення (ПЗ) їх систем керування, що реалізує значну частку функціональності. Для цього використовують складну багатоконтурну та багатоетапну технологію розроблення програмних комплексів, якій властиві досить значні ризики, що характеризуються ймовірністю небажаних подій та пов'язаними з ними втратами. Ці ризики стосуються не тільки розроблення неадекватних моделей космічних літальних апаратів (КЛА) та некоректного ПЗ, що формує функціональність систем керування, але й втрат самих літальних апаратів.

Ось чому сьогодні є актуальним розроблення та дослідження математичної моделі життєвого циклу моделювання космічних літальних апаратів (КЛА), що дозволить не тільки кількісно оцінити ризики, але й надати певних рекомендацій щодо їх зменшення.

Огляд останніх джерел і публікацій

На першому етапі ЖЦ [1] моделювання КЛА створюється математична модель (ММ) об'єкту керування. На підставі якої розробляється програмна модель (ПМ) об'єкту. Далі – розробляються моделі алгоритмів системи керування, які тестуються на моделі об'єкту. Потім модель об'єкту використовується для верифікації вбудованого ПЗ та супроводу космічної техніки під час життєвого циклу [2]. Нерідко розроблення ПЗ системи керування потребує використання кількох моделей об'єктів, наприклад через зміну механічних характеристик апарату під час експлуатації. Крім того ПМ майбутнього космічного апарату дозволяє адаптувати або повторно використати вже існуюче ПЗ для створення нової системи керування, що значно зменшує час розроблення космічної системи. Таким чином, для створення якісного ПЗ систем керування та зменшення різноманітних ризиків дуже важливо мати математичну та програмну моделі КЛА.

Слід відмітити, що математичними моделями космічних апаратів [3,4] є найчастіше системи диференційних рівнянь, що характеризуються нелінійністю, високим порядком та жорсткістю [5, 6]. Це вимагає використання спеціальних методів інтегрування [7,8], що обумовлює досить високі ризики.

Таким чином, розроблення адекватних моделей об'єктів космічної техніки є актуальною задачею, що дозволяє зменшити ризики під час життєвого циклу складних космічних систем.

На першому етапі формуються вимоги користувача до ММ об'єкту та сукупність приймально-здавальних тестів за допомогою яких буде здійснюватися верифікація математичної та програмної моделей. По закінченню формування вимог користувача розпочинається математичне проектування, метою якого є побудова математичної моделі, що є адекватною реальному об'єкту. На цьому етапі формується система диференціальних або інтегро-диференціальних рівнянь, яка у разі необхідності лінеаризується та обов'язково досліджується на стійкість. У певних випадках цей етап потребує додаткового уточнення вимог користувача. Після чого формується лінійна ММ на підставі якої розпочинається розроблення ПМ, відповідність якої математичній моделі перевіряється за допомогою функціональних та математичних тестів на етапі автономного моделювання. Початкові дані для автономного моделювання формуються на підставі характеристик об'єкту, які визначаються за результатами досліджень поведінки реального космічного об'єкту або його фізичної моделі. За результатами верифікації може відбуватися додаткове корегування програмної або математичної моделі космічного апарату. Результатом ЖЦ є програмна та математична моделі, що є адекватними реальному об'єкту та призначені для верифікації вбудованого ПЗ системи керування або для довгострокового супроводження космічного об'єкту під час його польоту.

Ймовірнісні моделі переходів

Аналізування ЖЦ та пов'язаних з ним ризиків зручно виконати з використанням методів теорії випадкових процесів [9]. Відправною точкою аналізу мають бути множини станів, що відповідають етапам ЖЦ [1]: «вимоги користувача» - UR; «математичне проектування» - MD; «програмне проектування» - SD; «автономне моделювання» - AM; «верифікація алгоритмів вбудованого ПЗ» - V, а також статистичні дані, які накопичені під час розроблення ПЗ систем керування космічних апаратів, у яких приймав участь один з авторів.

Таблиця 1. Етапи життєвого циклу та стани моделі.

Етап циклу	Стан моделі	Призначення стану
Вимоги користувача	UR	Моделює тривалість формування вимог користувача
	PUR	Моделює внесення дефектів до вимог користувача
Математичне проектування	MD1, MD2	Моделює тривалість математичного проектування (побудову математичної моделі та її корегування)
	PMD1, PMD2	Моделює внесення дефектів у математичну модель під час її розроблення або корегування
Програмне проектування	SD1...SD4	Моделює тривалість програмного проектування (побудову програмної моделі та її корегування)
	PSD1...PSD4	Моделює внесення дефектів у програмну модель під час її розробки або корегування
Автономне моделювання	AM1...AM8	Моделює тривалість автономного моделювання
Верифікація	V	Моделює тривалість верифікації (натурних випробувань) моделей об'єктів космічної техніки.

Теорія випадкових процесів пропонує два підходи до аналізу технічних систем [9]: дискретний та безперервний. У першому підході використовуються дискретний час, множини станів системи та переходів між ними, що мають певні ймовірності. Другий підхід використовує безперервний час, множини станів та інтенсивностей переходів між ними.

Статистичне аналізування часових витрат на різні етап ЖЦ показало, що вони розподілені за експоненціальним законом [9,10], тому для подальшого аналізування доцільно

обрати безперервну модель, у якій інтенсивність переходів буде випадковою величиною, оберненою до тривалості відповідного етапу ЖЦ. Наявність ітеративних повторів етапів, обумовлена внесенням та ліквідацією відповідних дефектів, потребувала розщеплення окремих станів ЖЦ у множини станів ймовірнісної моделі. Внесення дефектів на кожному із станів визначається відповідними ймовірностями та додатковими станами.

Таким чином була побудована так звана комбінована ймовірнісна модель, яка використовує елементи як дискретної так і безперервної моделей, побудованих за методологією теорії випадкових процесів, що відображена на рис. 2, яку розглянемо більш детально.

У комбінованій ймовірнісній моделі більшості етапів ЖЦ відповідають певні множини станів, що мають безперервну природу, та вузол, що має дискретну природу. Відповідність між станами моделі та етапами життєвого циклу, а також призначення станів подано у таблиці 1.

Початковим станом комбінованої моделі є UR , що відповідає формуванню вимог

$$\lambda_{UR} = \frac{1}{T_{UR}}$$

користувача, тривалість якого T_{UR} . З інтенсивністю λ_{UR} з цього стану здійснюється перехід до стану PUR , що позначений пунктирним колом і моделює внесення дефектів у вимоги користувача. Надалі будемо вважати, що відсутність дефектів у вимогах користувача має ймовірність P_{UR} , а наявність дефектів у вимогах користувача - ймовірністю $1 - P_{UR}$. Далі здійснюється математичне проектування, якому відповідають стани MD_1 (відсутність дефектів у вимогах користувача) та MD_2 (наявність дефектів у вимогах користувача).

$$\lambda_{MD} = \frac{1}{T_{MD}}$$

Із стану MD_1 , тривалість якого T_{MD} , з інтенсивністю λ_{MD} здійснюється перехід до стану PMD_1 , що моделює внесення дефектів у математичну модель з ймовірністю $1 - P_{MD}$, та їх відсутність з ймовірністю P_{MD} . У разі відсутності дефектів у математичній моделі, відбувається перехід до стану SD_1 , інакше – до стану SD_2 .

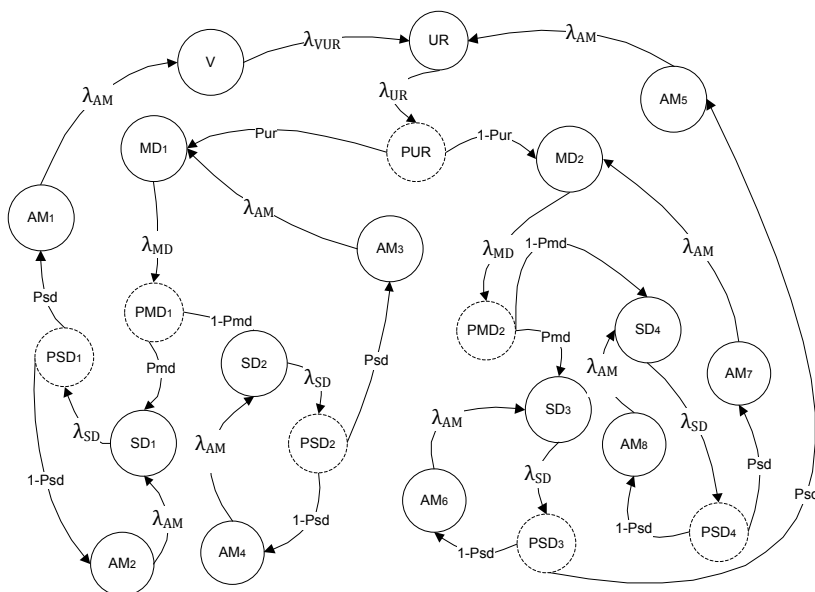


Рис. 2. Комбінована ймовірнісна модель переходів між станами життєвого циклу розроблення моделей об'єктів космічної техніки.

Зі стану SD_1 , що відповідає програмному проектуванню та має тривалість T_{SD} , з інтенсивністю $\lambda_{SD} = \frac{1}{T_{SD}}$ відбувається перехід до стану PSD_1 , що моделює внесення програмних дефектів. З цього стану з ймовірністю P_{SD} відбувається перехід до стану AM_1 (у разі відсутності програмних дефектів) та з ймовірністю $1-P_{SD}$ до стану AM_2 (у разі наявності програмних дефектів), що відповідає одній з ітерацій автономного моделювання.

Автономне моделювання, що відповідає відсутності дефектів у вимогах користувача, математичній та програмній моделях, позначене станом AM_1 і має тривалість T_{AM} . З

цього стану з інтенсивністю $\lambda_{AM} = \frac{1}{T_{AM}}$ відбувається перехід до стану V , що відповідає

етапу верифікації моделей об'єкту та алгоритмів системи керування за допомогою даних про поведінку реальної системи. У космічній галузі цей етап називається натурними випробуваннями, під час яких здійснюється політ та дослідна експлуатація об'єктів космічної техніки. Тривалість цього етапу T_{VUR} визначається терміном життя поточного покоління космічної техніки. За результатами верифікації здійснюється корегування, або повна переробка вимог користувача. Після завершення натурних випробувань життєвий цикл об'єктів космічної техніки повторюється і з інтенсивністю $\lambda_{VUR} = \frac{1}{T_{VUR}}$ здійснюється перехід до початкового стану комбінованої ймовірнісної моделі життєвого циклу.

У випадку існування програмних дефектів, коректної ММ та вимогах користувача здійснюється перехід до стану AM_2 , що відповідає автономному моделюванню, з якого з інтенсивністю λ_{AM} ми повертаємося до стану SD_1 для корегування програмної моделі.

У випадку існування дефектів математичної моделі ми переходимо до стану SD_2 , що відповідає програмному проектуванню на підставі некоректної математичної моделі. З цього стану з інтенсивністю λ_{SD} ми переходимо до стану PSD_2 , який моделює внесення програмних дефектів з ймовірністю P_{SD} , що визначає відсутність програмних дефектів, ми переходимо до стану автономного моделювання AM_3 за результатами якого з інтенсивністю λ_{AM} ми повертаємося на стан λ_{AM} до стану MD_1 для корегування математичної моделі. У випадку внесення додаткових програмних дефектів у некоректну математичну модель із стану PSD_2 з ймовірністю $1-P_{SD}$ ми переходимо до однієї з ітерацій автономного моделювання, що позначена станом AM_4 , по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} повертаємося до стану SD_2 . Ітераційні цикли між станами: $MD_1, PMD_1, SD_1, SD_2, PSD_1, PSD_2, AM_2, AM_3, AM_4$ повторюється до вилучення математичних та програмних дефектів.

Зі стану PUR з ймовірністю $1-P_{UR}$, що відповідає ймовірності існування дефектів у вимогах користувача, здійснюється перехід до стану MD_2 - математичному проектуванню, з якого з інтенсивністю λ_{MD} здійснюється перехід до стану PMD_2 , що моделює внесення додаткових, математичних, дефектів, з ймовірністю $1-P_{MD}$ здійснюється перехід до стану SD_4 , а у випадку їх відсутності з ймовірністю P_{MD} до стану SD_3 . Зі стану SD_3 , що відповідає розробці та корегуванню програмної моделі на підставі некоректних вимог користувача та відповідній ним математичній моделі, з інтенсивністю λ_{SD} переходимо до стану P_{SD3} , що моделює внесення програмних дефектів. З цього стану з ймовірністю P_{SD} , що відповідає відсутності програмних дефектів, здійснюється перехід до автономного мо-

делювання, позначеного станом AM_5 , звідки з інтенсивністю λ_{AM} ми повертаємося до усунення дефектів у вимогах користувача. Зі стану PSD_3 з ймовірністю $1-P_{SD}$, що відповідає ймовірності внесення додаткових, програмних, дефектів, здійснюється перехід до автономного моделювання, що відповідає стану AM_6 . По завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} ми повертаємося до стану SD_3 для усунення програмних дефектів.

У випадку внесення дефектів у математичну модель, побудовану на підставі некоректних вимог користувача, зі стану PMD_2 з ймовірністю $1-P_{MD}$ ми переходимо до програмного проектування, позначеного станом SD_4 , з якого з інтенсивністю λ_{SD} переходимо до стану PSD_4 , що моделює внесення програмних дефектів. Зі стану PSD_4 з ймовірністю $1-P_{SD}$, що відповідає існуванню додаткових програмних дефектів, переходимо до автономного моделювання AM_8 , по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} повертаємося до корегування програмної моделі, позначеного станом SD_4 . Цикл: SD_4, PSD_4, AM_8, SD_4 повторюється до усунення програмних дефектів.

У випадку відсутності додаткових програмних дефектів зі стану PSD_4 з ймовірністю P_{SD} переходимо до автономного моделювання AM_7 , по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} повертаємося до корегування математичної моделі позначеного станом MD_2 . Цикл повторюється до повного усунення дефектів у математичній моделі.

Для подальших досліджень кількісних характеристик життєвого циклу розроблення об'єктів космічної техніки розглянута вище комбінована ймовірнісна модель необхідно перетворити на форму, що дозволяє використати всю міць математичного апарату теорії випадкових процесів, тобто перейти від використання ймовірностей до використання інтенсивностей переходів. В основі перетворення буде використана операція над фрагментами графа, що зображена на рис.3:

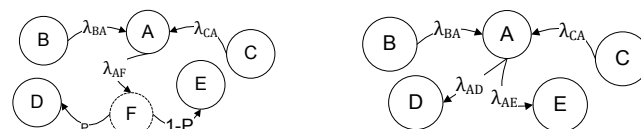


Рис. 3. Перетворення фрагменту графа

Можливість такого перетворення обумовлена статистичними характеристиками процесів ЖЦ, зображених на рис.1.

У першому наближенні можливо вважати, що потоки подій, які відповідають завершенню ітерацій етапів життєвого циклу є стаціонарним, тобто ймовірність появи k - подій на проміжку часу $(t, t + \tau)$ залежить тільки від кількості цих подій та довжини часового інтервалу τ , але не від моменту початку інтервалу t . Тобто математичне очікування кількості подій за одиницю часу – середня інтенсивність подій, або щільність потоку, має постійне значення. Потоки подій, що відповідають окремим ітераціям етапів життєвого циклу розробки моделей об'єктів космічної техніки, не має післядії, тобто ймовірність дій на протязі інтервалу $(t, t + \tau)$ не залежить від кількості та моментів появи подій до моменту t . Тобто має місце взаємна незалежність появ певної кількості подій у інтервали, що не перетинаються. Потоки подій є ординарними, тобто ймовірність появи двох або більше подій на протязі елементарного проміжку часу $(t, t + \tau)$ набагато менше у порівнянні з появою лише одної події, або, іншими словами ймовірність одночасної появи кількох подій дорівнює нулю. Потоки подій, що мають перелічені вище властивості називають найпростішими. Кількість однорідних подій на інтервалі $(t, t + \tau)$ розподілена по закону Пуа-

сона, а випадковий час X появи чергової події підкорюється експоненціальному розподілу, головною характеристикою якого є інтенсивність або щільність потоку подій. Щільність ймовірності подій залежить як від інтенсивності подій, так і від часу: $f(t, \rho) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \rho e^{-\rho t} & t > 0 \end{cases}$, де ρ - інтенсивність подій, t - час.

Для перетворення, що зображено на рис.3, необхідно визначити по відомій ймовірності його інтенсивність. Залежність ймовірності від інтенсивності та часу визначається як $P = \int_0^T \rho e^{-\rho t} dt$, де P - ймовірність події, а T - її середня тривалість. При цьому будемо і надалі вважати стаціонарність потоків подій, тобто незалежність інтенсивності подій від часу. Тоді $P = 1 - e^{-\rho T}$, звідки $e^{-\rho T} = 1 - P$ і $\rho = -\frac{\ln(1 - P)}{T}$.

Таким чином, якщо існує повна група подій $P_E, P_{\bar{E}}$, розподілених по експоненційному закону, то їх інтенсивності визначаються як:

$$\rho_E = -\frac{\ln(1 - P_E)}{T} \quad \rho_{\bar{E}} = \frac{\ln(1 - P_{\bar{E}})}{T} = \frac{\ln(P_E)}{T} \quad (1)$$

Використання перетворення, зображеного на рис.3 надало можливість перейти до наступної, приведенної, ймовірнісної моделі переходів між станами життєвого циклу, що зображена на рис.4.

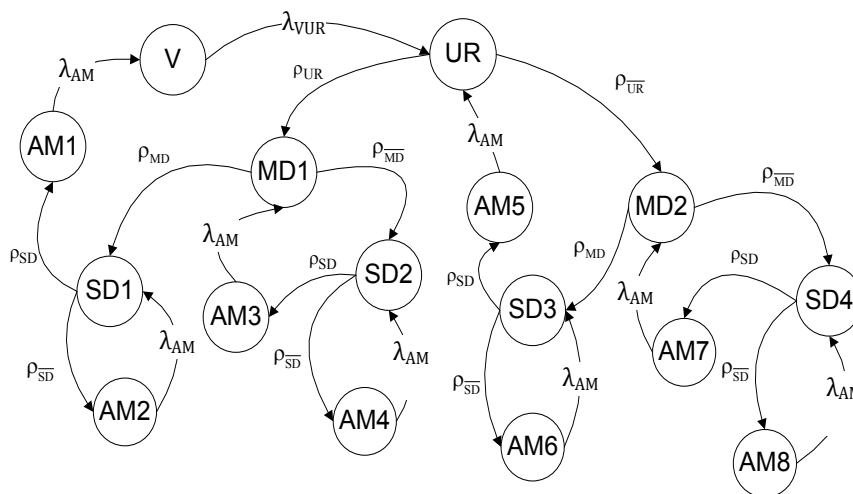


Рис. 4. Приведена ймовірнісна модель переходів між станами життєвого циклу розроблення моделей об'єктів космічної техніки.

Головною особливістю є відсутність дискретних елементів комбінованої моделі та введення нових інтенсивностей й переходів, які мають відношення до наявності трьох рівнів дефектів: вимог, математичних та програмних моделей.

Початковим станом моделі є стан UR , що відповідає формуванню вимог користувача, з якого у разі відсутності дефектів вимог, з інтенсивністю ρ_{UR} відбувається перехід до стану MD_1 . У випадку наявності дефектів вимог, з інтенсивністю $\rho_{\bar{UR}}$ відбувається перехід до стану MD_2 .

У разі відсутності дефектів вимог після переходу до стану MD_1 проектується математична модель об'єкту, яка може бути коректною. Це обумовить перехід з інтенсивністю ρ_{MD} до стану SD_1 .

Під час програмного проектування, що відповідає стану SD_1 , можливо внесення дефектів у програмну модель. Це обумовлює перехід з інтенсивністю ρ_{SD} до стану AM_2 , що відповідає етапу автономного моделювання, по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} відбувається повернення до стану SD_1 для коригування програмної моделі до повного вилучення програмних дефектів. Якщо у стані SD_1 програмні дефекти не вносяться, то з інтенсивністю ρ_{SD} відбувається перехід до стану AM_1 , по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} відбувається перехід стану верифікації (натурних випробувань), після завершення яких з інтенсивністю λ_{UR} , що визначається тривалістю існування поколінь космічної техніки, відбувається повернення до початкового стану моделі життєвого циклу.

У випадку наявності дефектів MM з інтенсивністю ρ_{MD} відбувається перехід зі стану MD_1 до стану SD_2 . Якщо у стані SD_2 програмні дефекти не вносяться, то з інтенсивністю ρ_{SD} відбувається перехід до стану AM_3 , по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} відбувається перехід до стану MD_1 - що відповідає корегуванню математичної моделі. Цикл $MD_1 SD_2 AM_3 MD_1$ повторюється до повного усунення дефектів математичної моделі.

У випадку привнесення програмних дефектів під час однієї з ітерацій програмного проектування позначеної станом SD_2 з інтенсивністю ρ_{SD} переходимо до автономного моделювання позначеного станом AM_4 по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} відбувається повернення до стану SD_2 для коригування програмної моделі до повного вилучення програмних дефектів.

Якщо вимоги користувача, сформовані на початковому етапі, мають дефекти ми потрапляємо з ймовірністю ρ_{UR} до стану MD_2 , що відповідає побудові математичної моделі на підставі некоректних вимог. У цьому випадку сама MM може також отримати додаткові, математичні, дефекти. Це моделюється переходом з інтенсивністю ρ_{MD} зі стану MD_2 до стану SD_4 . Якщо додаткові, математичні, дефекти відсутні, то з інтенсивністю ρ_{MD} відбувається перехід зі стану MD_2 до стану SD_3 .

Під час програмного проектування, що відповідає стану SD_3 , можлива поява програмних дефектів, що обумовлює з інтенсивністю ρ_{SD} перехід до стану AM_6 . Далі відбувається повернення до стану SD_3 де буде відбуватися корегування програмної моделі до повного усунення усіх програмних дефектів. Якщо ж у стані SD_3 програмних дефектів не було додано, то з інтенсивністю ρ_{SD} відбувається перехід до автономного моделювання AM_5 , після завершення якого з інтенсивністю λ_{AM} відбувається повернення до початкового стану UR для корегування вимог користувача.

Зі стану SD_4 (програмного проектування) на підставі некоректних вимог та некоректної математичної моделі, у випадку привнесення програмних дефектів з інтенсивністю ρ_{SD} переходимо до автономного моделювання AM_8 по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} повертаємося до стану SD_4 для корегування програмної моделі.

У випадку відсутності програмних дефектів з інтенсивністю ρ_{SD} відбувається перехід зі стану SD_4 до автономного моделювання AM_7 , по завершенню якого з інтенсивністю λ_{AM} відбувається перехід до стану MD_2 корегування математичної моделі.

Математична модель життєвого циклу

Граф зображений на рисунку 4 дозволяє побудувати систему алгебрично-диференціальних рівнянь Колмогорова (2).

Ця система визначає ймовірності знаходження в кожному зі станів моделі на підставі потоків ймовірностей для кожного зі станів, а також підсумковій ймовірності знаходження у кожному зі станів, що має у будь-який момент дорівнювати одиниці. При побудові системи рівнянь функції ймовірностей знаходження у станах моделі були позначені як $V_k(t)$ де k – назва відповідного стану моделі, які було розглянуто у попередньому розділі.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 V_{UR} + V_{MD1} + V_{MD2} + \\
 + \sum_{i=\neq}^4 V_{SDi} + \sum_{i=1}^8 V_{AMi} + V_V = 1 \\
 \dot{V}_{UR} = \lambda_{VUR} V_V + \lambda_{AM} V_{AM5} - \rho_{UR\Sigma} V_{UR} \\
 \dot{V}_{MD1} = \rho_{UR} V_{UR} + \lambda_{AM} V_{AM3} - \rho_{MD\Sigma} V_{MD1} \\
 \dot{V}_{MD2} = \rho_{UR} V_{UR} + \lambda_{AM} V_{AM7} - \rho_{MD\Sigma} V_{MD2} \\
 \dot{V}_{SD1} = \rho_{MD} V_{MD1} + \lambda_{AM} V_{AM2} - \rho_{SD\Sigma} V_{SD1} \\
 \dot{V}_{SD2} = \rho_{MD} V_{MD1} + \lambda_{AM} V_{AM4} - \rho_{SD\Sigma} V_{SD2} \\
 \dot{V}_{SD3} = \rho_{MD} V_{MD2} + \lambda_{AM} V_{AM6} - \rho_{SD\Sigma} V_{SD3} \\
 \dot{V}_{SD4} = \rho_{MD} V_{MD2} + \lambda_{AM} V_{AM8} - \rho_{SD\Sigma} V_{SD4} \\
 \dot{V}_{AM1} = \rho_{SD} V_{SD1} - \lambda_{AM} V_{AM1} \\
 \dot{V}_{AM2} = \rho_{SD} V_{SD1} - \lambda_{AM} V_{AM2} \\
 \dot{V}_{AM3} = \rho_{SD} V_{SD2} - \lambda_{AM} V_{AM3} \\
 \dot{V}_{AM4} = \rho_{SD} V_{SD2} - \lambda_{AM} V_{AM4} \\
 \dot{V}_{AM5} = \rho_{SD} V_{SD3} - \lambda_{AM} V_{AM5} \\
 \dot{V}_{AM6} = \rho_{SD} V_{SD3} - \lambda_{AM} V_{AM6} \\
 \dot{V}_{AM7} = \rho_{SD} V_{SD4} - \lambda_{AM} V_{AM7} \\
 \dot{V}_{AM8} = \rho_{SD} V_{SD4} - \lambda_{AM} V_{AM8} \\
 \rho_{UR\Sigma} = \rho_{UR} + \rho_{UR} \\
 \rho_{MD\Sigma} = \rho_{MD} + \rho_{MD} \\
 \rho_{SD\Sigma} = \rho_{SD} + \rho_{SD}
 \end{array} \right. \quad (2)$$

Необхідною умовою є нормування повної групи подій для кожного зі станів моделі:

$$\begin{aligned}
 & V_{UR}(t) + V_{MD1}(t) + V_{MD2}(t) + \\
 & + \sum_{i=\neq}^4 V_{SDi}(t) + \sum_{i=1}^8 V_{AMi}(t) + V_V(t) = 1
 \end{aligned} \quad (3)$$

Інтенсивності невідомих переходів ρ визначаються через ймовірності та тривалості подій як

$$\rho_{MD} = \frac{-\ln(1 - P_{MD})}{T_{MD}} \quad \rho_{MD} = \frac{-\ln P_{MD}}{T_{MD}} \quad \rho_{SD} = \frac{-\ln(1 - P_{SD})}{T_{SD}} \quad \rho_{SD} = \frac{-\ln P_{SD}}{T_{SD}}$$

$$\rho_{UR} = \frac{-\ln(1 - P_{UR})}{T_{UR}} \quad \rho_{UR} = \frac{-\ln(P_{UR})}{T_{UR}}$$

Початкові умови для інтегрування системи (2):

$$\begin{cases} V_{UR}(0) = 1, \\ V_{MD1}(0) \dots V_{MD2}(0) = 0, \\ V_{SD1}(0) \dots V_{SD4}(0) = 0, \\ V_{AM1}(0) \dots V_{AM8}(0) = 0, \\ V_V(0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

відповідають природній ситуації, коли розроблення моделей розпочинається з визначення вимог.

Через те, що між етапами ЖЦ та станами моделі існує відображення, що відповідає таблиці 1, функції ймовірностей знаходження на етапах ЖЦ визначаються як:

$$\begin{cases} L_{UR}(t) = V_{UR}(t) \\ L_{MD}(t) = V_{MD1}(t) + V_{MD2}(t) \\ L_{SD}(t) = V_{SD1}(t) + \dots + V_{SD4}(t) \\ L_{AM}(t) = V_{AM1}(t) + \dots + V_{AM8}(t) \\ L_V(t) = V_V(t) \end{cases} \quad (5)$$

При цьому для будь-якого моменту має виконуватися умова

$$L_V(t) + L_{AM}(t) + L_{SD}(t) + L_{MD}(t) + L_{UR}(t) = 1 \quad (6)$$

Подальше дослідження моделі ЖЦ вимагає визначення невідомих інтенсивностей та ймовірностей внесення різноманітних дефектів під час виконання реальних програмних проєктів з розроблення програмного забезпечення систем керування.

Дослідження статистичних характеристик життєвого циклу

Необхідні дані були отримані шляхом статистичного оброблення тривалостей різних ітерацій етапів життєвого циклу. Ці дані було отримано з робочих журналів, де реєструвалися знайдені програмні дефекти та помилки у даних, що стосувалися розроблення кількох космічних систем - великогабаритних модулів орбітальних станцій Мир, МКС, а також беспілотних космічних апаратів. Довжина виборки була обмежена 200 ітераціями.

Узагальнені статистичні характеристики етапів ЖЦ вміщені у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики етапів

Етап	Тривалість, днів	Ймовірність невнесення дефектів
Визначення вимог	5	0,8
Математичне проєктування	5	0,8
Програмне проєктування	15	0,8
Автономне моделювання	20	-

Результати дослідження відображені на рис.5-8, де по осі абсцис відкладені тривалості відповідних етапів у днях, а по осі ординат – кількість етапів.

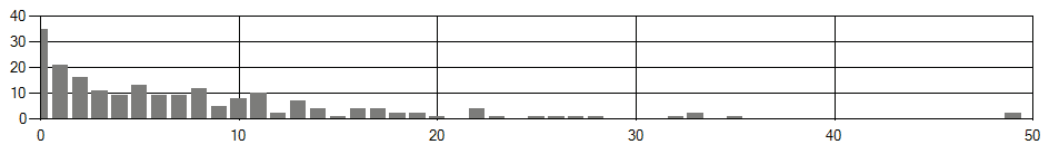


Рис. 5 Гістограма тривалості визначення вимог

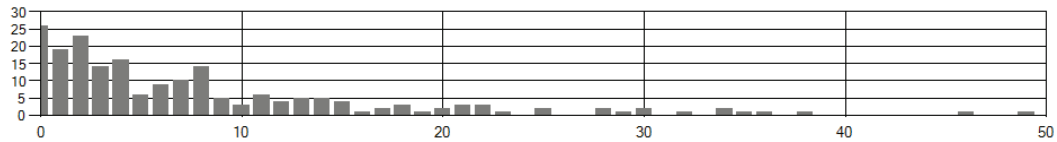


Рис. 6 Гістограма тривалості математичного проектування

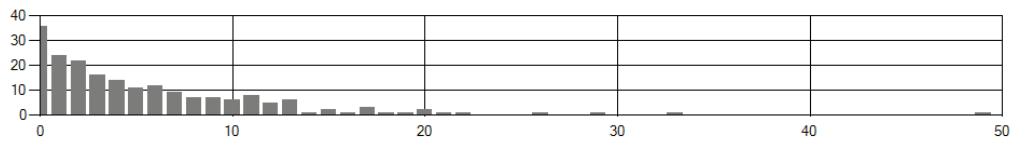


Рис. 7 Гістограма тривалості програмного проектування

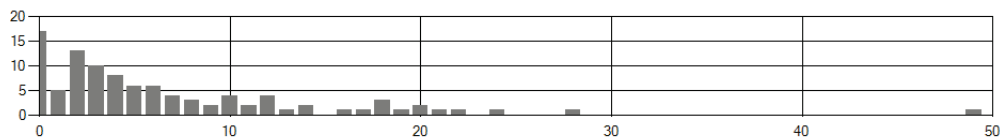


Рис. 8 Гістограма тривалості автономного моделювання

Як видно з графіків, тривалості етапів ЖЦ підпорядковуються експоненціальному розподілу, що підтверджує можливість використання апарату теорії випадкових процесів для дослідження кількісних характеристик життєвого циклу. Таким чином, ми маємо всі необхідні дані для дослідження ЖЦ шляхом інтегрування системи рівнянь Колмогорова (2).

Кількісний аналіз життєвого циклу

Результати чисельного моделювання системи Колмогорова (2) для початкових умов (4) з урахуванням відповідності між станами моделі та етапами ЖЦ (5) та характеристик етапів, відображених у табл. 2, подано на рис.9

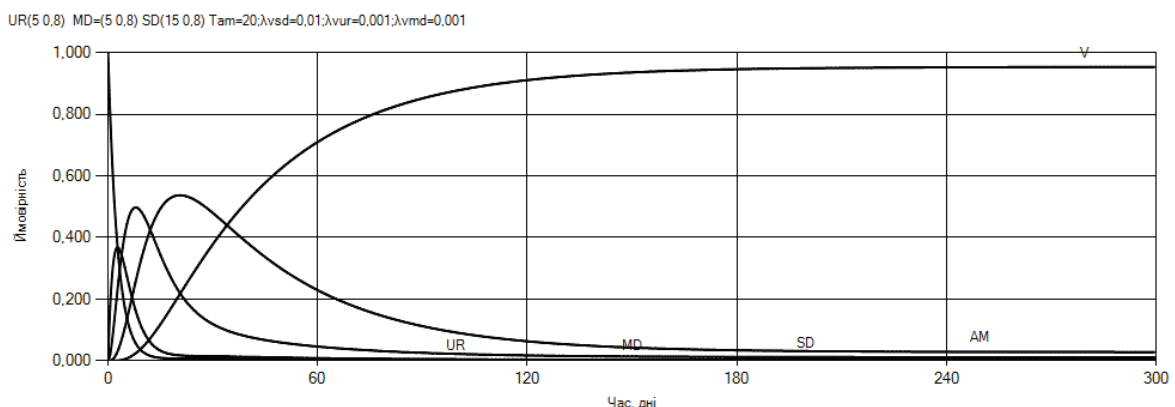


Рис. 9 Функції ймовірностей знаходження проекту на різних етапах (V- етап верифікації програмного забезпечення системи керування, AM – автономне моделювання; SD – програмне проектування; MD – математичне проектування, UR – визначення вимог)

Як видно з графіку, зображеному на рис.9, через досить високу ймовірність внесення додаткових дефектів на кожному з етапів, а також їх значну тривалість, значення ймовір-

ності знаходження на етапі верифікації 0.9 досягається приблизно на 120 день роботи. Ці данні відповідають реальності.

Як ризик слід вважати ймовірність незнаходження ЖЦ на етапі верифікації V, яка для обраних даних сягає 0.1 на 180 день розроблення, що є досить неприємним значенням, якщо урахувати, що за цей період були витрачені кошти на обладнання, заробітну платню висококваліфікованим фахівцям. Наприклад, як подано на рис. 10, збільшення ймовірності відсутності внесення дефектів на етапах ЖЦ до 0.9 зменшує ймовірність ризику на 120 день розробки до 5 відсотків.

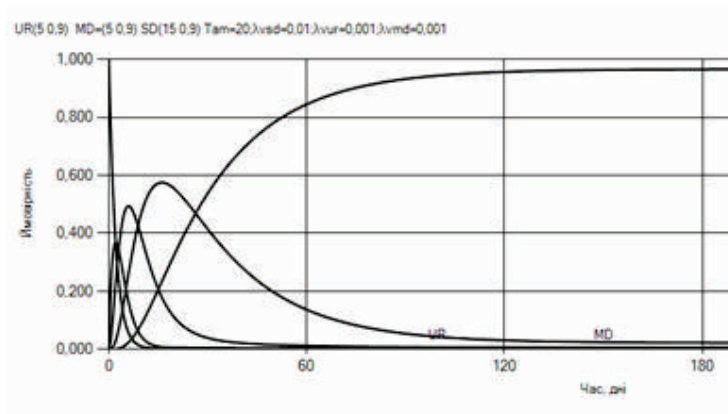


Рис. 10 Функції ймовірностей знаходження проекту на різних етапах для ймовірностей відсутності дефектів, що дорівнює 0.9

Зменшення етапу програмного проектування з 15 до 5 днів, як це показано на рис. 11 зменшує ризики досить незначно.

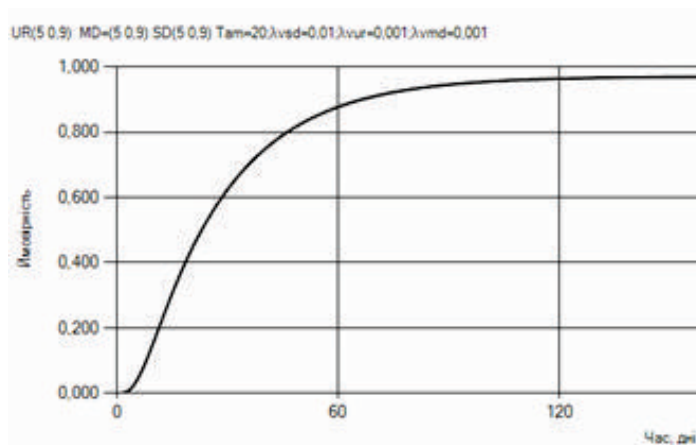


Рис. 11 Функція ймовірностей знаходження проекту на етапу верифікації для ймовірностей відсутності дефектів, що дорівнює 0.9 та тривалості програмного проектування 5 днів

Подальше істотне зменшення ризиків можливо за рахунок скорочення тривалості автономного моделювання. Так скорочення автономного моделювання до 10 днів (за умовою виконання всіх перевірок ПМ об'єкту) дозволяє досягти 4 відсоткового ризику уже на 60 день, як це показано на рис. 12.

Нарешті, на зменшення ризиків значно впливає якість програмної розробки. Так зменшення ймовірності внесення програмних дефектів до 1% дозволяє досягти 3 % ризиків на 60 день, як це показано на рис. 13.

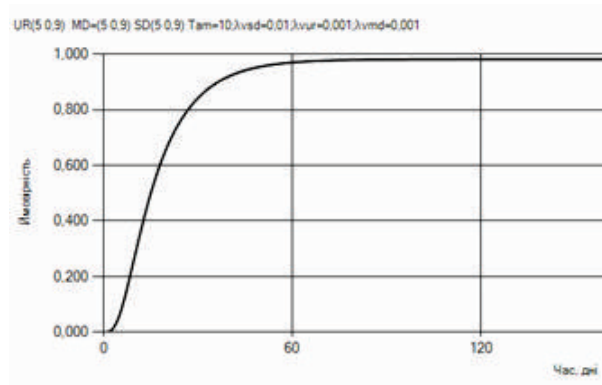


Рис. 12 Функція ймовірностей знаходження проекту на етапу верифікації для ймовірностей відсутності дефектів, що дорівнює 0.9 та тривалості програмного проектування 5 днів, автономного моделювання 10 днів.

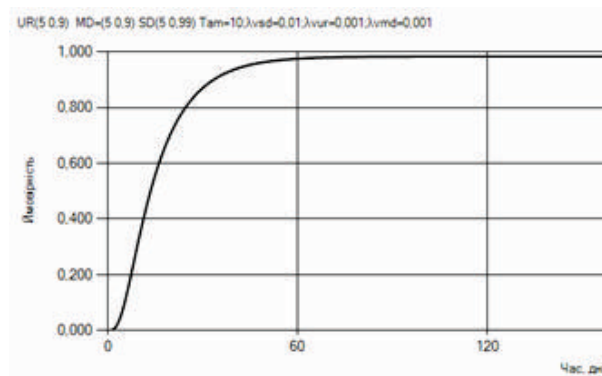


Рис. 12 Функція ймовірностей знаходження проекту на етапу верифікації для ймовірностей відсутності дефектів вимог користувача та ММ 0.9, програмних дефектів 0.99 тривалості програмного проектування 5 днів, автономного моделювання 10 днів

Висновки

Таким чином, в результаті проведених досліджень було вперше отримано математичну модель, що дозволяє кількісно оцінити ймовірності різноманітних ризиків на підставі статистичних характеристик, властивих життєвому циклу моделювання космічних літальних апаратів. Визначено вплив характеристик етапів життєвого циклу на ризики розроблення некоректної моделі космічного апарату. Доведено, що скорочення термінів розроблення математичної та програмної моделей космічного апарату надає можливість скоротити терміни розроблення системи керування та спростити супроводження довготривалих космічних місій.

Подальші дослідження необхідно проводити у напрямку впровадження як наскрізної автоматичної верифікації всіх етапів ЖЦ – від вимог користувача до супроводу КЛА, так і автоматизації побудови математичної моделей та генерації програмних моделей космічної техніки. Одним із рішень цієї проблеми може бути використання інваріантно-орієнтованого підходу [11].

Ці заходи дозволять не тільки зменшити вплив людського фактору на всіх етапах життєвого циклу та знизити кількість залишкових дефектів у математичній та програмній моделі, але й зменшити ризики та скоротити витрати на розроблення нових зразків космічної техніки та супроводження існуючих літальних апаратів.

Література

1. Процеси життєвого циклу програмного забезпечення програмно-технічних комплексів критичного призначення. [Електронний ресурс] : СОУ-Н НКАУ 0061:2011 / розробл. Харк. госпрозрахунк. підрозділ «Сертифікац. Центр АСУ» держ. п-ва «Держ. центр регулювання якості поставок та послуг» ; відп. викон. Ю. Алексєєв ; наук. кер. В. С. Харченко. – [Б. м.] : НКАУ, 2011. –

123 с. – (Галузева система управління якістю). – Режим доступу : <http://do.gendocs.ru/docs/index-188894.html?page=2>. – 07.09.2012.

2. Авдеев, Ю.Ф. Полет космических аппаратов. Примеры и задачи [Текст] / Ю.Ф. Авдеев, А.И. Беляков, А.В. Брыков, В.Л. Горьков, М.М. Григорьев, Б.Л. Журинов, В.А. Иванов, Г.С. Титов, В.М. Язудин 2-е изд. Переработанное и дополненное. -М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

3. Белецкий, В.В. Очерки о движении космических тел [Текст] / В.В. Белецкий М.: Наука, 1997. -432 с.

4. Салмин, В.В. Многошаговые алгоритмы управления движением космических аппаратов [Текст] / В.В. Салмин // Космические исследования. 1979. Т. XVII. Вып. 6. С. 835-845.

5. Степанов, В.В. Курс дифференциальных уравнений [Текст] / В.В. Степанов М.: Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1950, 473 стр.

6. Петровский, И.Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. [Текст] / И.Г. Петровский Москва: МГУ, 1984 г., 296 с.

7. Арнольд, В.И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / В.И. Арнольд -М.: Наука, 1978. – 250 с.

8. Арнольд, В.И. Математические методы классической механики [Текст] / В.И. Арнольд — Едиториал УРСС, 1989. — 408 с.

9. Венцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – Учебн. пособие для вузов. [Текст] / Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров – 2-е изд., стер.- М.: Высш. шк., - 2000. – 383 с.

10. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика [Текст] / А.И. Кобзарь.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

11. Коноров, Б. М. Модель оценивания качества программного обеспечения ИУС критического применения на основе инвариантов [Текст] / Коноров Б. М., Засуха С. А., Манжос Ю. С., Семенов Л. П., Сергиенко В. В., Харченко В. С., Чертков Г. Н. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 7 (19). – С. 162–170.

© Ю.С. Манжос, А.Л. Берднікова

АНАЛИЗ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрен жизненный цикл моделирования космических объектов и построены вероятностные модели переходов. Предложена система уравнений Колмогорова, определяющая потоки вероятностей состояний модели жизненного цикла. Исследованы продолжительности итераций этапов жизненного цикла, вероятности внесения дефектов в время реальных программных проектов и их влияние на программные риски. Исследованы численные решения математической модели жизненного цикла для разнообразных исходных данных. Предложены способы уменьшения рисков.

Ключевые слова: жизненный цикл моделирования, уравнения Колмогорова, вероятность, верификация программного обеспечения.

ANALYSIS LIFE CYCLE MODELLING OF SPACE VEHICLES

A life-cycle of space objects simulation have been illustrated. The probabilistic model of transitions was constructed. The system of Kolmogorov equations defining the flow state lifecycle model probabilities was proposed. The duration of iterations and probability of defects for each phase of lifecycle for real space elaboration was investigated. The numerical solution for life cycle for different source data was investigated. The methods for risk reduction was proposed.

Key words: modeling life cycle, Kolmogorov equations, software verification

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ ШТАМПОВ

В статье изложены вопросы изготовления направляющих элементов переналаживаемых штампов: технические требования, материал, термическая обработка, точность изготовления направляющих элементов в зависимости от толщины штампуемого материала, оптимизация конструктивно-технологических параметров элементов конструкций при изготовлении переналаживаемых штампов.

Ключевые слова: штамп, направляющая колонка, точность обработки

Введение

Одним из основных направлений в развитии штамповочного производства является дальнейшее расширение области применения листовой штамповки - наиболее прогрессивного, высокопроизводительного и малотрудоемкого способа обработки металлов давлением.

Направляющие элементы должны иметь необходимую жёсткость, высокую точность и износостойкость.

Работоспособность штампов во многом зависит от жёсткости и прочности направляющих колонок. При недостаточной жёсткости последние под воздействием горизонтальной составляющей усилия штамповки деформируются, что приводит к нарушению нормальных зазоров между пуансоном и матрицей, к быстрому их износу и снижению стойкости штампов.

Большое влияние на работоспособность и долговечность штампов оказывает износостойкость направляющих элементов, которая зависит от материала, химико-термической обработки, технологических методов поверхностного упрочнения и различных покрытий.

Однако, в технической литературе вопросам выбора материала для изготовления направляющих элементов уделяется недостаточное внимание.

Обзор последних источников исследований и публикаций

Необходимо отметить, что вопросам исследования системы направления в конструкциях штампов в отечественной и зарубежной литературе уделяется недостаточное внимание. Большинство рекомендаций носит чисто прикладной характер и не подкрепляется какими-либо экспериментами.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы

Исследование основ изготовления системы направления и её влияния на работоспособность универсально-сборных переналаживаемых штампов является актуальной научно-технической задачей представляющей научную и практическую ценность.

Постановка задачи

Расширение технологических возможностей системы направления универсально-сборных переналаживаемых штампов (УСПШ) на основе оптимизации конструктивно-технологических параметров элементов конструкции системы направления при изготовлении переналаживаемых штампов.

Основной материал

В штампах обычной конструкции направляющие элементы, как правило, изготавливают из цементированной и закалённой стали 20. Такие детали изнашиваются после 400-

500 тыс. рабочих ходов пресса. Но мере износа зазор в направляющих деталях увеличивается, что нарушает центрирование режущих элементов.

Изготовление направляющих элементов УСПШ из стали 12ХН3А с последующей закалкой и цементацией до HRC 58...62 значительно повышает их стойкость, а из стали 38ХМЮА азотированной и закалённой до HRC64...67 – в несколько раз.

Чистота обработки различных поверхностей направляющих элементов определяется их назначением и требованиями, предъявленными к ним (рис.1).

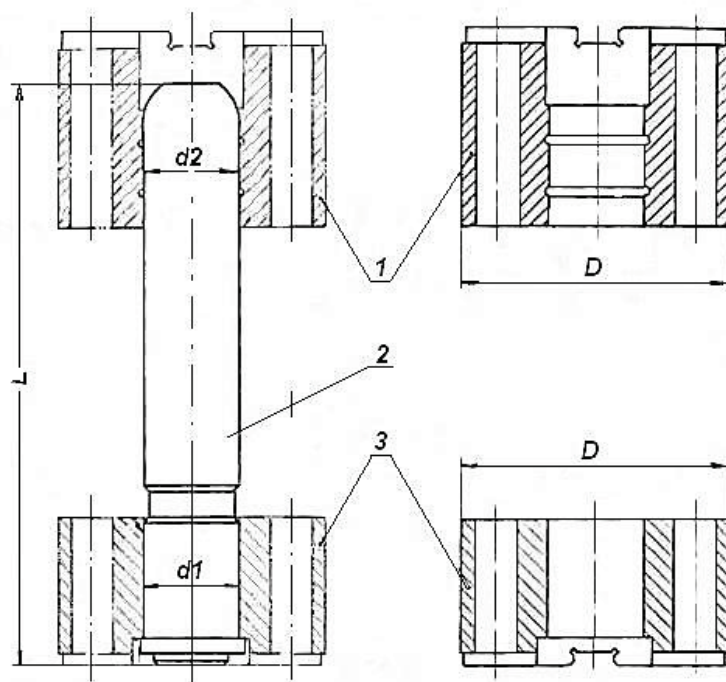


Рис. 1 Система направления: 1 – верхняя обойма; 2 – направляющая колонка; 3 – нижняя обойма.

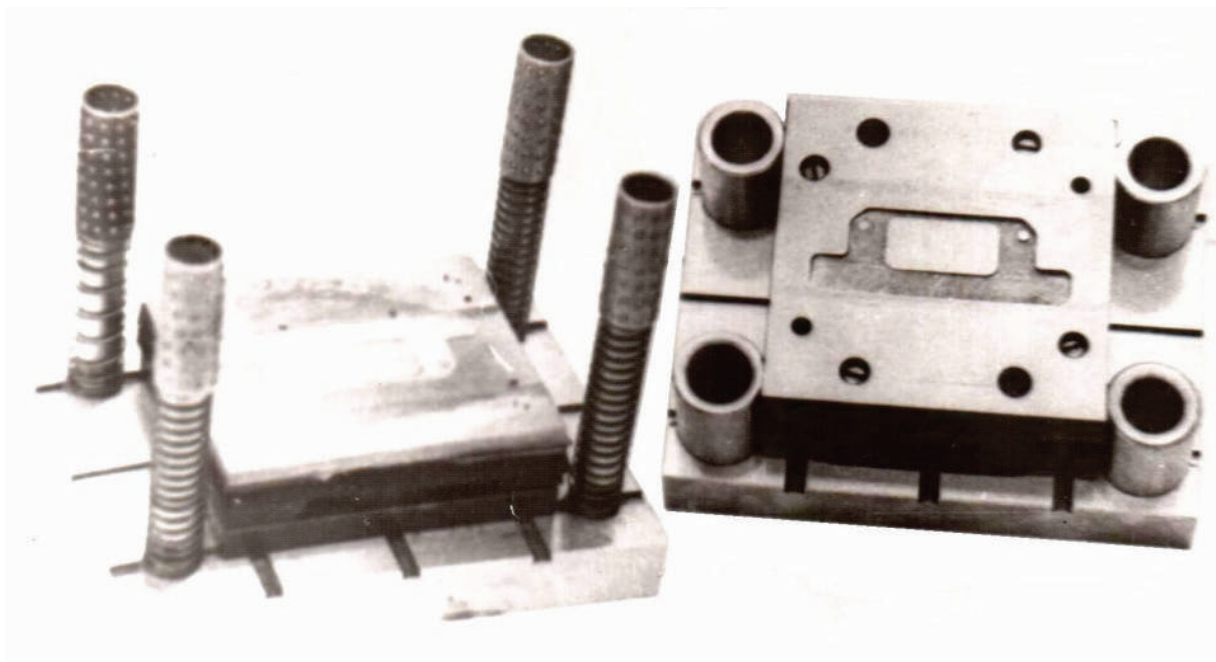


Рис.2 Универсально-сборный штамп с шариковыми направляющими.

Выбор класса точности изготовления направляющих элементов производится в зависимости от толщины штампуемого материала.

Таблица 1

ОБОЙМА		КОЛОНКА НАПРАВЛЯЮЩАЯ	
Обрабатываемая поверхность	Класс точности, тип посадки, чистота поверхности	Обрабатываемая поверхность	Класс точности, тип посадки, чистота поверхности
Наружный диаметр D	h14 ОСТ 1010	Диаметр для запрессовки d_1	r6 ОСТ 1042
Внутренний диаметр d_1, d_2	H6; H7; H9 ОСТы 1011,1012,1013 (при отклонении размера по H7, чистота поверхности не ниже 0,16 мкм).	Диаметр рабочей части d_2	h5; h6; h8; f7; f9 ОСТы 1011, 1012, 1013 (при отклонении размера по h5, чистота поверхности не ниже 0,16 мкм)
Высота H	h 14 ОСТ 1010	Длина L	h 14ОСТ 1010

Таблица 2

d_1 , граница интервала, мкм	X_i , мкм	m_i	d_2 , граница интервала, мкм	X_i , мкм	m_i
0-2	1	1	0-2	1	0
2-4	3	10	2-4	3	2
4-6	5	14	4-6	5	3
6-8	7	21	6- 8	7	4
8-10	9	28	8-10	9	8
10 - 12	11	22	10 - 12	11	14
12 - 14	13	10	12 - 14	13	20
14 - 16	15	8	14 - 16	15	24
16 - 18	17	0	16 - 18	17	18
			18 -20	19	15
			20 – 22	21	10
			22 - 24	23	7
			24- 26	25	3
			26 - 28	27	1

При штамповке деталей толщиной 6-10 мм направляющие колонки и направляющие обоймы выполняются по посадке H7/f7 или H9/f9; при штамповке деталей толщиной 1-5 мм изготовление ведётся по посадке H7/h6; при штамповке деталей толщиной до 1 мм направляющие элементы выполняются по посадке H6/h5, при этом широко применяются обоймы с шариковым направлением (рис.2).

Точность обработки и чистота поверхности направляющих элементов приведены в таблице 1.

При изготовлении направляющих элементов необходимо выдержать следующие технические требования:

отклонение от соосности поверхностей d_1 ; и d_2 направляющей колонки не более 0,005 на 100 мм;

неперпендикулярность опорных поверхностей "А" относительно оси обоймы не более 0,01 на 100 мм.

В таблице 2 приведены результаты измерения рабочих диаметров направляющих колонок (d_1) и обойм (d_2).

Изготовление направляющих элементов системы УСШ, как правило, производится на специализированных участках или предприятиях.

В результате многократных наблюдений и последующей их статистической обработки определена фактическая точность изготовления направляющих элементов УСШ.

где X_i – координата середины i -го интервала; m_i – частота значений i -го интервала.

Результаты статистической обработки графически представлены на рис. 3.

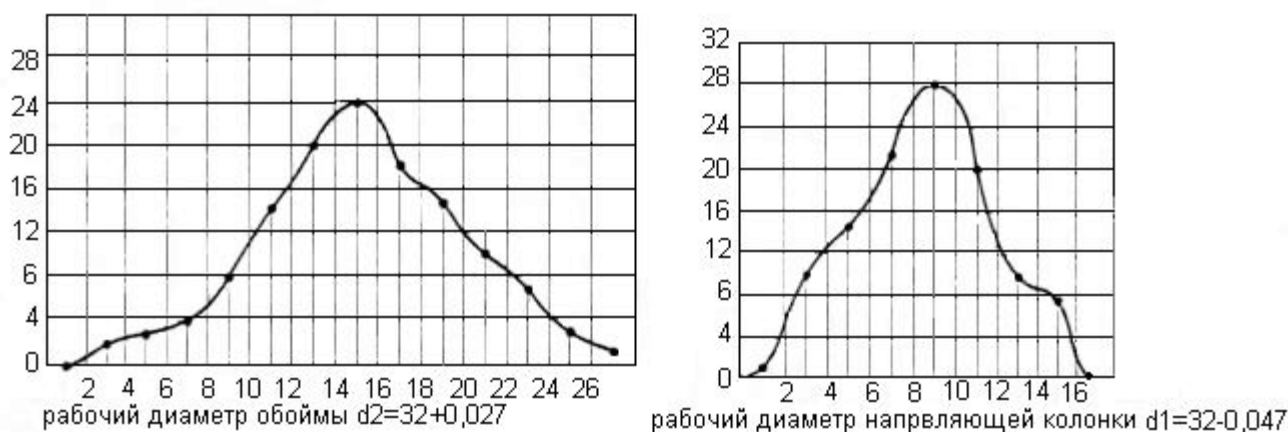


Рис.3 Рассеивание размеров в партии при изготовлении рабочих диаметров направляющих колонок и обойм

Выводы

Правильный выбор оптимальных и научно обоснованных конструктивных параметров элементов УСПШ и материалов для их изготовления позволяет уменьшить время на проектирование, переналадку и сборку штампов, снизить себестоимость, а также повысить надёжность и долговечность отдельных узлов системы УСПШ в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Литература:

1. Мовшович А.Я., Ткачук Н.А., Ткачук А.Н. Технологические системы холодно листовой штамповки: к вопросу обоснования расчетных схем элементов разделительных штампов. // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов «Машиноведение и САПР» - № 14. – Харьков, 2008 – С. 126–141.

2. Мовшович А.Я., Ткачук Н.А., Ткачук А.Н. Элементы разделительных штампов: методы и модели для исследования напряженно-деформированного состояния // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – М.: ООО «Тисо-Принт» – 2009. – №2 – С.16-25.

3. Мовшович А.Я., Ткачук Н.А., Ткачук А.Н. Термоупругие контактные задачи для элементов штампов и пресс-форм // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – М.: ООО «Тисо-Принт» – 2010. – №1 – С.19-28.

© Ю.А. Чорна, Є.С. Дерябкіна

УДК 621.835

Чорна Ю.А., аспірант

Дерябкіна Є.С., к.т.н., доцент

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ШТАМПІВ, ЩО ПЕРЕНАЛАГОДЖУЮТЬСЯ

У статті викладено питання виготовлення направляючих елементів штампів, що переналагоджуються: технічні вимоги, матеріал, термічна обробка, точність виготовлення направляючих елементів залежно від товщини матеріалу, що штампуються, оптимізація конструктивно-технологічних параметрів елементів конструкцій при виготовленні штампів, що переналагоджуються.

Ключові слова: штамп, направляюча колонка, точність обробки

UDC 621.835

Chorna Y.A., graduate student,

Deryabkina E.S. c.t.s., associate Professor,

Ukrainian engineering pedagogics academy, c. Kharkov

OPTIMIZATION TECHNOLOGY ELEMENTS TO READJUST STAMPS

In the article questions the manufacture of guide elements to readjust stamps: technical requirements, material, heat treatment, precision manufacturing guide elements depending on the thickness of stamping material, optimization of structural and technological parameters of the structural elements in the manufacture of flexible dies.

Keywords: stamp, guide column, accuracy of processing

Н.К. Резниченко, д.т.н., проф.

Е.Н. Резниченко, к.п.н., доц.

Л.В. Николенко, инженер

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Приведены результаты исследования влияния конструкции изделия на эффективность индукционного нагрева.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, стандартная посадка, натяг, технологичность, энергосбережение.*

Введение.

Соответствие конструкции изделия тем или иным технологиям, для сборочных, и соответственно, ремонтных производств с соответствующими типажом оборудования, является важнейшим фактором экономии трудовых и энергетических ресурсов. Оно во многом определяет и качество получаемых изделий.

Размеры соединений, величины натягов и допустимые температуры нагрева металла обуславливают область применения технологии сборки с использованием индукционного нагрева. Конфигурация и пространственная форма деталей, конструкция соединения являются факторами применимости тех или иных технологических схем сборки или разборки.

Обзор последних источников исследований и публикаций.

К известным требованиям к конструкции составных частей – деталей, связанным с их обработкой, контролем качества и др., для технологий, использующих индукционный нагрев, следует добавить требование минимального расхода энергии.

Расход энергии при технологиях использующих нагрев достаточно высок. При индукционном нагреве он может быть существенно снижен поскольку возможно производить локальный нагрев [1, 2, 3]. Рассмотрим, как может уменьшаться расход тепловой энергии в зависимости от технологичности конструкции детали по показателю энергосбережения.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

Как известно, при локальном нагреве части детали в материале вследствие градиента температур возникают температурные напряжения. Определим затраты тепловой энергии в зависимости от размерных соотношений и конфигурации нагреваемых детали которые необходимы для компенсации натяга.

Постановка задачи.

Основной задачей является исследование возможной экономии энергии при нагреве ступенчатыхосесимметричных деталей с учетом возникающих напряжений.

Основной материал и результаты.

Конструкция любого изделия должна отвечать, в первую очередь ее функциональному назначению. Но при этом, с точки зрения технологии, к ней предъявляются сборкой или разборкой определенные требования. Для соединений с натягом они включают требования назначения стандартных посадок, удобства манипулирования и базирования деталей. На основании анализа имеющихся общих требований к технологичности различных сборочных единиц (ГОСТ 14.201-8), можно сформулировать некоторые требования к конструкции сборочной единицы, связанные с использованием нагрева. Требования к составу:

сборочная единица должна расчленяться на рациональное число составных частей с учетом принципа агрегатирования;

сборка или разборка изделия не должна обуславливать применения сложного технологического оснащения;

конструкция и ее месторасположение в изделии должна соответствовать требованиям механизации и автоматизации;

конструкция сборочной единицы должна предусматривать базовую составную часть, которая является основной для расположения остальных составных частей; базовая составная часть должна быть удобной для правильной установки на рабочем месте в стапеле, приспособлении, на рабочем столе, сборочной площадке и пр;

компоновка сборочной единицы должна позволять производить сборку или разборку при неизменном базировании составных частей, обеспечивать удобный доступ к местам, требующим контроля, регулировки и проведения других работ, регламентированных технологией подготовки изделия к использованию по назначению, техническому обслуживанию и ремонту;

компоновка сборочной единицы и способы соединения должны обеспечивать легкосъемность составных частей с малым ресурсом (материальным и энергетическим).

Таблица 1. Размеры колец, вид посадки, необходимая температура нагрева и расход энергии при их сборке с нагревом

d, мм	D _H , мм	l, мм	$i^* = 1/d$	Тип посадки	N, мм	$\Delta T, ^\circ C$	W, кДж
45	67,5	25	0,556	n6	0,0671	193,4	35,759
50	75	27	0,540	n6	0,0707	190,8	47,040
55	82,5	29	0,527	p6	0,0742	197,9	63,404
60	90	31	0,517	r6	0,0775	199,2	81,202
65	97,5	33	0,508	r7	0,0806	205,5	104,656
70	105	35	0,500	„	0,0837	194,6	121,905
75	113	37	0,493	„	0,0866	185,0	140,664
80	120	39	0,488	„	0,0894	190,7	173,848
85	128	41	0,482	„	0,0922	182,3	197,233
90	135	43	0,478	„	0,0949	174,8	222,307
95	143	45	0,474	„	0,0975	167,9	249,102
100	150	47	0,470	„	0,1000	164,3	282,124
105	158	49	0,467	„	0,1025	158,6	312,871
110	165	50	0,455	„	0,1049	153,3	338,671
120	180	55	0,458	„	0,1095	154,0	445,527
130	195	58	0,446	„	0,1140	145,2	519,693
140	210	63	0,450	„	0,1183	138,7	625,576
150	225	65	0,433	„	0,1225	131,9	704,397
160	240	70	0,438	„	0,1265	127,4	834,113
170	255	74	0,435	„	0,1304	121,9	952,442
180	270	77	0,428	„	0,1342	124,2	1132,020
190	285	81	0,426	„	0,1378	119,4	1274,953
200	300	84	0,420	„	0,1414	116,3	1426,875
220	330	90	0,409	„	0,1483	108,4	1725,081
240	360	96	0,400	„	0,1549	103,2	2084,898
280	420	106	0,379	„	0,1673	98,6	2991,288
320	480	115	0,359	„	0,1789	93,4	4019,223

Сначала проанализируем нагрев деталей типа кольцо, размеры и натяги для которых взяты по внутренним кольцам шариковых подшипников средней серии. При этом наруж-

ный диаметр кольца D определяется как $1,5d$. Кольца являются аналогами ступиц ступенчатых деталей. В расчетах использовались следующие значения параметров материала: $c = 470 \text{ Дж / кг } ^\circ\text{C}$; $\gamma = 7800 \text{ кг / м}^3$; $\beta = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1 / } ^\circ\text{C}$.

В таблице 1 приведены данные по деталям и расходу теплоты на их нагрев, а на рис. 1 кинетика изменения температур ΔT и расхода энергии W .

Как видно, при увеличении размеров детали необходимая температура уменьшается, а потребное количество энергии все равно растет. Оценку величины требуемой тепловой энергии для компенсации натяга в осесимметричной детали ступица с диском (соответствует, например, зубчатому колесу по рис. 2) выполним с учетом возникающих температурных напряжений в зоне перехода диска в ступицу.

Количество сэкономленной тепловой энергии для компенсации натяга при неравномерном нагреве по сравнению с равномерным будет определяться соотношениями нагретых и не нагретых масс детали. Предельная максимальная экономия будет, очевидно, когда диск не нагревается, однако и напряжения будут максимальными.

Решение задачи Ляме о напряженно – деформированном состоянии полой трубы испытывающей внутреннее и внешнее давление дает для ступицы следующие значения

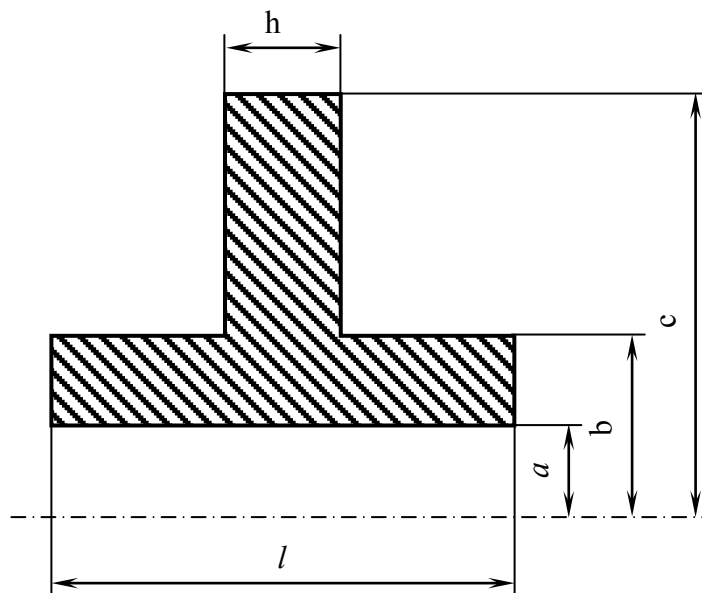


Рис. 2. Геометрическая форма детали диск со ступицей

нормальных напряжений в цилиндрических координатах [4]:

$$\sigma_r = + \frac{a^2 b^2 (q - p)}{(b^2 - d^2) \cdot r^2} - \frac{a^2 p - b^2 q}{b^2 - a^2},$$

$$\sigma_\theta = \frac{d^2 b^2 q}{(b^2 - a^2) \cdot r^2} - \frac{d^2 p - b^2 q}{b^2 - a^2}$$

где P, q – давление на внутренней и наружной поверхностях ступицы соответственно; r – текущий радиус.

Поскольку напряжения σ_r и σ_θ действуют на взаимоперпендикулярных площадках, суммарное напряжение будет равно их геометрической сумме:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2}.$$

При $p=0$ и $r=b$

$$\sigma_r = \varphi \sigma_\theta = q \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2}. \quad (1)$$

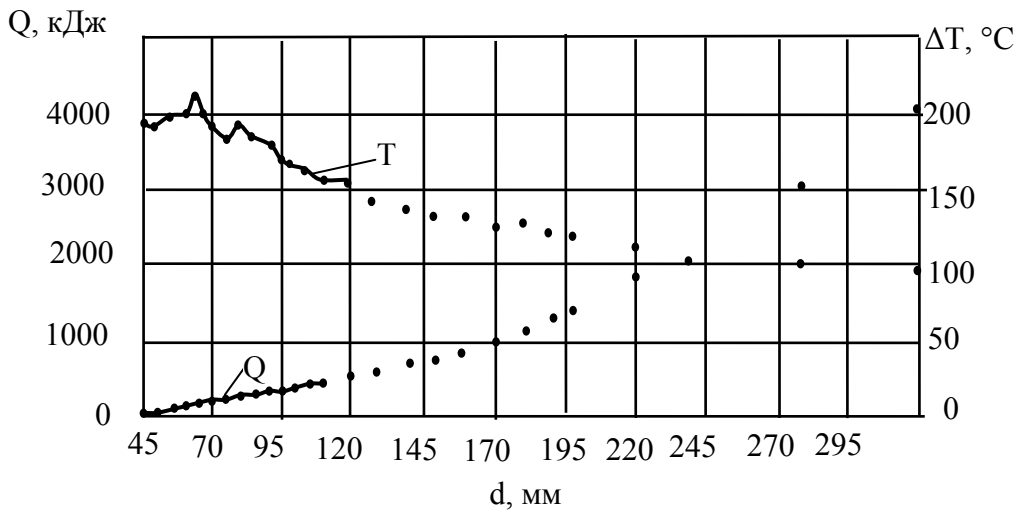


Рис. 1. Температура и тепловая энергия, необходимые для компенсации натяга при сборке или разборке

Радиальное перемещение поверхностей ступицы на наружном диаметре ($r=b$) при $p=0$:

$$u_{cm}'' = -\frac{(1+\nu)qb}{E(b^2 - a^2)} [a^2 + 2\nu b^2], \quad (2)$$

на внутреннем диаметре ($r=b$):

$$u_{cm}^e = -\frac{2(1+\nu)^2 qab^2}{E(b^2 - a^2)}. \quad (3)$$

Радиальное перемещение диска на радиусе $r=b$ при отсутствии давления на наружной поверхности диска:

$$u_D = \frac{(1+\nu)qb}{E(c^2 - b^2)} [c^2 + (1 - 2\nu)b^2], \quad (4)$$

Из условия совместности деформаций диска и ступицы при перепаде температуры $\Delta T''$, компенсирующем натяг соединения, когда нагревается только ступица

$$b_\beta \Delta T'' = \left| u_{cm}'' \right|_{r=b} + \left| u_D \right|_{r=b}. \quad (5)$$

Подставляя в это уравнение выражения (2) и (4) получим:

$$\Delta T = \frac{(1+\nu)q}{\beta E} F_1, \quad (6)$$

где F_1 безразмерный коэффициент:

$$F_1 = \frac{c^2 + (1+2\nu)b^2}{c^2 - b^2} + \frac{d^2 + (1+2\nu)b^2}{b^2 - a^2}.$$

Из уравнения (5) следует, что

$$q = \frac{\Delta T'' \beta E}{(1+\nu) F_1}. \quad (7)$$

Как видно из (5), когда нагреву подвергается только ступица колеса, давление q , возникающее на границе ступицы с диском, определяется перепадом температур между ними. Оно ограничивается допускаемыми напряжениями для материала.

Подставляя (7) в формулы (1) имеем:

$$\sigma_r = -q = -\frac{\Delta T'' \beta E}{(1+\nu) F_1}, \quad (8)$$

$$G_\phi = -\frac{\Delta T'' \beta E (a^2 + b^2)}{(1+\nu) F_1 (b^2 - a^2)}. \quad (9)$$

Тогда суммарное напряжение:

$$\sigma_{(\Sigma)} = \frac{\Delta T'' \beta E}{(1+\nu) F_1} \sqrt{1 + \frac{(a^2 + b^2)}{(b^2 - a^2)^2}} \leq [\sigma]. \quad (10)$$

Допускаемый по условию прочности перепад температур при нагреве равен:

$$[\Delta T''] = \frac{[\sigma_{(\Sigma)}] (1+\nu) F_1}{\alpha E \sqrt{1 + \frac{(a^2 + b^2)}{(b^2 - a^2)^2}}}. \quad (11)$$

Из (3) и (7) имеем величину допускаемого, из условий прочности, перемещения U_{cm} внутренней поверхности ступицы для компенсации натяга соединения:

$$\left[U_{cm} \right]_{r=a} = -\frac{2(1+\nu) a b^2 [\Delta T''] \beta}{(b^2 - a^2) F_1}. \quad (12)$$

Если $U_{cm} \geq N$, то можно нагревать только ступицу детали.

Количество тепла, необходимого для ступицы:

$$Q'' = c m_c [\Delta T''] \quad (13)$$

где m_c – масса ступицы.

Зависимость между температурными перепадами при нагреве равномерно всей детали $\Delta T'$ и части $\Delta T''$, можно найти из условия обеспечения в обоих случаях одинакового радиального расширения отверстия в ступице U_{cm} :

$$\frac{2(1+\nu) a b^2 [\Delta T''] \beta}{(b^2 - a^2) F_1} = \beta a \Delta T'.$$

Тогда:

$$\Delta T' = [\Delta T''] \frac{2(1+\nu) b^2}{(b^2 - a^2) F_1}. \quad (14)$$

Отметим, что это уравнение справедливо при условии, что величина $[\Delta T'']$, допускаемая по критерию ограничения напряжения $\sigma_{(\Sigma)} \leq [\sigma]$, которое возникает в месте перехода горячей ступицы в холодный диск.

Сопоставление тепловых затрат при полном нагреве Q^1 и локальном нагреве только ступицы Q'' дает следующее соотношение:

$$Q^1 = Q'' \frac{(m_c + m_d)2(1+\nu)b^2}{m_c(b^2 - d^2)F_1}, \quad (15)$$

где m_d – масса диска; $Q^1 = c(m_c + m_d)\Delta T^1$.

Обозначив по аналогии с F_1 отношение $\frac{2(1+\nu)b^2}{(b^2 - a^2)F_1}$, как безразмерный коэффициент F_2 , имеем:

$$Q^1 = Q'' \frac{m_c + m_d}{m_c} F_2. \quad (16)$$

Для ориентировочной оценки величины теплотрат при двух вариантах нагрева геометрические параметры b и c удобно выразить в функции параметра a – радиуса отверстия в ступице. В качестве примера выберем зубчатое колесо, с типичными соотношениями размеров: $b = 2a$; $c = 2b = 4a$; длина ступицы $l = 1,6b = 3,2a$; толщина диска $h = 0,6a$. Тогда масса ступицы:

$$F_2 = \frac{2(1+\nu)4a^2}{(4a^2 - a^2)F_1} = 0,8$$

$$m_c = \nu l \pi (b^2 - a^2) = 9,6 \pi \nu a^3,$$

а масса диска:

$$m_d = \nu h_d \pi (c^2 - b^2) = 7,2 \pi \nu a^3.$$

Соотношение затрат тепла из (16)

$$\frac{Q^1}{Q''} = 0,8 \left(1 + \frac{7,2 \pi \nu a^3}{9,6 \pi \nu a^3} \right) = 1,4.$$

Здесь $F_2 = 0,8$ получено при значении коэффициента Пуассона для стали 0,3 при соответствующем значении $F_1 = 4,33$. Эта величина отношения тепловых затрат является завышенной, так как рассматриваемая схема нагрева колеса, когда нагревается только ступица в значительной мере является искусственной. В реальных условиях диск всегда нагревается, как минимум, вследствие теплопередачи. Однако эта цифра показывает предельную возможность экономии энергии сохранении целостности детали.

Для анализа влияния соотношений геометрических характеристик детали типа ступица с диском и неравномерности ее нагрева по радиусу, были выполнены расчеты по приведенным зависимостям и составлены таблицы. Расчеты выполнялись для одного и того же расширения посадочного отверстия детали.

Анализ показал, что:

– максимально экономится энергия при $h/l = 0,3 \div 0,2$, причем эта величина медленно уменьшается с уменьшением разности температур между ступицей и диском;

– затраты энергии существенно зависят от отношения c/b , уменьшаясь от величины 0,95 до 0,65 (при практически реализуемых значениях b/a от 1,3 до 2,0);

– отношение b/a влияет на затраты энергии незначительно. Тем не менее, максимальная экономия энергии достигается при $b/a = 1,5$ – наиболее широко используемой

геометрии детали в применяемых конструкциях. При меньших значениях b/a затраты энергии несколько возрастают, а при больших значениях практически не изменяется;

– экономия энергии, в зависимости от отношения температур ступицы и диска, для деталей характеризуемых значениями b/a и $c/b=1,8$, изменяется в пределах от 2% до 27%.

График (рис. 3) иллюстрирует сделанные выводы. Геометрические соотношения деталей здесь были следующими: $b/a = 1,5$; $c/b = 1,8$; $h/l = 0,3$. Температуры ступицы

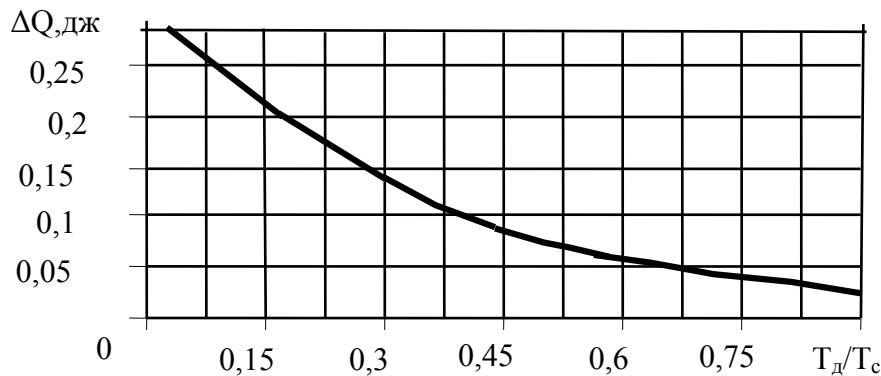


Рис. 3. Изменения величины экономии тепловой энергии ΔQ при различных отношениях температур нагрева диска T_d и ступицы T_c

и диска брались как средние.

Очевидно, что полученные величины значения ΔQ для деталей с другими геометрическими характеристиками будут отличаться от приведенных на графике, однако характер изменения не изменяется.

Поскольку создание ступенчатого распределения температур между ступицей и диском невозможно, полученные количественные оценки экономии энергии являются приблизительными, дающими возможность оценить рациональность использования локального нагрева при технологиях сборки и разборки соединений. Соответственно и возникающие при равномерном нагреве элементов охватываемой детали напряжения, так же будут оценочными. Для более точной и определенной оценки энергетических возможностей при неравномерном нагреве деталей сложной формы необходимо исследовать температурные поля во взаимосвязи с соответствующими им полями механических напряжений. Это позволит разработать рекомендации по наилучшему размещению источников нагрева относительно детали и, значит проектированию оптимальных индукционных нагревателей.

Выводы.

В целом, относительно сложных крупногабаритных деталей следует отметить, что: наилучшая конструкция с точки зрения нагрева та, которая имеет симметрично расположенную ступицу с плавными переходами в диск, а диски – в обод, тогда можно нагревать только часть, прилегающую к посадочной поверхности, что даст экономию тепловой энергии. При этом напряженно деформированное состояние материала можно иметь низкого уровня.

Литература

1. Андреев А.Г., Резниченко Н.К. Напряженно-деформированное состояние составных осесимметричных конструкций, собираемых с натягом при использовании нагрева. // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". -Харків: НТУ «ХПИ». -2005.-№47. -С. 3-8.

2. А.Г.Андреев, Н.К. Резниченко, О.В. Щепкин. Оптимизация нагрева при разборке деталей. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2006. - №32 – С. 3-8.

3. Андреев А.Г., Щепкин А.В. Оптимизация технологических нагревов бандажного колеса при сборке колесной пары тепловоза // *Інформація по 2-й міжнародній науково-технічній конференції «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве» Вісник інженерної академії України, Київ, 2000.* – С. 415-418.

4. Арпентьев Б.М., Зенкин А.С., Куцын А.Н. *Механизация и автоматизация сборочных работ на машиностроительных предприятиях.* – К.: Техніка, 1994. – 232 с.

© М.К. Резніченко, О.М. Резніченко, Л.В. Ніколенко

УДК 621.921:621.923

М.К. Резніченко, д.т.н., проф.

О.М. Резніченко, к.п.н., доц.

Л.В. Ніколенко, інженер

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Наведено результати дослідження впливу конструкції виробу на ефективність індукційного нагріву.

Ключові слова: індукційний нагрів, стандартна посадка, натяг, технологічність, енергозбереження.

UDC 621.921:621.923

M. Reznichenko, Doctor of Science, Professor.

E. Reznichenko, c.p.s., docent.

L. Nikolenko, engineer

Ukrainian engineering pedagogics academy, Kharkov

RESEARCH INFLUENCE OF PRODUCT CONSTRUCTION ON THE EFFICIENCY OF INDUCTION HEATING

The results of studies of the effect of product construction on the efficiency of induction heating are given. It is shown that the use of local heating with the allowable thermal stresses occur, will significantly reduce thermal costs, increase energy efficiency of induction heating.

Keywords: induction heating, standard fit, tightness, manufacturability, energy saving.

**ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА СТРУКТУРУ ТА
ВЛАСТИВОСТІ ХРОМОМАНГАНЦЕВОГО НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ**

Розглянуті питання, пов'язані з деформаційно-фазовим наклепом і зміцненням Fe-C-Cr-Mn-Ti-Si сплавів з маловуглецевою матрицею з метастабільного аустеніту при вмісті 6...7% (об'ємн.) карбідів TiC.

Ключові слова: абразивне зношування, деформаційне зміцнення, метастабільних аустеніт, наплавлення.

Вступ.

Підвищення довговічності деталей машин і інструмента - одна з актуальних сучасних проблем.

Огляд останніх джерел та постановка проблеми

Перспективним напрямком її розв'язку є одержання в сплавах метастабільної структури, здатної до «самоорганізації» під впливом деформації та зношування, що дозволяє їм адаптуватися до умов навантаження й мати високі службові властивості [1-5]. До того ж за умови певного дефіциту матеріальних та енергетичних ресурсів виникає необхідність розробки нових матеріалів, що містять обмежену кількість елементів які не виробляються на сировинній базі України. Так, наприклад, склади наплавленого металу розроблені авторами [1, 2] мають досить високі технологічні та експлуатаційні властивості наплавлень, але використання у якості карбідоутворювачів молібдену та ванадію здорожує матеріал, а за відсутності значної кількості активних карбідоутворювачів [3] знижується не тільки абразивна зносостійкість, але і підвищується схильність до утворення кристалізаційних тріщин за рахунок збільшення вмісту вуглецю у матриці сплаву.

Мета роботи – дослідження ступеню та кінетики деформаційного зміцнення метастабільних наплавочіних сталей системи Fe-C-Cr-Mn-Ti-Si і порівняння їхньої технологічності, і зносостійкості із широко застосовуваними наплавочними матеріалами.

Основний матеріал і результати роботи

Теоретичне обґрунтування розробки

Суть зміцнення при використанні метастабільних структур полягає в тому, що метастабільний аустеніт під впливом навантаження перетерплює мартенситні перетворення.

Деформаційне зміцнення відбувається за рахунок зміни тонкої кристалічної структури. Фрагментація зерен, здрібнювання й дроблення блоків мозаїчної структури приводять до виникнення мікронапружень [3, 4]. Найбільш інтенсивне зміцнення супроводжується виділенням ультрадисперсних карбідів, що концентруються по границях зерен і блоків, що перешкоджають процесу ковзання усередині них. Це приводить до підвищення твердості й зносостійкості сталі, в умовах зношування.

Мартенсит, що утворюється в процесі деформації, має ряд особливостей. Він дуже дисперсний і розташовується в смугах деформації. Пластини й голки мартенситу розділяють зерно аустеніту на частині. Виникнення мартенситних кристалів знімає локальні напруження й запобігає зародженню тріщини. Наявність метастабільного аустеніту і його розпад у процесі мікропластичної деформації сприяє підвищенню міцності. Напруження при складному напруженому стані у вершини тріщини будуть зменшуватися, внаслідок об'ємних змін, обумовлених деформаційним мартенситним перетворенням [1].

Підсумовуючи результати досліджень різних авторів [1-3] можна припустити, що ефект зміцнення метастабільного аустеніту в процесі пластичної деформації в інтервалі температур «точка початку мартенситного перетворення - точка перетворення при деформації» визначається наступними основними факторами:

1. деформаційним зміцненням аустеніту;
2. виділенням дисперсних карбідних фаз;
3. кількістю, міцністю й розподілом мартенситних фаз, що утворюються при деформації;
4. нагартуванням кристалів мартенситу деформації.

Методика проведення досліджень

Прогнозування хімічного складу й зносостійкості виконували методами математичного планування й штучних нейронних мереж.

Наплавлення робили самозахисними порошковими дротами або під шаром флюсу. Склад наплавленого металу й розподіл елементів між фазами визначали хімічним і спектральними методами аналізу, розподіл елементів між фазами - мікрорентгеноспектральним. У якості абразивного середовища використовували: абразивну шкурку з карбідом кремнію фракції 120...200 мкм і гранітну крихту. Для варіанта випробувань на зношування по закріпленому абразиву (SiC) використовували установку із зворотно-поступальним переміщенням випробуваного зразка по поверхні абразивного контртіла. Для випробувань на тертя по абразивному прошарку із гранітної крихти або кварцового піску - методика Хаурта.

Ступінь зміцнення поверхні оцінювався відношенням:

$$H_{\mu} / H_{\mu 0} = f_1(c, P, v, T, S)$$

де

H_{μ} – мікротвердість поверхні тертям;

$H_{\mu 0}$ – мікротвердість поверхні до випробування тертям;

c – хімічний і фазовий состав наплавленого металу;

P – номінальний і фізичний тиск;

v – швидкість відносного переміщення при терті;

T – температура;

S – шлях тертя.

Результати дослідження зношування та поверхневого зміцнення

З наведених на рис. 2, рис. 3 даних вимірювань ріст значень мікротвердості найбільш помітний на початку випробування на шляху тертя близько 100-150 м, далі незначно зростає й після проходження зразком близько 500 м шляху тертя залишається практично незмінною. Глибина зміцнення зростає досить інтенсивно на шляху тертя до 500 м. Далі змінюється менш інтенсивно, і досягає кінцевої величини по проходженню 1500-2500 м шляху. Аналогічним образом змінюється й інтенсивність зношування (рис. 4.).

Структура зони розташованої безпосередньо під поверхнею тертя наплавленого металу 100X9Г8Т4С [6] являє собою аустенітні зерна, з розташованими в них і по границях зерен карбідами титану, і евтектики. При цьому мікротвердість аустенітних зерен швидко зростає досягаючи 9000...10000 МПа, а евтектики - практично не змінюється (рис. 1, рис. 2).

При більш тривалому впливі зношування в приповерхньому шарі виявляються структури з підвищеним ступенем травимості й високою мікротвердістю (більш 10000 МПа).

Скінченна величина глибини зміцнення для всіх випробуваних матеріалів покриття приблизно однакова й дорівнює 150-200 мкм. Такий характер зміни твердості й глибини

шару характерний для всіх з випробуваних матеріалів, однак найбільш виражений для наплавлень зі сталей, що мають аустенітну структуру.

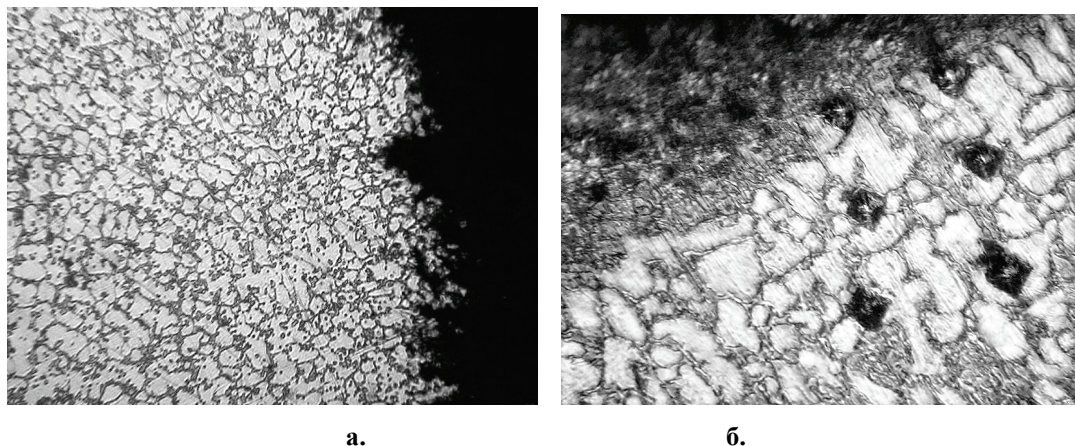


Рис. 1. Мікроструктури приповерхньої зони тертя 100X9Г8Т4С тривалість впливу абразивного зношування 50 м (а) і 1500 м (б) відповідно, $\times 200$

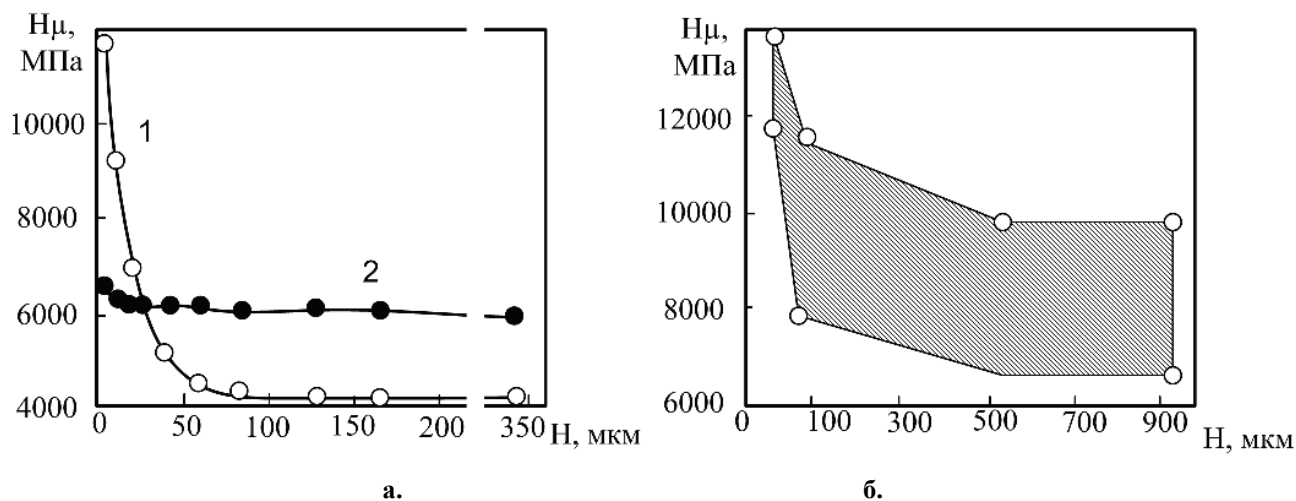


Рис. 2. Розподіл мікротвердості в приповерхньому шарі: а. — 150X10Г10Т4С тертя о карборундову абразивну шкурку, б. — 30В9Х3Ф, контргтіло — Р18. 1. — аустеніт; 2. — евтектика.

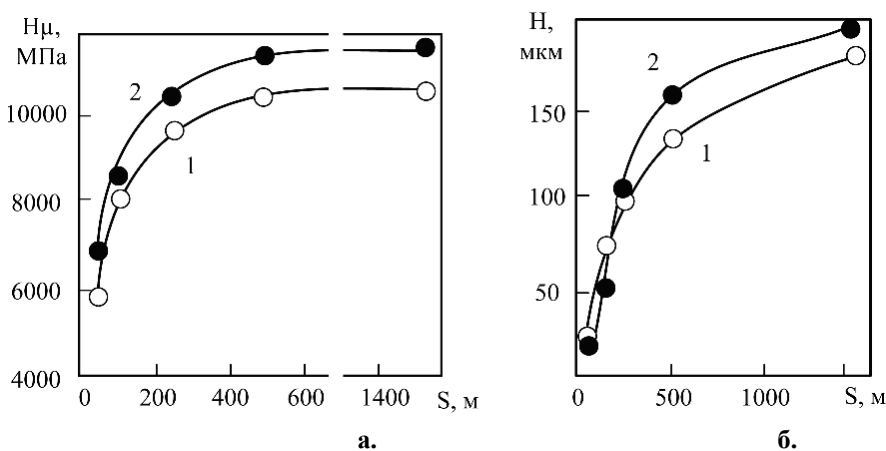


Рис. 3. Зміна мікротвердості (а) і глибини зміцнення (б) у процесі зношування по закріплених абразивних частках карборунду.

1.- 30X10Г10Т 2. - 100X9Г8Т4С

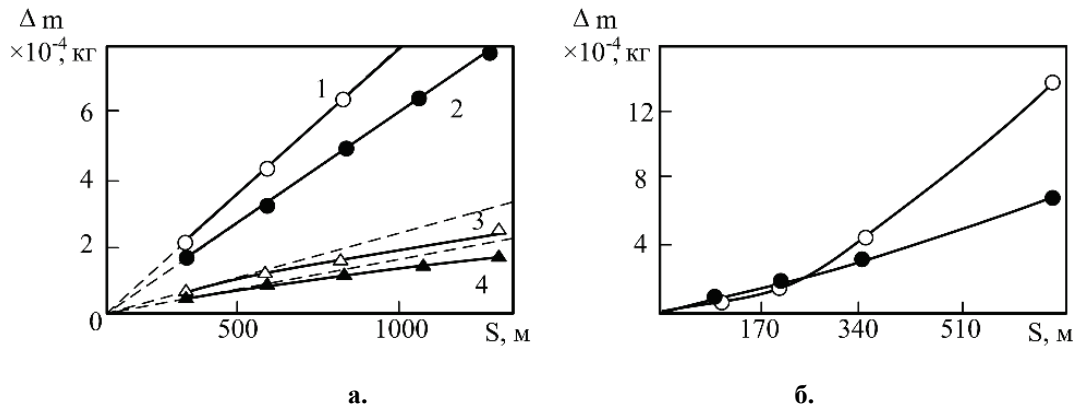


Рис. 4. Зношення наплавленого металу:

а. - сталі з метастабільним аустенітом, контртіло абразивна шкурка SiC; б. — 30В9Х3Ф, контртіло — Р18. 1. — сталь 45; 2. — 90Г9Х3Т4С; 3. — 150Х10Г10Т4С; 4. — 100Х9Г8Т4С; 5.— 30В9Х3Ф (393 С); 5. - 30В9Х3Ф (923 С).

Для наплавлень зі сталі 90Х2Г8Т4С3, що має структуру, характерну для самогартівних сталей, з невеликою кількістю залишкового аустеніту, мікротвердість приповерхнього шару становить 4400 МПа при вихідній мікротвердості в стані до випробування тертям – 3950 МПа. У той же час, для наплавленого металу 30Х10Г10 зі структурою метастабільного аустеніту (крім аустеніту в структурі наплавленого металу може міститися до 20% мартенситу) мікротвердість поверхневого шару на глибині 3,2 мкм від поверхні становить 11000 МПа при вихідному її значенні близько 3800 МПа, тобто зміна величини мікротвердості становить 7200 МПа. Для наплавленого металу 100Х8Г7Т4С3 (70...75% – аустеніт, 20...22% – мартенсит і 5...8% зерен карбиду титану) середнє значення мікротвердості поверхневого шару (глибина – 3,2 мкм) 11000...12000 МПа, у той час як у вихідному стані для цієї сталі воно становить 4600 МПа.

Висновки.

1. Наплавлення з хромомарганцевих сталей зі структурою із метастабільного аустеніту мають високу зносостійкість в умовах абразивного зношування у порівнянні з наплавленнями з вольфрамової сталі.
2. Висока зносостійкість досягається деформаційним зміцненням поверхні у процесі зношування і корелює з мікротвердістю поверхневого шару.
3. Із зменшенням долі метастабільного аустеніту ступінь зміцнення і зносостійкість знижуюються. Для хромомарганцевих наплавлень з мартенситною структурою деформаційне зміцнення незначне, що вказує на ведучу роль деформаційного зміцнення аустеніту та фазових перетворень на зносостійкість наплавлень.
4. При випробуваннях на абразивне зношування для хромомарганцевих сталей інтенсивність зношування зменшується, що не характерно для інших випробуваних матеріалів.

Література

1. Малинов Л.С., Малинов В.Л. Марганецсодержащие наплавочные материалы. // Автоматическая сварка. - 2001. - №8. - С. 34-36.
2. Рябцев И. А., Кондратьев И. А., Васильев В. Г. Износостойкость наплавленного металла системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Mo.// Автоматическая сварка. - 2002. - №4. - С. 48-51.
3. Филипов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. - М.: Металлургия, 1988. - 256 с.
4. Богачев И.Н., Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. - М.: Металлургия, 1972. - 189 с.

5. Кальянов В.Н., Петренко А.Н. Износостойкость наплавленного металла с повышенной долей карбида титана // Автоматическая сварка. 2004. №12. С. 59-60.

© Петренко А.М.

УДК 621.791.92

Петренко А.Н., к.т.н., доцент
Украинская инженерно-педагогическая академия

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХРОМОМАНГАНЦЕВОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Рассмотрены вопросы, связанные с деформационно-фазовым наклепом и упрочнением Fe-C-Cr-Mn-Ti-Si сплавов с малоуглеродистой матрицей метастабильного аустенита при образовании 6...7% (объемн.) термодинамически стойких карбидов TiC.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, деформационное упрочнение, метастабильный аустенит, наплавка.

UDC 621.791.92

Petrenko A.N.
Ukrainian engineering-pedagogical academy

THE INFLUENCE OF STRAIN HARDENING TO THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FE-C-CR-MN STEELS

The article deals with problems associated with strain-hardening of Fe-C-Cr-Mn-Ti-Si alloys with low carbon metastable austenite matrix containing 6 ...7% (vol.) thermodynamically stable TiC carbide.

Keywords: abrasive wear, deformation hardening, the metastable austenite, surfacing.

УДК 621.7

В.Л. Хорольский
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТРЕЗКИ МЕТАЛА ПРИ КРОМКООБРАЗОВАНИИ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПОД СВАРКУ

В работе выполнено экспериментальное исследование полей скоростей в зоне деформации при отрезке металла при кромкообразовании листовой заготовки под сварку.

Ключевые слова: отрезка, поля скоростей, зоны пластической деформации, эпюры давлений.

Введение. Разделка скосов и снятие фасок перед сваркой делается для того, чтобы получить шов, имеющий не менее 80% прочности целой детали. Однако для реализации технологии обработки кромок с применением специальных штампов и прессового оборудования является проблема стойкости штампового инструмента. Путь решения этой про-

блемы только один – изготовление штампов из более прочных и износостойких материалов, например твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и титана.

Переход к твердосплавным штампам является сложной и многогранной проблемой. Трудности внедрения твердосплавных разделительных штампов усугубляются недостаточной разработкой теории процесса резки штампами. Высокая износостойкость режущей части твердосплавных матриц и пуансонов является необходимым, но недостаточным условием нормальной их работы. Режущие кромки инструмента должны быть также и прочными.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Большинство твердосплавных отрезных штампов выходит из строя вследствие хрупкого разрушения – скалывания режущих кромок матриц и пуансонов. Поэтому изучение хрупкого разрушения режущих кромок штампового инструмента в процессе отрезки при кромкообразовании листовой заготовки является весьма актуальной задачей.

Значительный вклад в анализ и обоснование надежных технологических процессов холодной штамповки и в их интенсификацию внесли такие учёные, как С.И. Губкин, В.П. Унксов, В.В. Сторожев, Р.В. Пихтовников, Л.А. Шофман, Е.А. Попов, И.А. Норицын, Е.А. Исаченков и др. [1–5],

Постановка задач исследований. Остаются нерешенными ряд задач, связанных с определением напряжений, возникающих в режущей части матриц и пуансонов при кромкообразовании листовой заготовки под сварку.

При теоретическом исследовании процесса резки исходным параметром служило поле скоростей течения частиц металла в зоне деформации. Основной целью экспериментального исследования была проверка верности предположения о характере зависимости скорости движения частиц вырезаемого металла от координат, а также определение действительных размеров очага пластической деформации.

Для количественной оценки полученных формул путём сравнения экспериментального усилия отрезки с теоретическим, полученным как интегральная сумма нормальных давлений на контактную торцовую поверхность, строили диаграммы истинных напряжений (кривые упрочнения) [6].

Материал и результаты исследований. При экспериментальных исследованиях использовалось несколько методов. Для определения размеров очага пластической деформации и для определения теоретического поля скоростей течения частиц металла в зоне деформации применялся метод координатной сетки. На рис. 1 показаны деформированные составные заготовки с координатной сеткой, нанесенной в осевой плоскости.

Сопоставление координатных сеток, нанесенных на стальные, медные, алюминиевые и свинцовые образцы, показало, что характер их искажения при деформации мало зависит от рода материала.

По искажению координатных сеток делалось предположение о характере зависимости скорости движения частиц отрезаемого металла от координат. Искажение координатной сетки, а также величина пояска смятия на торцовой контактной поверхности определяли размеры очага деформации.

Экспериментально выявленные границы пластической зоны в известной мере условны. В связи с несовершенством техники измерения, неравномерностью деформации, неоднородностью механических свойств деформируемой заготовки и другими факторами надежно фиксировать малые приращения деформации весьма затруднительно.

Для более точного представления о характере движения частиц деформируемого металла образцы фотографировались, что позволяло наблюдать искажение координатной сетки при многократном увеличении (рис. 2).

Для качественного определения характера распределения нормальных напряжений по торцовой контактной поверхности отрезаемого металла (по пояску смятия) для медных образцов применялся метод измерения твердости. Распределение микротвердости по ши-

рине пояска смятия вырезанной медной заготовки представлено на рис. 3. Учитывая большую трудоемкость определения микротвердости, связанную с подготовкой поверхности измеряемого образца, исследования с медными тарировочными образцами не проводились.



Рисунок 1 – Алюминиевый и медный деформированные составные образцы с координатной сеткой

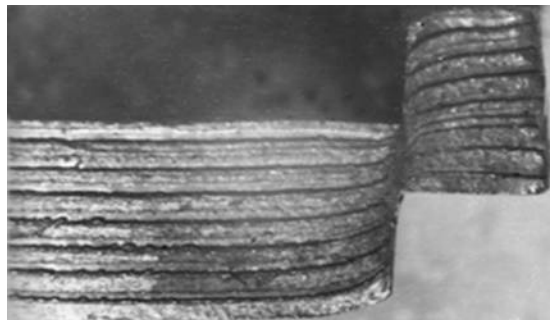


Рисунок 2 – Искажение координатной сетки при отрезке

Экспериментальные исследования по определению характера распределения нормальных напряжений по ширине пояска смятия проводились на стальных образцах толщиной 7,5 мм.

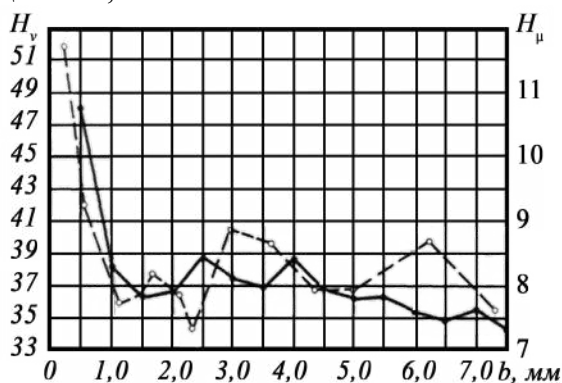


Рисунок 3 – Распределение твердости по ширине пояска смятия отрезанной медной заготовки толщиной $h = 12$ мм: — измерение микротвердости; -- измерение твердости по Викерсу

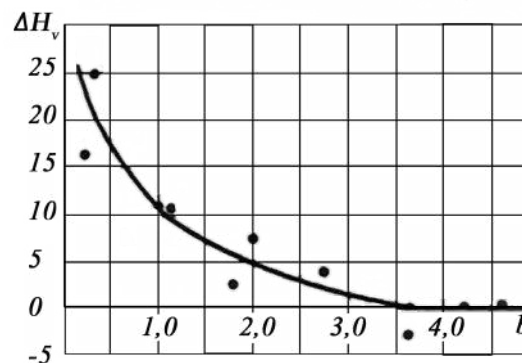


Рисунок 4 – График распределения изменения твердости по ширине пояска смятия отрезанной стальной заготовки толщиной $h = 7,5$ мм

Исходя из требований чистоты поверхности образцов при замере твердости по Викерсу, заготовки предварительно шлифовались с двух сторон с последующей доводкой на мелкозернистой наждачной бумаге и полировкой. Перед вырубкой измерялась твердость в 5...7 точках каждого образца на приборе ТП-2 при нагрузке $P = 100$ Н. Вырубка осуществлялась в штампе с рабочим размером пуансона диаметром 20 мм, после чего измерялась твердость по пояску смятия на том же приборе. Расстояние от режущей кромки до центра каждой лунки определялось на большом инструментальном микроскопе с точностью 0,005 мм. Чтобы исключить влияние неоднородности структуры, имеющейся до деформации при исследовании пользовались не абсолютной величиной твердости, а её изменением, т.е. разностью полученных величин твердости после деформации и средней величиной твердости до деформаций. Строился график распределения изменения твердости по ширине пояска смятия « b » (рис. 4). Характер кривой брался также с учётом распределения твердости на медных заготовках.

Для перехода от кривой распределения твердости по ширине пояска смятия к характеру кривой распределения нормальных напряжений использовались тарировочные образцы, которые изготавливались в виде колец (рис. 5) с размерами диаметров 20 мм и 28 мм

и высотой 7,5 мм, т.е. тарировочный образец представлял собой пластически-деформируемый объём при вырубке. Также как и заготовки для вырубке тарировочные образцы шлифовались с двух сторон с последующей полировкой. Каждый образец нумеровался и замерялась его твердость, после чего все образцы осаживались между плоскими бойками на универсальной испытательной машине УИМ-50 на различную высоту. Рабочие поверхности бойков также полировались.

По результатам испытаний строили график «давление (σ) - деформация (ϵ)», а после замера твердости осаженных образцов строился график "изменение твердости (ΔH_v) - деформация (ϵ)". Стоит отметить, что влияние имеющейся до деформаций неоднородной структуры по площади образца, а также погрешности самого процесса измерения твердости, усугубляющиеся недостаточной чистотой поверхности образцов после деформации, дают значительный разброс точек на диаграмме. Однако характер расположения точек на диаграмме позволяет сделать заключение о линейной зависимости изменения твердости от деформации. Путем обработки данных и их преобразования по способу наименьших квадратов [7], получили характер распределения нормальных давлений по ширине пояса смятия (рис. 6).

Необходимо отметить, что хотя метод твердости дает только приближенные качественные указания на распределение деформаций (главным образом) и напряжений, полученный экспериментально характер распределения нормальных напряжений по ширине пояса смятия согласуется с теоретическими и экспериментальными работами других исследователей [8, 9].



Рисунок 5 – Тарировочные стальные образцы

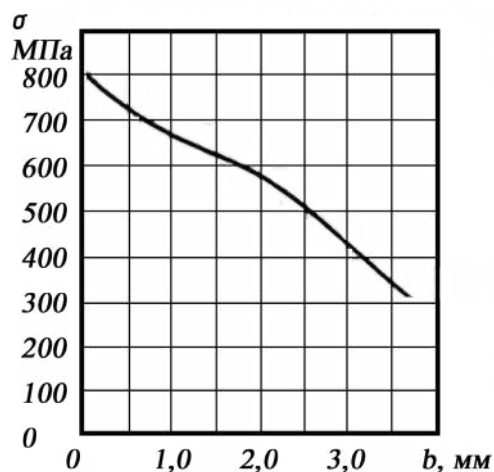


Рисунок 6 – Характер распределения нормальных давлений по ширине пояса смятия, вырезанного стального образца толщиной $h = 7,5$ мм

Теоретически подсчитанные перемещения точек деформируемой зоны при отрезке накладывались на искажение координатной сетки разрезанного образца. Сравнение деформированных зон, обусловленных теоретическими полями скоростей (1) и (2), с искажением координатной сетки при отрезке, полученным экспериментально, показано на рис. 7.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_x = U_0 - \frac{5V_0}{b^5} \left(x - \frac{2x^2}{h} + \frac{4x^3}{3h^2} \right) y^4, \\ V_y = \frac{V_0}{b^5} \left(1 - \frac{4x}{h} + \frac{4x^2}{h^2} \right) y^5 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_x = U_0 - \frac{5V_0}{b^5} xy^4, \\ V_y = \frac{V_0}{b^5} y^5 \end{array} \right. \quad (2)$$

где U_0 – скорость перемещения рабочего инструмента.

Как видно из рисунка, деформированная зона при отрезке сравнительно точно описывается теоретическими полями скоростей. Экспериментальные исследования показывают, что составляющая поля скоростей V_y является функциональной зависимостью координат высшего порядка. Точно установить эту зависимость не представилось возможным.

Из рис. 7 видно, что хотя поле скоростей по формуле (1) и более точно описывает составляющую скорость V_y , чем поле, описанное по формуле (2), однако последнее более точно описывает составляющую скорости V_x . Поэтому можно считать оправданным при теоретическом исследовании процесса отрезки использование поля скоростей по формуле (2).

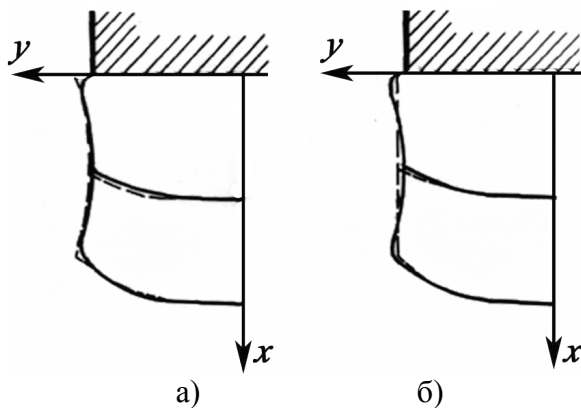


Рисунок 7 – Схема деформированной зоны при отрезке:

а) деформированная зона, обусловленная теоретическим полем скоростей (2-26), б) деформированная зона, обусловленная упрощенным полем скоростей (2-29); - - деформированная зона, полученная экспериментально по искажению координатной сетки; - - - деформированная зона, обусловленная теоретическим полем скоростей

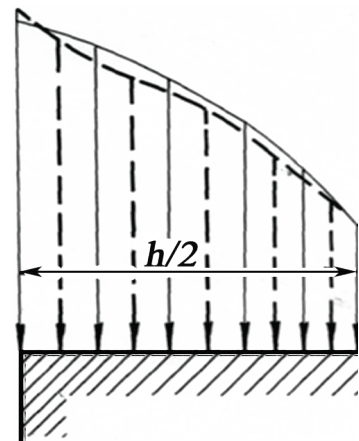


Рисунок 8 – Теоретическая (-) и экспериментальная (- -) эпюры нормальных напряжений, действующих по торцевой контактной поверхности (пояску смятия)

Выражение для определения нормальных напряжений, действующих по пояску смятия ($X=0$), будет иметь вид

$$\sigma_{xx} = -\sigma_0 \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{6y}{h} \right) \right), \quad (3)$$

где y изменяется от $1/6 h$ до $2/3 h$.

Качественное сравнение эпюры нормальных напряжений, действующих по пояску смятия, полученной теоретическим путём по формуле (3), с характером распределения давления по пояску смятия, полученного экспериментально, представлено на рис. 8.

Достаточно близкий характер теоретической и экспериментальной эпюр нормальных давлений указывает на достоверность полученных теоретическим путём выражений, характеризующих напряженное состояние вырезаемого металла в зоне деформации.

Для количественной оценки правильности этих выражений проводилось сравнение теоретических и экспериментальных значений усилия отрезки. Теоретические значения усилия отрезки находились как интегральная сумма нормальных напряжений на торцовую контактную поверхность режущего инструмента. Результаты сравнения сведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что усилия резания, подсчитанные теоретическим путём, являются завышенными по сравнению с экспериментальными величинами. Для стальных образцов погрешность не превышала 11%. Достаточно большие расхождения, полученные для алюминиевых образцов, можно объяснить тем, что ширина зоны упругой деформации для алюминия будет отличаться от ширины зоны упругой деформации для стали, что изменит выражение (3).

Достаточно точное совпадение усилий резания, подсчитанных по нормальным напряжениям, действующим на торцовую поверхность инструмента, с усилиями резания для различных марок сталей, подсчитанных по выражению:

$$P = L \cdot h \cdot \sigma_{cp} , \quad (4)$$

при периметре реза L , равном единице, получено для различных марок сталей.

Таблица 1 – Сопоставление теоретических и полученных экспериментальных значений усилия отрезки

№	Материал	Толщина, мм	Механические свойства материала σ_b , МПа	Усилие резки, кН		Погрешность, %
				Теория	Эксперимент	
1	Сталь	7,5	525	202,5	182,5	11
2	Сталь	2	525	114,0	105,0	8,5
3	Алюминий	3	77,5	25,25	18,85	34,5
4	Алюминий	2	77,5	16,85	13,85	21,5

Анализ эпюры нормальных напряжений, действующих по контактным поверхностям показывает, что сумма нормальных напряжений, действующих на боковую контактную поверхность, оставляет примерно 0,4 от суммы напряжений, действующих на торцовую поверхность, что совпадает с данными [11].

Выводы.

1. Экспериментальное исследование поля скоростей в зоне деформации при отрезке показало, что теоретическое поле скоростей, описываемое уравнениями (1) и (2), достаточно верно отражает движение частиц металла в зоне деформации при отрезке.

2. Анализ искажения координатной сетки при отрезке металла показывает, что ширина пояска смятия, т.е. зоны пластической деформации на контактной торцовой поверхности, равна половине толщины вырезаемого металла или близка к этой величине..

3. Качественное сравнение теоретической и экспериментальной эпюры давлений на торцовую контактную поверхность указывает на достоверность полученных формул, характеризующих напряженное состояние металла в зоне пластической деформации при отрезке.

4. Количественная проверка полученных формул сравнением теоретических и экспериментальных значений усилия резания и распирающего усилия также показывает их достаточную для практических расчётов точность.

Литература

1. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – 4-е изд., перераб., доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Шофман Л.А. Теория и расчёты процессов холодной штамповки / Л.А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.
3. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
4. Finckenstein E. Untersuchung des Werkzeugverschleißes beim Schneiden von Feinblech // *Industrie Anzeiger*. – 1970. – Bd. 92, № 65. – PP. 1551-1552.
5. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
6. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. – М.: Машиностроение, 1968. – 131с.
7. Зельдович Я.Б. Элементы прикладной математики / Я.Б. Зельдович, Мышкис А.Д. – М.: Наука, 1967. – 592 с.
8. Чудаков П.Д. Исследование технологии процесса вырубki пробивки / П.Д. Чудаков // *Исследования в области оборудования и технологии штамповки: Сб. тр. СТАНКИН (М.)*. – 1958. – № 4. – С. 83-109.
9. Лисин А.Г. Определение напряжений на режущей кромке штампа методом линий скольжения / А.Г. Лисин // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1964. – №3. – С. 20-22.
9. Звороно Б.П. Расчет и конструирование штампов для холодной штамповки / Б.П. Звороно. – М.: Машгиз, 1949. – 196 с.
10. Маклаков А. Я. Исследование конструкции тонких вырубных матриц / А.Я. Маклаков // *Исследования в области оборудования и технологии штамповки: Сб. науч. трудов*. – М.: Машгиз, 1958. – С. 222–235.

© В.Л. Хорольський

УДК 621.7

Хорольський В.Л.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВІДРІЗАННЯ МЕТАЛУ ПРИ КРОМКОУТВОРЕННІ, ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПІД ЗВАРЮВАННЯ

В роботі виконано експериментальне дослідження полів швидкостей в зоні деформації при відрізанні металу при кромкоутворенні листової заготовки під зварювання.

Ключові слова: відрізка, поля швидкостей, зони пластичної деформації, епюри тисків.

**INVESTIGATION THE PROCESS OF PARTING METAL AT FORMATION
A HEM THE SLAB FOR WELDING**

This paper presents the experimental investigation of the velocity field in the deformation zone during the parting metal of formation a hem the slab for welding.

Keywords: *parting metal, the velocity field, the zones of plastic deformation, pressure diagrams.*

ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЗАГОТОВОК ПРИ ЭКСЦЕНТРИЧНОЙ ОСАДКЕ ВЫПУКЛЫМИ ВСТАВКАМИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ПРОФИЛЯ

Разработана методика исследования формоизменения цилиндрических заготовок при эксцентричной осадке выпуклыми вставками с различной высотой профиля в пакете компьютерного конечно-элементного моделирования с применением методики планирования эксперимента. В результате исследований получены закономерности, которые позволяют прогнозировать макропоказатели формоизменения цилиндрической заготовки при эксцентричной осадке выпуклыми вставками, учитывающие исходные размеры заготовки, конструкцию инструмента и величину эксцентриситета.

Ключевые слова: цилиндрическая заготовка, эксцентричная осадка, выпуклые бойки, формоизменение, планирование эксперимента.

Введение. Внедрение предварительных профилирующих операций для достижения приближения формы заготовки к конфигурации поковки при штамповке [1] получило большое распространение в современной кузнечно-штамповочной отрасли и имеет большие перспективы для дальнейших разработок.

Подготовка формы заготовки позволяет перераспределить силовые режимы по переходам, улучшить заполнение ручьев, снизить давления на контакте инструмента и заготовки, обеспечив равномерное напряженно-деформированное состояние инструмента. Введение предварительного профилирования позволяет в 1,4...2,0 раза повысить стойкость окончательных ручьев штампов [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Осадка выпуклыми продолговатыми бойками достаточно изучена как с точки зрения формоизменения [3], так и с точки зрения изменений напряженно-деформированного состояния [4]. Технологии, включающие осадку выпуклыми плитами, успешно использованы в промышленности [5], однако номенклатура изделий, на которые данный способ может быть ориентирован, не является распространенной. Для расширения технологических возможностей заготовительных операций, выполняемых на кривошипно-горячештамповочных прессах (КГШП), предложено рассмотреть процесс осадки выпуклыми продолговатыми бойками с эксцентриситетом их внедрения в торец цилиндрической заготовки и без него. В работах [6-8] начато исследование процесса осадки заготовок выпуклыми бойками с эксцентриситетом нагрузки. В частности, изучено развитие напряженно-деформированного состояния [7] и формоизменения [7, 8] при осадке заготовок с отношением высоты (H_0) к диаметру (D_0) $H_0 / D_0 = 1,0$ и 2,0 плитами с радиусом выпуклости бойка = 30; 50; 75; 112,5 мм, т.е. с отношением 0,6; 1,0; 1,5 и 2,25.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Процесс осадки относительно высоких цилиндрических заготовок с эксцентриситетом нагрузки, при высоком профиле вставок и больших степенях деформации сопровождается проскальзыванием заготовки по поверхности деформирующего инструмента, что вызвано смещением центра приложения силы и, в ряде случаев. Для решения данной проблемы предложена методика осадки с переменной высотой профиля выпуклых вставок.

Постановка цели и задач исследования. Целью настоящей работы является теоретическое исследование формоизменения цилиндрических заготовок при осадке выпуклы-

ми радиусными вставками с различной высотой профиля и различной величиной эксцентриситета нагрузки и применением пакета конечно-элементного моделирования и получением регрессионных зависимостей по методике планирования эксперимента.

Для достижения указанной цели исследований выполняли моделирование процесса осадки заготовок в пакете конечно-элементного анализа Deform 3D (лицензия №8145). Материал заготовки – сталь 38ХС, при этом модель упрочнения, также как и граничные условия, взяты в соответствии с условиями, предложенными пакетом. Температурные условия принимали изотермическими, температура деформации 1100 °С. Заданное количество конечных элементов составляло 10000 шт., однако, после генерации сетки, количество элементов было принято 7847 шт. Коэффициент контактного трения при деформации принимали $f = 0,3$.

Основной материал и результаты. Для обеспечения стабильности формоизменения было предложено ограничивать высоту выпуклости профиля плиты от максимального $h_{p,max} = R$ до минимального значения $h_{p,min} = R/4$ (рис. 1). При такой конструкции инструмента продольно изогнутая заготовка со стороны максимальной высоты упирается в плоскость осадочной плиты, на которой крепится профиль выпуклой вставки, что исключает выскальзывание заготовки из зоны деформации и позволяет приблизить полуфабрикат к необходимой форме (см. рис. 1).

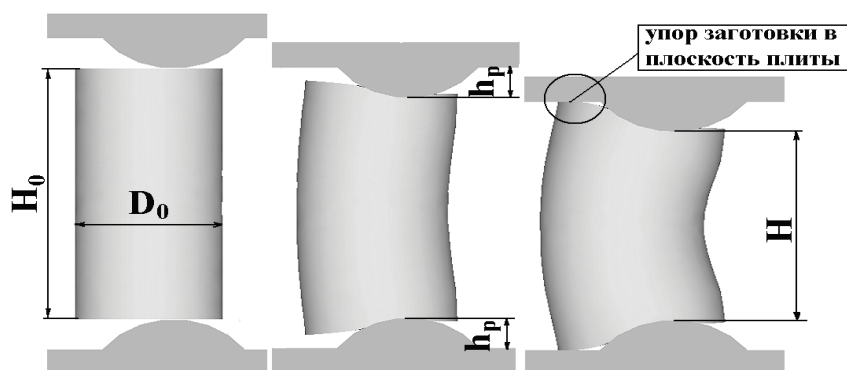


Рис. 1. Процесс осадки с искусственным упором

В связи с тем, что результаты моделирования в широком диапазоне отношений радиуса осадочных плит R к диаметру заготовки D_0 предполагается проверить экспериментально путём осадки на испытательной машине, скорость деформирования принята $v = 1$ мм/с. Моделировали процесс осадки до относительных степеней обжатия $\varepsilon_h = (H_0 - H) / H_0 = 0,5$, где $\Delta h = (H_0 - H)$ – величина хода инструмента (абсолютное обжатие), мм. Твердотельные модели осажённых заготовок представлены на рис. 2.

Выделяли основные показатели формоизменения и устанавливали их зависимость от степени осадки (ε_h), отношения радиуса выпуклых плит к диаметру заготовки (R/D_0), отношения исходных размеров заготовки (\varnothing) и величины эксцентриситета нагрузки (e). Изучение формоизменения целесообразно провести при максимальной величине эксцентриситета $e = 0,25 \cdot D_0$ и $e = 0$. Отношения конечных геометрических размеров заготовки являются безразмерными макропоказателями (рис. 3, а и б), характеризующими развитие неравномерности деформации в продольном, поперечном и высотном направлениях. За основные макропоказатели приняты: $Y_1 = H_1 / H_0$, $Y_2 = H / H_0$, $Y_3 = H_1 / H$, $Y_4 = D_3 / D_0$, $Y_5 = D'_3 / D_0$, где H_1 – высота краевого участка полуфабриката после осадки, H – наименьшая высота профилированного полуфабриката после осадки, H_1 и H – продольный и поперечный размеры полуфабриката по середине его высоты, D_3 и D'_3 – продольный и

поперечный размеры полуфабриката в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой после осадки (см. рис. 3).

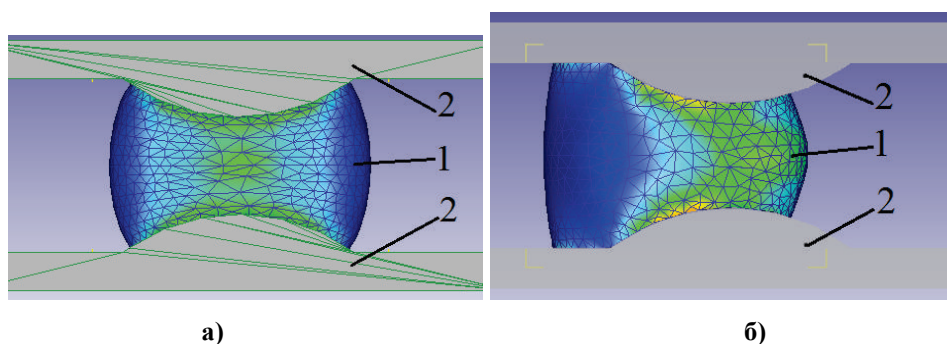


Рис. 2. Твердотельная модель заготовки (1) после осадки выпуклыми бойками (2): а – без эксцентриситета $e = 0$; б – с эксцентриситетом $e = 0,25$

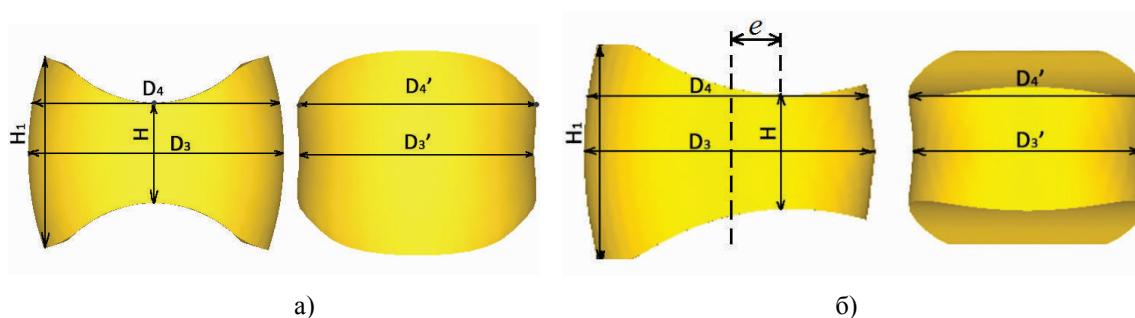


Рис. 3. Схема обмера заготовки после осадки выпуклыми бойками: а – без эксцентриситета $e = 0$; б – с эксцентриситетом $e = 0,25$

Таблица 1. План полнофакторного эксперимента

Факторы	ε_h	R / D_0	H_0 / D_0	e / D_0	h_p / D_0
Обозначение фактора,	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Нижний уровень,	0,2	0,6	1	0	7.5
Верхний уровень,	0,5	2,25	2	0,25	112.5
Нулевой уровень,	0,35	1,425	1,5	0,125	52.5
Интервал варьирования,	0,15	0,825	0,5	0,125	60

Исследование формоизменения проводили в диапазоне степеней обжатий от 0,2 до 0,5. По данным моделирования были рассчитаны макропоказатели формоизменения, для которых составляли уравнения регрессии. В качестве основных факторов, влияющих на формоизменение, были выделены: (фактор) – относительная степень деформации; (X_2) – отношение радиуса деформирующего инструмента к исходному диаметру заготовки; (X_3) – отношение исходных размеров заготовки; (X_4) – отношение величины эксцентриситета нагрузки к исходному диаметру заготовки; (X_5) – отношение высоты выпуклости профиля инструмента к исходному диаметру заготовки.

Значения факторов варьировали на двух уровнях. Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл. 1.

В работе рассматривали линейную регрессионную модель с учетом парных взаимодействий. В качестве плана вычислительного эксперимента использовали двухуровневый полнофакторный эксперимент (ПФЭ) 2^5 [9,10].

Зависимость показателей формоизменения от влияющих факторов

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (1)$$

представляли в виде линейного уравнения регрессии с учетом всех взаимодействий:

$$\begin{aligned} Y = & b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_1 \cdot X_2 + b_7 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ & + b_8 \cdot X_1 \cdot X_4 + b_9 \cdot X_1 \cdot X_5 + b_{10} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{12} \cdot X_2 \cdot X_5 + \\ & + b_{13} \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{14} \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{15} \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{16} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{17} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ & + b_{18} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 + b_{19} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{20} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{21} \cdot X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ & + b_{22} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{25} \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ & + b_{26} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{27} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{28} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ & + b_{29} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{30} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{31} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5, \end{aligned} \quad (2)$$

где b_i – коэффициенты уравнения в кодированном масштабе, определяемые как:

$$b_j = \sum_i^N Y_i X_{ji} / N, j = 0, 1 \dots k, \quad (3)$$

где N – число опытов в эксперименте (здесь k – число факторов).

Кодированные значения факторов на верхнем и нижнем уровнях:

$$Z_{ie} = (X_{ie} - X_{i0}) / \Delta X_i; Z_{in} = (X_{in} - X_{i0}) / \Delta X_i \quad (4)$$

Выполняли реализацию моделирования согласно плану полного факторного эксперимента по методике планирования 2^5 с полным взаимодействием факторов. Методика планирования эксперимента предполагает наличие параллельных опытов с проверкой гипотезы однородности дисперсий S^2 [9, 10]. Однако, проведение вычислений в процессе математического моделирования обуславливает отсутствие вероятностного разброса результатов. Для обеспечения возможности обработки результатов вычислений по известным методикам [9, 10] вводили малую дисперсию, исходя из гипотетического предположения проведения двух параллельных опытов. Задавались уровнем надежности α . Тогда табличное значение критерия Кохрена для моделирования формоизменения стальных заготовок $G_{табл} = 0,2817$ [9, 10]. Дисперсии считают однородными, когда расчетное значение G_p , что требует проверки. При постоянном значении внесенной дисперсии $S^2 = S_{max}^2 = 0,0001$ расчетные значения $G_p = 0,0312 < G_{табл} = 0,2817$. Следовательно, внесенные дисперсии однородны. Критические значения критериев Фишера для оценки адекватности регрессионной модели [9, 10]: $F_{кр} = 2,9$. В случае, когда расчетный критерий Фишера F меньше критического, т.е. $F < F_{кр}$, модель является адекватной. Оценку каждого коэффициента уравнений регрессии проводили по t – критерию Стьюдента, которые определены как [9, 10]: $t_{\alpha, f} = 2,036$. Проводили моделирование изменения макропоказателей: $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7$.

Переход от кодированных значений к натуральным выполняли как

$$\begin{aligned} X_1 = & (\varepsilon_h - 0,35) / 0,15; X_2 = (R/D_0 - 1,425) / 0,825; X_3 = (H_0 / D_0 - 1,5) / 0,5; \\ X_4 = & (e / D_0 - 0,125) / 0,125; X_5 = (h_p - 1,2) / 1,05. \end{aligned} \quad (5)$$

В табл. 2 и табл. 3 приведены примеры расчётов коэффициентов уравнений регрессии для описания изменения макропоказателей Y_3 и Y_4 . Аналогичные расчёты коэффициентов уравнений регрессии получены для макропоказателей $Y_1, Y_2, Y_5 - Y_7$ (в данной статье не приводятся).

Таблица 2. Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя

Макро-показатели	Коэффициенты уравнения регрессии						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	1,34087	0,15863	-0,08034	-0,07593	0,07562	-0,05999	-0,05157
$Y_3 = H_1/H$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	-0,04525	0,04445	-0,05423	-0,00172	0,01437	0,05977	0,00457
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	0,00399	-0,02213	0,00296	0,00264	0,05478	-0,00202	0,00621
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	-0,01794	-0,01508	0,00824	0,02783	-0,01048	-0,01020	-0,00190
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	0,02079	-0,01176	0,01230	0,01138	-	-	-
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена		
	$F = 2,27549 < F_{кр} = 2,9$				$G_p = 0,0312 < G_{табл} = 0,2817$		

Таблица 3. Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя

Макро-показатели	Коэффициенты уравнения регрессии						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	1,22501	0,14129	0,03290	0,00723	-0,01161	-0,00181	0,01778
$Y_4 = D_3/D_0$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	0,00826	-0,00605	0,00515	0,00820	0,00978	-0,00657	-0,00242
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	0,01249	0,00142	0,00447	0,00300	-0,00310	-0,00159	0,00649
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	0,00451	-0,00117	-0,00502	-0,00716	0,00772	0,00035	-0,00493
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	-0,00698	0,00496	-0,00133	-0,00242	-	-	-
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена		
	$F = 1,82273 < F_{кр} = 2,25$				$G_p = 0,0312 < G_{табл} = 0,2817$		

Результаты позволяют прогнозировать формоизменение цилиндрических заготовок в процессах профилирования осадкой выпуклыми продолговатыми вставками с различной высотой профиля. Оценка значимости факторов показывает существенное влияние на формоизменение относительной степени деформации ε_h , отношения радиуса деформирующего инструмента к исходному диаметру заготовки, отношения исходных размеров заготовки, отношения величины эксцентриситета нагрузки к исходному диаметру заготовки, отношения высоты выпуклости профиля инструмента к исходному диаметру заготовки h_p / D_0 в исследуемых пределах. При этом на характеристику высотной деформации значимо влияет только факторы и, а на характеристику продольной деформации степень деформации осадки существенного влияния не оказывает.

В перспективе, полученные результаты целесообразно положить в основу разработки методики расчёта переходов штамповки поковок различной конфигурации на основе профилирующей осадки с эксцентриситетом нагрузки.

Выводы. Проведено моделирование формоизменения заготовок из стали 38ХС в программном комплексе для конечно-элементного моделирования Defo₃m при осадке выпуклыми продолговатыми вставками с наличием эксцентриситета их внедрения в торцы заготовок при различной высоте профиля. Установлены зависимости изменения основных показателей неравномерности деформации по высоте, а также в продольном и поперечном направлении от технологических факторов и геометрических характеристик заготовок и рабочего инструмента. Адекватность полученных регрессионных моделей подтверждается значениями критерия Фишера (максимальное значение $F = 2,27549 < F_{кр} = 2,9$), а воспроизводимость – величинами критерия Кохрена .

Литература

Технологія кування / Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є. Марков, Л. І. Алієва. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 268 с.

2. Довнар С. А. Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объёмной штамповки / С. А. Довнар. – М.: Машиностроение, 1975. – 254 с.

3. Кухарь В. В. Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитами / В. В. Кухарь, С. А. Короткий, В. А. Бурко // Вісник Хмельницького національного університету / ХНУ. – Хмельницький, 2008. – № 5. – С. 204–208.

4. Кухарь В. В. Влияние радиусности выпуклых продолговатых осадочных плит на деформированное состояние и степень использования запаса пластичности при кузнечной осадке / В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск, 2012. – № 1 (30). – С. 105–111.

5. Совершенствование технологии штамповки на КГШП поковок для деталей поглощающих аппаратов / В. В. Кухарь, В. А. Бурко, С. А. Короткий, Е. Ю. Балалаева // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2010 – № 3 (24). – С. 69–75.

6. Кухарь В. В. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2012. – № 3. – С. 132–136.

7. Кухарь В. В. Исследование формоизменения заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Б. С. Каргин, Р. С. Николенко // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 46 (952). – С. 71–76.

8. Кухарь В. В. Моделирование формоизменения относительно высоких заготовок при осадке выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 2 (37). – С. 57–61.

9. Омельченко П. П. Планирование и обработка результатов экспериментов / П. П. Омельченко. – К.: УМК ВО, 1991. – 84 с.

10. Лунев В. А. Математическое моделирование и планирование эксперимента: учеб. пособие / В. А. Лунев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 164 с.

© В. В. Кухарь, Р. С. Ніколенко

В.В. Кухар, д. т. н., професор

Р.С. Ніколенко, аспірант

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

ФОРМОЗМІНА ЗАГОТОВОК ПРИ ЕКСЦЕНТРИЧНОМУ ОСАДЖУВАННІ ОПУКЛИМИ ВСТАВКАМИ З РІЗНОЮ ВИСОТОЮ ПРОФІЛЮ

Розроблено методику дослідження формозміни циліндричних заготовок при ексцентричному осаджуванні опуклими вставками з різною висотою профілю в пакеті комп'ютерного кінцево-елементного моделювання з застосуванням методики планування експерименту. В результаті досліджень отримані закономірності, які дозволяють прогнозувати макропоказники формозміни циліндричної заготовки при ексцентричному осаджуванні опуклими вставками, що враховують вихідні розміри заготовки, конструкцію інструменту і величину ексцентриситету.

Ключові слова: *циліндрична заготовка, ексцентричне осаджування, опуклі бойки, формозміна, планування експерименту.*

V.V. Kukhar, D Sc., Professor

R.S. Nikolenko, Post Graduate

SHEI "Priazovskyi State Technical University"

THE FORMING OF THE BILLETS AT THE ECCENTRIC UPSETTING BY CONVEX DIE-INSERTS WITH DIFFERENT HEIGHT OF PROFILE

The technique of study of the forming of cylindrical workpieces at eccentric upsetting by convex die-inserts with varying of height of the profile in a package of computer finite element modelling with using of the method of experiment planning is developed. The patterns for allow to predict the change of macro-indexes of forming of cylindrical workpieces during upsetting by convex die-inserts that taking into account the original dimensions of the workpiece, the tool design and the eccentricity value was provided as result of studies.

Keywords: *cylindrical billet, eccentric upsetting, convex die-insert, forming, planning of the experiment.*

КРИТЕРІЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ НАПЛАВОЧНИХ СТАЛЕЙ

Розглянуті питання застосування розрахункових критеріїв інтенсивності зношування для прогнозування зносостійкості наплавочних сталей для відновлення інструменту гарячої обробки металів і сплавів. Показана їх придатність для оцінки зносостійкості в умовах високих температур і циклічних напружень.

Ключові слова: сталь, зносостійкість, наплавлення, критерії зносостійкості.

Вступ

Дослідження, спрямовані на зниження енерго - і ресурсозатрат при відновленні наплавленням обробного інструменту і одночасне підвищення його надійності та довговічності, останнім часом стали особливо актуальними. Практичне рішення задачі здійснюється шляхом розробки нових і вдосконалення наявних наплавочних матеріалів з економічними покриттями і шихтою, застосуванням оптимального способу їх наплавлення з урахуванням особливостей поведінки матеріалів в реальних умовах. Особливу увагу при вдосконаленні наплавочних матеріалів приділяється матеріалознавчим розробкам економічних зносостійких сплавів.

Останнім часом значно просунулися рішення контактних задач термопружності при одночасному зношуванні тіл і дії джерел тепла. Нагрівання робить істотний вплив на локальну зміну форми дотичних поверхонь тіл та структурні перетворення. При цьому істотно перерозподіляються напруження, деформації, температури, розміри вихідної області контакту, інтенсивність зношування.

Для розробки прискорених методів дослідження проведено аналіз критеріальних співвідношень (комплексів), які є основними структурними складовими в рівняннях для розрахунку інтенсивності зношування.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.

Останнім часом значно просунулися рішення контактних задач термопружності при одночасному зношуванні тіл і дії джерел тепла [1-5]. Нагрівання робить істотний вплив на локальну зміну форми дотичних поверхонь тіл та структурні перетворення. При цьому істотно перерозподіляються напруження, деформації, температури, розміри вихідної області контакту, інтенсивність зношування за період тертя. Механізм і кінетика зношування тертьових пар суттєво залежить від характеристик дискретності контактування хвилястих і шорстких поверхонь твердих тел. При цьому геометрична форма поверхонь, механічні властивості матеріалів (пружність, твердість, схильність матеріалів до зміцнення) визначають ступінь впливу навантаження на фактичну площу дотику, в якій можуть виникнути пружні, пружно-пластичні або пластичні деформації.

При пластичній деформації виступів фактична площа контактів майже не залежить від мікрогеометрії поверхні і визначається пластичними властивостями матеріалів і величиною навантаження. Зміцнення матеріалу впливає на формування фактичної площі контакту. У разі пружної деформації шорсткостей фактична площа контакту істотно залежить від її геометричних характеристик та властивостей матеріалу.

В залежності від виду контактування змінюються фактична площа дотику, нормальне навантаження, контурне тиск і зближення [6]. Використовуючи положення про втомну природу руйнування поверхневих шарів, розрахунок зносостійкості поверхонь тертя проводиться в залежності від параметрів, що характеризують його роботу, використовуючи інтегральні інтенсивності зношування.

Наплавлення зносостійкими матеріалами, основними з яких є сплави на основі заліза, розвивається найбільш інтенсивно як при виготовленні, так і при ремонті [7]. Перетворення наплавлення в самостійну галузь техніки, що забезпечує виготовлення і багаторазове відновлення відповідальних деталей і вузлів для умов не тільки дрібносерійного, але і масового виробництва, обумовлює необхідність більшої уваги до вибору зносостійких сплавів.

Склад і властивості застосовуваних наплавлювальних сплавів багато в чому визначають не тільки підвищення довговічності деталей, вузлів, машин, ліній агрегатів, але і технологічність процесів їх нанесення, а також економію дефіцитних стратегічних матеріалів (вольфрам, нікель, молібден, ванадій, кобальт і інш.). З урахуванням матеріалознавчих особливостей зносостійких сплавів розширюються можливості дугового наплавлення, технологічна різноманітність якого дозволяє інтенсивно розвиватися, залишаючись провідним процесом. Наплавлені зносостійкими леггованими сталями і чавунами деталі здебільше експлуатуються в умовах тертя при пластичному контакті, якому відповідає втомний знос, мікроізнання (абразивний, газоабразивний знос), вплив корозії і інш.

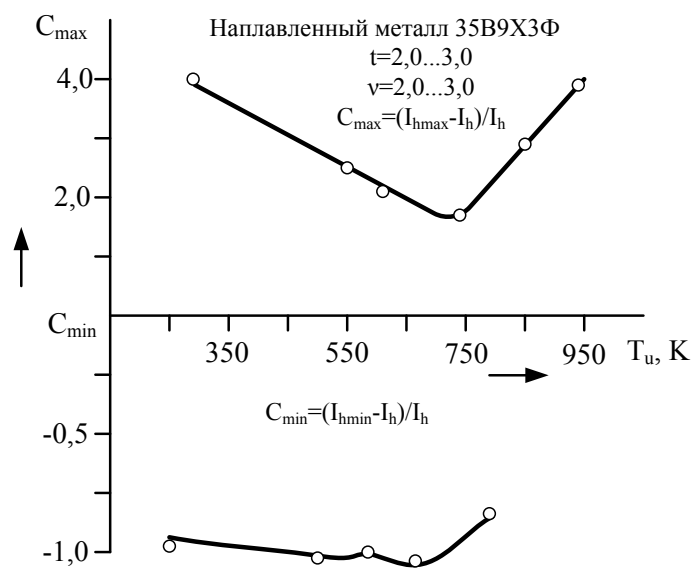


Рис. 1. Залежність відносного відхилення розрахункової інтенсивності зношування від температури (розрахунок зроблений по рівнянню І.В. Крагельського (8) для втомного зносу в умовах пластичного контакту): I_{hmax} - максимальне розрахункове значення інтенсивності зношування; I_{hmin} - мінімальне розрахункове значення інтенсивності зношування; I_h - середнє розрахункове значення інтенсивності зношування.

Ряд формул, які дозволяють розраховувати знос і його інтенсивність, базується на виходах молекулярно-втомної (адгезійно-деформаційна) теорії [8-10]. Запропоновано критерії оцінки стійкості матеріалів зносу, що ґрунтуються на комплексній оцінці фізико-механічних властивостей і хімічного складу сталей [11], або теплофізичних характеристик у поєднанні з температурно-часовими умовами контакту між металами (сплавами) пари тертя [12].

Як і інші вирази, використовувані при оцінці величини зносу, формули мають ряд недоліків:

- необхідність використання значної кількості досвідчених даних, трудомісткість підготовки і проведення механічних випробувань, особливо значну для твердих зносостійких матеріалів,
- зв'язок величини зносу лише з вихідними механічними властивостями еталонного і досліджуваного металів,
- відносно великий розкид значень коефіцієнтів і показників ступеня, що обумовлює порівняно широкий діапазон величин зносу (рис. 1).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Оскільки в розглянуті формули входять початкові значення механічних властивостей, важко врахувати вплив змін структури наплавленого металу або термічно обробленої сталі на зносостійкість, тоді, як лабораторні [13] та виробничі випробування [14, 15] показали істотний вплив кількості залишкового аустеніту на зносостійкість і стабільність величин зносу.

Збільшення коефіцієнта варіації кожного з параметрів істотно впливає на інтенсивність зношування [8], що додатково ускладнює використання розглянутих виразів при розробці наплавлювальних сплавів і технології наплавлення.

У широкому діапазоні зміни температури, швидкості, навантаження, інтенсивність зносу в критичних точках різко змінюється [16], що обумовлює необхідність експериментальних досліджень фрикційної теплостійкості.

Незважаючи на зазначені труднощі, цінність розрахункових виразів безсумнівна, тому що їх аналіз дозволяє знаходити бажаний напрямок зміни вихідних фізико-механічних властивостей.

Постановка завдання.

Провести аналіз розрахункових критеріїв інтенсивності зношування для прогнозування зносостійкості наплавочних сталей та показати їх придатність для оцінки зносостійкості в умовах високих температур і циклічних напружень для робочих ділянок штампового інструменту і прокатних валків, використовуваних при обробці гарячого металу

Основний матеріал і результати.

На основі досліджень фізики твердого тіла до матеріалів, що працюють в умовах тертя, пред'являються наступні вимоги: висока міцність, тобто матеріал повинен володіти великим запасом мікропластичності і мати високу твердість; при трибонавантаженні матеріал повинен бути схильний до подрібнення мікроструктури. Найбільший вплив на ці властивості оказує склад і структура матеріалу. Взаємозв'язок розрахункової інтенсивності зношування і відносної зносостійкості мартенситноаустенітних і інструментальних сталей (50ХНМ, 08Х6Н8М7С, 40Х4Г8Т2С, 20Х3Г9М5Т2С та інш.) встановлювалася при тисках, близьких до середніх тисків на контактній поверхні при гарячій обробці сталей.

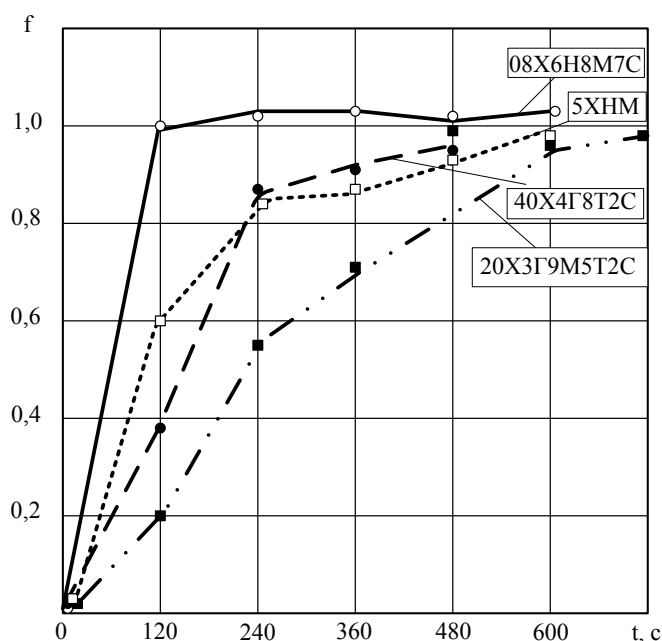


Рис. 2. Характер зміни коефіцієнта тертя для сталей різних структурних класів

Дослідження проводилися у відповідності з ГОСТ 3480-97 на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою «диск-колодка». Режимми тертя: швидкість обертання диска $V=0,25, 0,5$

м/с, навантаження $N=25, 50, 75$ Н. Матеріал контртіла сталь 40Х термооброблена, НРС 47-49. При приробці і сталому зносі досліджуваних сталей спостерігається окислювальний знос. При збільшенні часу тертя окислювальний знос переходить в тепловий, що супроводжується контактним схоплюванням і оплавленням поверхонь тертя. Найбільшу зносостійкість показала сталь 20ХЗГ9М5Т2С. Зміна дислокаційної структури прикордонних областей зони тертя і старіння, що відбуваються в результаті дії підвищених температур і деформацій, є одним з основних факторів підвищення контактної міцності і мікропластичності поверхневих шарів. Крім вище перерахованих факторів, зменшення зносу можна пов'язати зі зміною адгезійної складової сили тертя, зони пластичних деформацій, впливом значної кількості і рівномірним розподілом за обсягом карбідів титану. Характер зміни коефіцієнта тертя показаний на рис. 2.

Використання критеріїв стійкості до крихкого руйнування матеріалу штампів і зносостійкості [12], отриманих на основі механіки руйнування, дає певні рекомендації. Так, наприклад, оцінюється вплив кількості та розміру включень, несплошностей на зносостійкість, межі текучості на стійкість до розвитку тріщин і зносостійкість, контактного тиску на зносостійкість.

Оцінка розрахункових значень впливу температури на в'язкість руйнування за критеріями Дж. Малкіна і А.С. Тетельмана [17] для наплавочних сталей з метастабільним аустенітом показала наступне. Оскільки для умов молекулярно-механічного зношування робочих ділянок штампів коефіцієнт зносостійкості $K_u \approx K_C^2$ [18], то збільшення K_C при використанні сталей з метастабільним аустенітом змінить співвідношення $K_u \approx J \cdot (1 - \sigma_1 \cdot \sigma_2)^{-2}$, де J - межа тріщиностійкості, σ_1 - максимальне головне напруження в небезпечній зоні деталі; σ_2 - межа міцності. При близьких значеннях контактного тиску в парі тертя утворення тріщини критичної довжини зростає із збільшенням ефективною поверхневою енергією.

Таким чином, показники тріщиностійкості (K_C, J, δ_C), а отже, і опір зношування, вториннотвердіючих сталей і сталей з метастабільним аустенітом вище, ніж мартенситних наплавочних сталей і інструментальних.

Співвідношення розмірів зони пластичної деформації в околі вершини тріщини [20, 21] відповідно для умов плоскої деформації та плосконапруженого стану

$$\frac{r_y}{r_x} = \frac{K_{1C} (1 - \mu^2)}{2\pi\sigma_{0,2}^2} \div \frac{K_C^2}{2\pi\sigma_{0,2}^2} = \frac{K_{1C}^2}{K_C^2} \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{\alpha}$$

де μ - коефіцієнт Пауссона; α - коефіцієнт, що залежить від форми тіла і геометрії тріщини [20], тому $\alpha \rightarrow 1$.

Цінність розробки та вдосконалення критеріїв зносостійкості, подібних [20], беззаперечна. Однак необхідно відзначити, лише непряму зв'язок K_i з хімічним складом, структурою, властивостями наплавленого металу, значну трудомісткість експериментального визначення вхідних у критерій зносостійкості параметрів.

Навіть при стаціонарному тепловому режимі помітні коливання температури в шарі

товщиною $Y_B = 2,6 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot \lambda_a}{V}}$ [22], (a - коефіцієнт температуропровідності; λ_a - довжина

хвилі нерівностей поверхні тертя і швидкості відносного переміщення металу в третьовій парі). Інтенсивність тепловиділення на одиницю номінальної площі контакту $q = I \cdot f \cdot p_a \cdot V + \Delta q_T$ (де f - коефіцієнт тертя, P_a - номінальний тиск, V - швидкість ковзання, Δq_T - тепловий вклад в поверхневий шар деталі теплопередачею, наприклад від нагрітої оброблюваної деталі, I - механічний еквівалент одиниці тепла) буває настільки велика, що швидкості нагріву досягають $104...4 \cdot 10^5$ К/с. Швидкості охолодження металу шару

товщиною 100 мм (Б.Д. Грозину) - близько $10^3 \dots 10^4$, температурні градієнти від декількох сотень до декількох тисяч К/мм.

Циклічні зміни температури металу поверхневого шару приводять до термовтомлюваному руйнуванню, можливо також помітна зміна структури і властивостей наплавленого шару на глибині, що перевищує товщину безпосередньо контактної зони, що зношується.

Стійкість до термовтомлюваного руйнування залежить від розмаху повної деформації в циклі, запасу пластичності металу, значень циклічних напружень, теплофізичних властивостей матеріалу, агресивності навколишнього середовища [9, 22, 23-25].

Оцінка стійкості деталей, що зношуються в умовах термовтомлюваного руйнування істотно ускладнюється через відмінності натурних деталей (вузлів) від зразків з того ж матеріалу за структурою, механічними властивостями, градієнту їх зміни.

Інтенсивність зносу наплавленого металу з бейнітно-мартенситної і мартенситної основою (60X5M1ФС, 30X4Ф1СТР, 30X2B4ГС та ін) при $T_{cm} = 773 \dots 1100$ К пов'язана з номінальному тиском залежністю $I_h \approx P_a^{1 \dots 2}$ ($1,0 \dots 1,5$ МПа $\leq P_a \leq 20$ МПа).

Якісні змін металу контактних обсягів внаслідок термодформаційного впливу й активності навколишнього середовища суттєво впливають на значення зазначених вище характеристик тертя, фізико-механічні властивості матеріалу, співвідношення між інтенсивністю зношування та роботою тертя. Висока інтенсивність зносу наплавленого металу 35B9X3Ф при формуванні структури типу "білої зони" $H_\mu = 11700 \dots 14600$ МПа відзначається як для зразків з гладкою ($R_{max} \leq 4,7$ мкм, $\Delta \leq 1,3 \dots 1,6 \cdot 10^{-2}$), так і шорсткою ($R_{max} \geq 37$ мкм, $\Delta \leq 1,24 \cdot 10$) поверхнею тертя. Превалююча роль формується в поверхневих шарах сплавів з різним початковим хімічним і фазовим складом структури мабуть позначається на оцінці співвідношення роботи тертя і енергії, затрачуваної на знос [1, 9 та ін.].

По зносостійкості наплавлений метал різних систем легування (С - Сг - Мп - Si-Ti, С - Сг - Мо - W - V, С - Ti - Ni) не поступається сплаву 35B9X3Ф. Як і для малих значень p_a підвищення зносостійкості сприяє легування титаном при збереженні в хромистому наплавленні вуглецю 0,35...0,40 %. Більш високу в порівнянні з матеріалом - еталоном 35B9X3Ф фрикційну теплостійкість мають економнолеговані наплавочні сталі: 50X5M2BH2Ф, 08X6H8M7С, 40X4Г8Т2С, 20X3Г9М5Т2С. Мінімальний розкид значень інтенсивності зношування характерний в діапазоні середніх і підвищених температур. Зменшення зносу при підвищенні температури 400...500 К обумовлено як зміною фізико-механічних характеристик металу контактних обсягів, так і зниженням P_r .

Вплив зазначеного зростання $p_r = C\sigma_{TC}$ (σ_{TC} - межа плинності матеріалу заготовки) на знос підтверджується зіставленням значення $G_0 = \frac{G}{F\tau_0}$ та $G_n = \frac{a\gamma}{\tau_n}$, де G_0 - маса зношеного за час τ_0 лабораторних випробувань зразків металу з площею поперечного перерізу F ;

a - середнє вироблення струмків прокатних валків, τ - час контакту металу з робочою поверхнею струмка в осередку деформації, γ - щільність наплавленого шару. Так як швидкість відносного переміщення прокату внаслідок випередження - відставання порівняння з величиною V лабораторних випробувань, результати виробничих і лабораторних досліджень могли рівнятися. При початковій температурі стрижня тертя сталі P18 $T_{Cr} \approx 773$ К для наплавлення 35B9X3Ф, в умовах прокатки .

Порівнянними виявилися значення G_0 і G_n сталі 55X, наплавленого металу марок 50X5Г2СТ, 50X5B2ФСТ.

Висновки.

- час перебування металу в зоні пластичної деформації приблизно на порядок менше загальної тривалості роботи контактуючих ділянок пари тертя;

- коефіцієнт варіації показників зносу зменшується зі збільшенням частки метастабільного аустеніту у вихідній структурі наплавленого металу;

- фрикційна теплостійкість економнолегованих наплавочних сталей системи С-Сг-W-Mo-V-Ti вище аналогічної характеристики наплавленого металу типу 35B9X3Ф.

Литература

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Довнар С.А. Термодинамика упрочнения и разрушения штампов объемной штамповки. – М.: Машиностроение, 1975. – 255 с.
3. Термопрочность деталей машин. /И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, И.В. Демьяненко и др./ Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. - М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
4. Филатов В.М., Шнейдерович Р.М. Сопротивление малоциклового разрушению при повышенных температурах //Проблемы прочности. – 1971. №2. – С. 74-78.
5. Тылкин М.А., Яловой Н.И., Полухин П.И. Температуры и напряжения в деталях металлургического оборудования – М.: Высшая школа, 1970. – 428 с.
6. Узлы и трения машин: Справочник. / Крагельский И.В., Михин Н.М. - М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
7. Патон Б.Е. Перспективы развития сварки // Современные проблемы сварки и специальной электрометаллургии. - Киев: Наукова думка. - IS80. - С. 23-25.
8. Проников А.С. Расчет износа сопряжений, трение, изнашивание и смазка. - М.: Машиностроение, 1978.-Т.1. - С 98-126.
9. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
10. Харач Г.М. Элементы расчета деталей машин на изнашивание: - М.: Наука, 1975. – 84 с.
11. Явление износа и восстановления изношенных поверхностей сваркой с одновременной закалкой // Ёсэцукэй - Weld World. - 1967. - 19, № 8. - С. 519-526.
12. Любарский И.М. Повышение износоустойчивости тяжело нагруженных шестерен. - М.: Машиностроение, 1965. - 132 с.
13. Богачев И.Н. и др. Влияние количества остаточного аустенита на износостойкость стали 9ХЕ8 при трении // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1976. - В I. - С. 34-39.
14. Кальянов В.Н. Стойкость прокатных валков, наплавленных сталями с различным количеством структурно-нестабильного аустенита // Автоматическая сварка. - 1977. - № 9. - С. 65-67.
15. Багрянский К. В., Кальянов В.Н. Исследование фазового состава некоторых многослойных наплавов // Сварочное производство. - 1962. - № 10. - С. 9-12.
16. Крагельский К.В. Расчет интенсивности изнашивания материалов. Трение, изнашивание и смазка. - М.: Машиностроение, 1978. - Т.1. – С. 96.
17. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. /Под общей редакцией Панасюка В.В. – К.: Наук. думка, 1988. Т. 1: Основы механики разрушения. – 488 с.
18. Колотиенко С.Д., Колотиев А.П. Анализ процесса контактного разрушения наплавочных материалов при схватывании //3-я республиканская научно-техническая конференция «Современные методы наплавки и наплавочные материалы». – Харьков. – 1981. – С. 106-108.
19. Кальянов В.Н. Структура и характеристика износостойкого экономнолегированного металла //Сварочное производство. – 1997. - №4. – С. 13-17.
20. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахитадта.- К.: Металлургия, 1983.-Т. 1.-352 с.
21. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
22. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин. - К»: Кашиз, 1963. - 138 с.
23. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. - М.: Металлургия, 1975. - 584 с.
24. В.Н. Кальянов, В.А. Багров, А.Н. Петренко Прогнозирование и разработка ресурсосберегающих износостойких сталей. //8-й Международный Конгресс «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков. – 2007. – Т. 2. – С. 129-131.

25. Кальянов В.Н., Багров В.А. Влияние циклических термомодеформаций на фазовый состав и стойкость жаропрочных сталей //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. - № 2/4 (26). – С. 52-59.

©В.А Багров

УДК 621.791.01

В.А. Багров, к. т. н., доцент
Украинская инженерно-педагогическая академия

КРИТЕРИИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЛАВОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Рассмотрены вопросы применения расчетных критериев интенсивности изнашивания для прогнозирования износостойкости наплавочных сталей для восстановления инструмента горячей обработки металлов и сплавов. Показана их применимость для оценки износостойкости в условиях высоких температур и циклических напряжений.

Ключевые слова: сталь, износостойкость, наплавка, критерии износостойкости.

UDC 621.791.01

V.A. Bagrov, Ph.D.
Ukrainian engineering-pedagogical Academy

CRITERIA OF WEAR RESISTANCE OF THE SURFACING OF STEELS

In clause questions of application of settlement criteria of intensity of wear process for forecasting wear resistance surfacing steels for restoration of the tool of hot processing metals and alloys are considered. Their applicability for an estimation of wear resistance in conditions of heats and cyclic pressure is shown.

Keywords: steel, wear resistance, welding, criteria durability.

НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РЕМОНТУ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Викладено положення, які дозволять мінімізувати витрати енергії, при одночасному підвищенні якості, при розбиранні, ремонті і технічному обслуговуванні вузлів машин, які мають з'єднання з натягом. Визначено, що температуру в матеріалі деталі що нагрівається можна нормувати або безпосередньо по перепаду температур на товщині деталі, або нормуванням інтенсивності нагріву.

Ключові слова: розбирання, з'єднання, нагрів, натяг, точність, температура, енергія.

Вступ. В процесі експлуатації відбувається зміна працездатності механізмів яка викликана зносом робочих поверхонь і деформаціями деталей. Вузли можуть підлягати ремонту з причин аварій, відхилень в регулюванні, пошкоджень і зносу елементів, які викликають порушення нормального функціонування і втрату точності. Машини, що поступають на ремонт, внаслідок різних умов експлуатації, мають різної величини пошкодження або зноси одних і тих же елементів або вузлів. Часто вигляд і величина зносу або пошкодження визначають не тільки ступінь ефективності прийнятої тієї чи іншої ремонтної технології, але і її доцільність. У зв'язку з цим передбачається плановий ремонт обладнання та позаплановий, викликаний відмовами і аваріями.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Як правило, за ступенем відновлення ресурсу ремонту поділяються на поточний - виконується для забезпечення або відновлення працездатності виробу і полягає в заміні і (або) відновленні окремих частин і капітальний - виконується для відновлення справності та повного або близького до повного відновлення ресурсу виробу із заміною чи відновленням будь-яких його частин, включаючи базові [2]. Обов'язковим етапом, попереднім до різних видів ремонту і контролю виробів, є процес розбирання з'єднань. Найбільш складні для розбирання з'єднання з натягом. Їх підрозділяють на пресові (збираються з використанням осьової сили запресування) і ті що збираються з термовпливом (попереднім нагріванням або охолодженням деталей). Останні найбільш міцні і розібрати їх розпресуванням без ушкоджень часто неможливо.

На трудомісткість і якість розбирання з'єднань впливає технологічність конструкції виробу, основні вимоги якої наступні:

- мінімальне число місць з'єднання складових частин;
- доступність демонтажних баз деталей і складальних одиниць;

Так, складальні одиниці, агрегати і деталі, які не потребують частотої перевірки і заміни в процесі експлуатації виробу, можна розміщувати в будь-якому місці виробу, а ті що вимагають частого і систематичного контролю, регулювання, ремонту і заміни, слід розміщувати в доступних місцях; причому ці агрегати, складальні одиниці і деталі повинні бути повністю взаємозамінні і легко демонтуватися за допомогою стандартних інструментів.

- можливість знімання запресованих підшипників кочення без передачі зусилля через тіла кочення;
- мінімальне число з'єднань з натягом на одному валу;
- конічні з'єднання з натягом замість циліндричних;
- відсутність з'єднань, деталі яких в процесі зняття доводиться переводити через одне або декілька з'єднань з нерухомою посадкою;

- можливість використання при розбиранні виробу засобів механізації та автоматизації;
- відсутність потреби у складному, дорогому обладнанні і пристроях, а також додатковій обробці при розбиранні з'єднань складових частин;
- використання в системі електроустаткування пристроїв, що дозволяють знімати основні складальні одиниці та освітлювальні прилади без розгвинчування контактних з'єднань;
- логічна послідовність операції розбирання.

Технологічність конструкції виробу визначається так само умовами, що дозволяють скоротити терміни ремонту і створити зручності в експлуатації:

- швидкістю виявлення несправностей;
- доступністю найбільш ймовірних місць обслуговування і ремонту;
- ступенем взаємозамінності агрегатів складальних одиниць і окремих частин, що вимагають заміни.

Постановка завдання. Розбирання з'єднань з великими натягами або зміненими посадками, в результаті спільної дії вологи і ударних навантажень традиційним розпресуванням виконати надзвичайно важко, так як в їх контакті виникають великі сили тертя і для знімання деталі що охоплює потрібні великі зусилля. Ці зусилля не завжди можуть витримати диски деталей що охоплюють, які деформуються. Необхідні спеціальні прийоми і способи, щоб забезпечити збереження елементів що розбираються.

Основний матеріал і результати. Розбирання таких з'єднань найбільш ефективно з використанням індукційного нагріву. При нагріванні індукційним способом з'єднання, що розбирають, поміщають в магнітне поле, створюване змінним струмом, де воно нагрівається виникаючими в металі вихровими струмами. За рахунок прискореного нагріву деталі, що охоплює (що перевищує швидкість передачі тепла в деталь що охоплюють) отримують демонтажний зазор в з'єднанні, внаслідок чого розбирання може виконуватися без докладання зусиль, а тільки за рахунок ваги деталей [1].

Технологічними для розбирання з нагріванням є з'єднання з гладкими деталями, що охоплюються (валами) і деталями які охоплюють, що мають яскраво виражені маточини. Дотримання останньої вимоги дозволить здійснити локальний нагрів і, отже, економити енергію.

Тривалість нагріву деталі що охоплює з'єднання яке розбирається можна поділити на два періоди. Перший - температурна радіальна деформація деталі що охоплює компенсує натяг, і другий - радіальна деформація компенсує розширення вала від нагріву за рахунок теплопередачі від деталі що охоплює і забезпечує утворення демонтажного зазору. Тобто, із збільшенням натягу в даному типі з'єднання необхідно збільшувати температуру нагрівання деталі що охоплює і, значить, час нагрівання в індукторі постійної потужності. Якщо ж при цьому збільшувати інтенсивність нагріву, то градієнт температур в матеріалі деталі в радіальному і осьовому напрямку зростає, а час нагріву зменшиться.

Для здійснення процесу роз'єднання елементів виробу рівень і розподіл енергії в них повинен забезпечити між ними технологічний зазор. Рівняння балансу теплової енергії для розбирання наступне

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4,$$

де Q - теплова енергія, що витрачається на роз'єднання елементів виробу; Q_1 - тепла енергія, накопичена деталлю що охоплює до моменту початку утворення технологічного теплового зазору; Q_2 - теплова енергія, необхідна для утворення технологічного теплового зазору; Q_3 - енергія передана деталі що охоплюють і не використана на утворення технологічного теплового зазору; Q_4 - енергія, що витрачається деталлю що охоплює в навколишньому середовищі.

Для з'єднань з натягом Q_1 являє собою енергію, що витрачається на теплове розширення деталі що охоплює (втулки) для компенсації натягу і енергію Q_1' компенсації збіль-

шеного розміру посадкової поверхні деталі що охоплюють (вала) від передачі їй енергії Q_3 . $Q_1' < Q_3$, оскільки тепло в процесі нагрівання поширюється уздовж вала. Це означає, що вал розширюється менше, ніж, якби вся Q_3 залишилася під посадковою поверхнею деталі що охоплюють. Величина Q_2 залежить від точності виготовленого з'єднання та рівномірності розширення посадкової поверхні деталі, що охоплює. Чим менше шорсткість посадочних поверхонь і похибка їх форми, тим менше технологічний теплової зазор. Рівномірність розширення визначається температурним полем в деталі, що охоплює. Якщо деталь вісесиметрична, то і поле повинно бути вісесиметричним.

Гранична температура температурного поля визначає ступінь збереження фізико-механічних властивостей матеріалу деталі, отже, як і енерговитрати, вона є параметром ТП що лімітує.

Для мінімізації теплових втрат розподіл температур в стінці деталі що охоплює (корпусу, втулки) внаслідок передачі їй енергії повинен бути таким, щоб на поверхні контакту з охоплюваною (валом) і зовнішній поверхні була найменша за величиною температура (рис.1)

Реалізувати цю вимогу для деталей типу диск з товщиною стінки 20-40 мм неможливо, а для диска з великим зовнішнім діаметром дуже складно, через практичну нездійсненність підвода потужності в середину матеріалу стінки. Для гладких дисків (не ступінчастого профілю) можливе отримання температурного поля з максимальною температурою на зовнішній поверхні (рис. 1б).

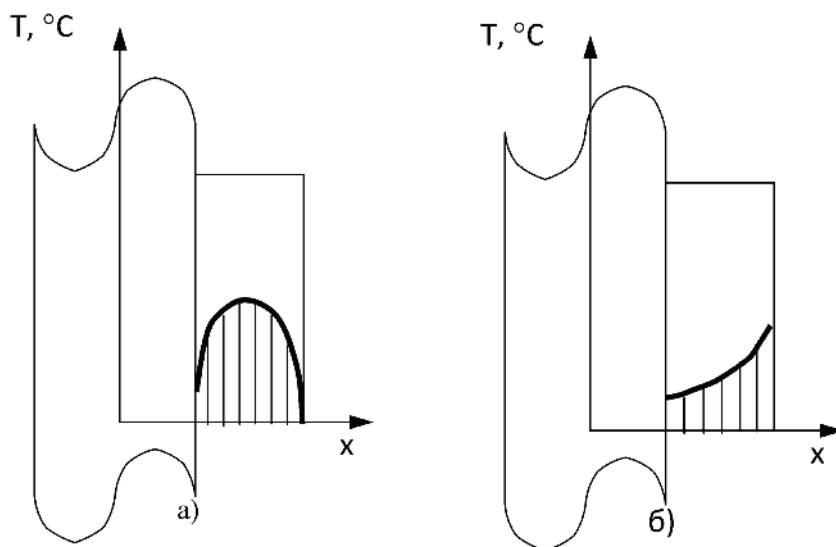


Рис. 1 Розподіл температур в стінці деталі що охоплює з'єднання з натягом:

а) необхідне; б) можливе.

Для проведення якісного розбирання необхідно нормувати граничні температури і градієнт температур в матеріалі деталі що нагрівається. Ці параметри регулюються інтенсивністю нагрівання і його часом. Інтенсивність нагрівання визначається потужністю індуктора.

Гранично можливу температуру нагрівання даного типу з'єднання необхідно нормувати виходячи з максимального натягу. Ця температура повинна бути нижче допустимої з умов збереження фізико-механічних властивостей металу деталі, що охоплює. Для зменшення нагрівання деталі що охоплюють, в результаті теплопередачі, необхідно прагнути до нерівномірного в радіальному напрямку розподілу температурного поля з тим, щоб у місцях контакту деталей був найменший температурний напір. Однак це має бути узгоджене з нормативом градієнта температур.

Швидкість нагріву виробів при індукційному нагріванні залежить від відношення поверхні що нагрівається до об'єму. Із збільшенням відносини поверхні тіла до його об'єму швидкість збільшується, а час нагріву зменшується. Час нагріву до розбирання з'єднань з середніми натягами до допустимої температури 280-320°C залежно від об'єму і поверхні коливається від декількох секунд до 1-2 хвилин.

Як відомо, точність відносного положення деталей у виробі визначає його чимало якісних показники. Тому точність складання з'єднань після ремонту - одна з умов відновлення ресурсу виробу. Досягнення заданої точності залежить від конструкції пристроїв що компенсують знос деталей - змінних (втулки, кільця) і рухливих (клини, конусні втулки і ін.) деталей-компенсаторів. Користуючись компенсаторами можна так само залишити в з'єднаннях частину зношених деталей, не порушуючи точності з'єднань. Тому слід нормувати точність складання з'єднань після ремонту. Точність відносного положення деталей безпосередньо пов'язана зі складально-розбиральними зусиллями, які можуть деформувати деталі, це означає, що слід нормувати також зусилля розбирання і подальшого складання розібраних вузлів.

Для проведення якісного та своєчасного ремонту необхідна Система технічного обслуговування і планового ремонту (Система ТО і ПР) і відповідне їй нормативне забезпечення включаючи запасні частини та інструмент (приспосовання) номенклатура яких повинна відображати характер ушкоджень, типових для виробів, а їх число відповідати термінам служби і методам ремонту [3]. При цьому конструктор повинен визначити необхідність створення комплектів ЗПП з обґрунтуванням їх номенклатури та кількості, а також сукупність виробів, для яких встановлюють номенклатуру і кількість запасних частин. Кількість запасних частин при експлуатації виробів можна оцінити двома способами:

- на підставі статистичних експлуатаційних даних;
- методом розрахунку в поєднанні зі статистичним моделюванням.

Істотним організаційним моментом системи ТО і ПР є виявлення, облік і аналіз всіх видів відмов механізмів і обладнання, виявлення та аналіз довговічності деталей. Середня довговічність приймається за основу визначення міжремонтних періодів, ремонтного циклу та його структури.

Висновки. Таким чином, в технологіях ремонту слід нормувати точність, зусилля розбирання, а при використанні нагріву нормувати температуру і градієнт температур в матеріалі деталі що нагрівається. Останнє можна зробити, нормуванням або безпосередньо перепаду температур на товщині деталі, або нормуванням інтенсивності нагріву та її часу. При організації ремонту нормуванню підлягає номенклатура і кількість запасних частин. При конструюванні нових і модернізації існуючих виробів, облік викладених положень дозволить мінімізувати витрати при розбиранні, ремонті і технічному обслуговуванні, при одночасному підвищенні якості.

Література

1. Андреев Г.Я., Арпентьев Б.М., Кокшенев Б.Г. *Тепловая разборка соединений с натягом // Технология и организация производства. - 1972. - № 1. - С. 96 –99.*
2. Воробьев Л.Н. *Технология машиностроения и ремонт машин. – М.: Высшая школа, 1981. – 344с.*
3. Тимофієв Ю.В., Захаров М.В., Мельніченко О.А., Хворост В.А. *Технологічність виробів у машинобудуванні та приладобудуванні: Навчальний посібник // Під ред. Тимофієва Ю.В.– К.: ІСВО. – 1995. – 212 с.*

© Коваленко І.В.

НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РЕМОНТА ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Изложены положения, которые позволят минимизировать затраты энергии, при одновременном повышении качества, при разборке, ремонте и техническом обслуживании узлов машин, которые имеют соединение с натягом. Определено, что температуру в материале нагреваемой детали можно нормировать или непосредственно по перепаду температур на толщине детали, или нормированием интенсивности нагрева.

Ключевые слова: разборка, соединения, нагрев, натяг, точность, температура, энергия.

REGULATORY SOFTWARE TECHNOLOGY REPAIR PRODUCTS USING INDUCTION HEATING

Expounded of provisions that will help to minimize energy costs, while improving quality, dismantling, repair and maintenance units of machines that have a connection with tension. It is determined that the temperature in the material of the detail is heated can be rationed or directly by temperature changes on the part thickness, or regulation of the intensity of the heat

Keywords: *disassembly, connection, heating, tension, precision, temperature, energy.*

ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕМОНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены проблемы создания нормативного обеспечения ремонтных технологий для эффективного функционирования ремонтного производства. Разработаны методические основы создания нормативно-технических документов для ремонтных технологий на основе структурно-параметрического принципа на примере разборки соединений с натягом.

Ключевые слова: типизация, унификация, классификация, ремонтные технологии, структурно-параметрические связи, технологические системы разборки изделий, параметры качества.

Введение. Общие тенденции развития машиностроения, связанные с повышением надежности машин, обеспечили соединениям с натягом широкое распространение в транспортном, тяжелом, энергетическом, химическом машиностроении, судостроении. Однако обеспечение неразрушаемости деталей при ремонте, хотя и было обусловлено практическими потребностями, свелось к разрозненным справочным данным. Задача обеспечения неразрушаемости деталей при разборке соединений возникла в последнее время в связи с необходимостью более дешевого ремонта изношенных узлов (по сравнению с заменой на новые), а также требованиями энергосбережения, экологической чистоты и возросшими требованиями к качеству.

Для эффективного функционирования ремонтного производства необходимо иметь нормативно-технические документы (НТД), которые отражают требования к технологии и оборудованию связанные с конструкцией изделия. Их можно создать на основе типизации изделий и процессов. Инструментами типизации в широком понимании являются классификация и унификация объектов или процессов по признакам, необходимым для решения поставленной задачи. Основным инструментарием в технологиях является классификация изделий, а унификация и типизация - ее следствием.

Постановка проблемы. Ремонтное производство в машиностроении характеризуется жесткой взаимосвязью конструкции, технологии и оборудования для реализации технологии. Так, например, одни и те же соединения с натягом можно разбирать как прессовым методом так и с использованием термовоздействия. Эти два метода кардинально меняют технологический процесс (ТП): разборка при первом методе - выполняется с помощью прессового усилия, а при втором – с усилием равном весу одной из деталей соединения или усилием преодолевающим трение, поскольку разъединение деталей происходит с образованием зазора. Соответственно, при первом методе используется прессовое оборудование, а при втором – нагревательное или охладительное (или и то и другое одновременно). Изменение, даже незначительное, габаритов соединения часто требует другого по размерам оборудования, а изменение конструкции – оборудования другого типа.

Эта взаимосвязь определяет эффективность ТП по производительности и экономичности, то есть по качественным показателям процесса. Степень соответствия операций, производимых над деталями при разборке, определяет качество получаемого соединения и (или) детали. Поэтому НТД на технологии разборки соединений, а так же на оборудование, используемое в этих процессах, должны быть тесно взаимосвязаны.

Анализ исследований и публикаций. Достоинства индукционного нагрева являются причиной достаточно широкого распространения в ремонтном производстве техноло-

гий разборки на основе термовоздействия. Общепринятые названия этого способа – индукционно-тепловой способ (метод) разборки [1]. Он применяется в судоремонте, ремонте локомотивов, подвижного состава рельсового транспорта, дорожных машин, обогатительного и прессового оборудования и других видов техники. Хорошо зарекомендовал себя этот способ при разборке распредвалов двигателей, элементов рулевого устройства и съеме облицовок с валов в судостроении; разборке элементов колесных пар тепловозов, электровозов и вагонов, в том числе съеме подшипников и др. [2].

Основные исследования в области НТД и технологической подготовки ремонта соединений с натягом велись в направлениях разработки инструкций по использованию технических средств ремонта и частных ТП [3]. При этом (за неимением) не использовалась классификация, и унификация конструктивных элементов, не учитывался такой важный фактор в ТП как схема базирования и т.д. [4]. ТП строились, в основном, на основе экспериментальных исследований и расчеты, с ними связанные, велись по различным методикам [5-8].

Формулировка целей статьи. Развитие техники нагрева и охлаждения способствует переводу все более сложных соединений с натягом с распрессовки на разборку с использованием термовоздействия. Разборка соединений ответственного назначения с натягом с использованием индукционного нагрева, как обладающая более широкими технологическими возможностями, в первую очередь требует исследований и нормативно - технического обеспечения.

Принципы создания НТД ремонтных технологий. Все выше сказанное позволяет предложить принцип построения НТД для ремонтных технологий, на основе анализа структурно-параметрических связей в технологических системах разборки изделий. Для краткости будем называть его структурно-параметрическим принципом.

Рассмотрим сущность структурно – параметрического принципа на примере технологий разборки соединений с натягом, использующей индукционный нагрев. Соединение с натягом – это соединение деталей с упругим контактом. Упругий контакт может осуществляться через промежуточный материал – гальваническое покрытие, полимерную пленку или иную прослойку. Соединения могут быть двух типов: вал с втулкой и втулка с корпусом. Натяг может быть конструкторским или образовываться в процессе эксплуатации изделия.

Разъединение деталей соединения при использовании термического воздействия происходит после образования технологического теплового зазора между поверхностями контакта деталей - их посадочным поверхностям. Тепловой зазор обеспечивается необходимым для данного соединения уровнем и распределением тепловой энергии по нагреваемой детали. Уровень определяет температура нагрева. Ее величина для данной детали должна быть не меньше некоторой минимальной - T_{min} и не превышать некоторого допустимого значения - $[T]$.

T_{min} – это температура, при которой происходит такое расширение посадочной поверхности охватываемой детали, что оно компенсирует натяг соединения и тепловое расширение охватываемой вследствие теплопередачи от охватываемой, а так же образует минимально необходимый монтажный зазор. Большая величина монтажного зазора увеличит расход тепловой энергии, которая будет идти на перегрев деталей а, значит и на потери в окружающую среду.

При разборке необходимо, чтобы произошло разъединение деталей в соединении, для этого целесообразно совмещать тепловое и механическое воздействие, чтобы сразу, при образовании минимального зазора между деталями, их разъединить. Однако усилием механического воздействия не должны повреждаться посадочные поверхности детали. Естественным образом это может выполняться, когда в качестве механического воздействия, используют силы гравитации. В этом случае сдвигаемая деталь практически с нулевым зазором будет извлечена из неподвижной.

Для минимизации теплопередачи между деталями температура на посадочной поверхности охватывающей детали (корпуса, втулки), то есть на поверхности ее контакта с охватываемой (осью, валом), должна быть незначительной. В идеальном случае оставаться начальной. Реализовать это требование для охватывающих деталей типа диск с отверстием при толщине стенки 20-40 мм практически невозможно из-за высокой теплопроводности металла.

Минимизация теплопередачи достигается высокой скоростью нагрева охватываемой детали. Быстрый нагрев уменьшает и тепловые потери нагреваемой детали в окружающую среду. Если нагрев охватывающей детали медленный, то есть с большими тепловыми потерями на теплоотвод в охватываемую деталь и среду, то разборка соединения или совсем не осуществится, или произойдет при температуре T охватывающей детали значительно выше T_{\min} . Таким образом, T_{\min} гарантирует осуществление разборки соединения при минимальных энергозатратах.

Величина $[T]$ является параметром, определяющим неразрушаемость качества нагреваемой детали по физико-механическим свойствам металла или, если это необходимо, прослойки. Температура нагрева детали под разборку соединения не должна ее превышать.

Неразрушаемость качества разъединяемых элементов изделия и энергоэкономичность, таким образом, обусловлены выполнением температурного условия $[T] \geq T_{\min}$.

Следует отметить, что физико-механические свойства конструкционных материалов необратимо начинают изменяться при нагреве до температур свыше $(360 - 400)^\circ\text{C}$.

Быстрый, даже импульсный нагрев легко создать с помощью индукционного способа, при котором происходит выделение тепловой энергии в соответствии с законом Джоуля - Ленца. Это значит, что распределение тепловой энергии будет неравномерно и, соответственно, у охватывающей детали температура по наружной поверхности всегда будет выше, чем в срединных слоях металла. Экономии энергии при нагреве деталей типа втулка эта неравномерность не даст. Для деталей ступенчатого профиля с помощью неравномерного нагрева можно существенно сэкономить энергию. Для этого следует нагревать часть детали, например, ступицу. Но здесь, кроме высокого значения температуры наружной нагреваемой поверхности части детали для неразрушения качества детали представляет опасность возникновение недопустимых по величине температурных напряжений. Поэтому следующим условием неразрушения получаемых деталей является условие сохранения прочности нагреваемой детали при неравномерном нагреве, создающем градиент температур и, следовательно, напряженность в материале.

Это условие представляет собой соотношения:

$$[\sigma_r] < \sigma_{r \max} ; [\sigma_\theta] < \sigma_{\theta \max} ,$$

Таким образом энергосбережение и качество операции разборки зависит от режима нагрева, который обеспечивает T_{\min} в охватывающей детали при экономичном распределении тепловой энергии по нагреваемой поверхности и всему материалу деталей. То есть лимитирующим качеством деталей разбираемых соединений является температура: минимальное и максимальное ее значения, а так же ее распределение по детали, при котором сохраняется прочность материала.

Необходимый уровень температуры определяет диаметр посадки, натяг и материал детали, в соответствие с известной зависимостью

$$T = \frac{N + i}{\alpha d} + T_o .$$

Распределение температур – температурное поле может создаваться постоянным и периодическим действием индуктора, и при этом нагрев может быть полным (вся деталь) или локальным (часть детали - ступица или та часть, под которой находится посадочная

поверхность). Длительность нагрева может быть ограничена или неограничена. Определение формы температурного поля, которое обеспечит разборку соединения при допустимых напряжениях, зависит от формы нагреваемой детали – тело вращения типа втулка или несимметричная типа корпус (пластина со смещенным отверстием, эллиптической формы с центральным отверстием втулка, рычаг со ступицей и т.д.).

Таким образом, имеется связь лимитирующих параметров качества с параметрами нагреваемой детали и соединения в целом. При этом, естественно, имеется функциональная связь деталей с самим соединением.

От вида нагревателя – индуктор охватывает деталь или ее часть, и типа индукционной системы – одно - или многокатушечная, зависит распределение мощности по нагреваемой детали, а значит и форма температурного поля. Рассмотрим реализующий технологическую операцию индукционный нагреватель с позиций связи его характеристик с лимитирующими качеством параметрами. Как указывалось, на температурное поле влияет так же и временной фактор – когда и как долго производится нагрев. В ИНУ цикл нагрева обеспечивает система управления. То есть имеется прямая связь лимитирующих качество параметров с конструктивными параметрами ИНУ и характером управления нагревом. В то же время длительность нагрева – это фактор, определяющий величину температуры, а ее нужное значение, как было сказано, определяют параметры соединения N , i и D , и параметры детали – ее материал (через коэффициент линейного расширения) Кроме того, от длительности нагрева зависит и производительность ТП. Все сказанное показывает структурную взаимосвязь параметров лимитирующих качество детали соединения с качеством и производительностью технологической операции разборки, характеристикой нагревательного оборудования, и между собой. Эту взаимосвязь можно представить в виде схемы рис.1.

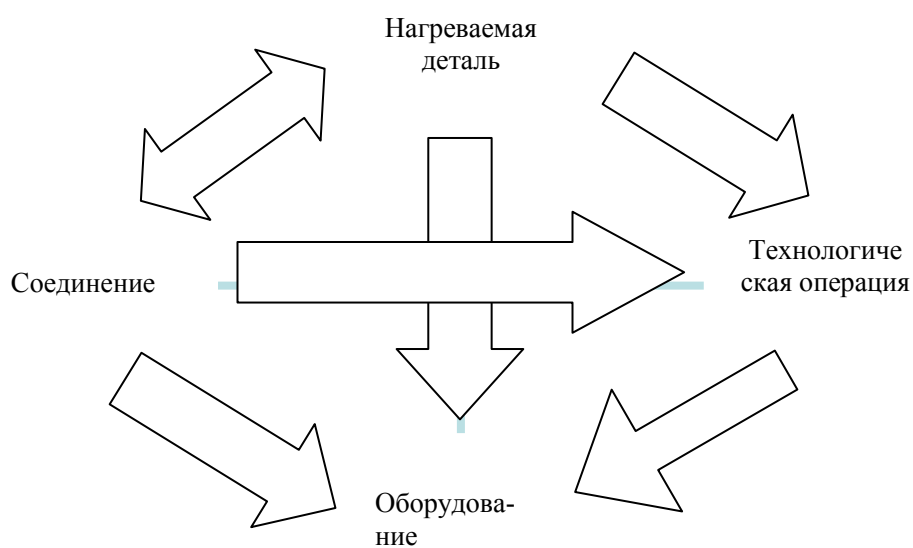


Рис.1 Схема взаимосвязи нагреваемой детали, соединения, технологической операции и оборудования

Как видно из схемы, имеются прямые и обратные связи между ее компонентами. Такая схема «квадрат» показывает структурно-параметрические связи в технологической системе любого ремонтного производства. Она так же может использоваться для выпускающего (сборочного) производства.

Эта схема позволяет установить связи между параметрами, определяющими производительность и экономичность ТП, то есть двумя важными качественными показателями технологий. Для ТП разборки соединения с использованием нагрева, производительность определяет время нагрева до получения ΔD_v , компенсирующего N и образующего i . Оно

зависит от величины N и нагреваемой массы охватывающей детали. Это время связано с мощностью нагревателя. Экономичность же связана с конструкцией нагревателя – соответствие его вида и типа конструкции соединения и детали. Детализация схемы «квадрат», позволит находить наиболее эффективный вариант нагревателя. Она будет выполнена после классификации деталей и соединений, унификации операций разборки и типизации нагревательного оборудования.

Выводы. Таким образом, разработке комплекта нормативной документации должна предшествовать подготовительная работа, состоящая в структурно – параметрическом анализе технологической системы, которая включает: выделение параметров технологических операций, от которых зависят основные технологические показатели – производительность, экономичность и качество изделия или его элементов; установление взаимосвязи операций с параметрами деталей, соединений и оборудованием. То есть выявление лимитирующих качество параметров ТП, определяющих расход энергии и производительность процесса, а так же определение взаимосвязи между ними, является технической основой для построения совокупности взаимосвязанных документов по изделию, технологии и оборудованию.

Литература

1. Соколовский А.П. *Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А.П. Соколовский М., Машгиз, 1995. 514с.*
2. *Сборка и монтаж изделий машиностроения [Текст] / Т.1: Справочник /Под ред. В.С.Корсакова, В.К.Замятина. – М.: Машиностроение, 1983. – 480 с.*
3. *Зенкин А. Побудова комплекту нормативних документів для інтегрованих систем якості на основі обмеження різноманітності [Текст] / А.Зенкин, Г.Хімічева, Б.Барей // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2003 - №2. – С. 22-25.*
4. *Чепурко И.П. Базирование деталей при сборке соединений с термовоздействием [Текст] / И.П.Чепурко, Т.В. Макушенко // Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. «Прогрессивная техника и технологии машиностроения» – Донецк: ДГТУ, - 1995. - С. 260-261.*
5. *Зенкин А.С., Арпентьев Б.М. Сборка неподвижных соединений термическими методами [Текст] / А.С. Зенкин, Б.М.Арпентьев – М.: Машиностроение, 1987. – 128с.*
6. *Лагода А.Н. Классификация соединений, технологических операций и оборудования для построения технологических процессов [Текст] / А. Н. Лагода, Б. М. Арпентьев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006.- № 3/2(21). - С.74-77.*
7. *Лагода, А.Н. Классификация соединений с натягом в дль разборки с индукционным нагревом [Текст] / А. Н. Лагода, Г. М. Триц // Науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників академії (43-тя; 19 лютого 2010; Харків). Ч. 3: Секції: Загальної та інженерної психології, Опору матеріалів та теоретичної механіки, Металоріжучого обладнання і транспортних систем, Технологій та управління якістю в машинобудуванні, Інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва : збірник тез доповідей / Укр. інж.-пед. академія. - Х. : [б. в.], 2010. - С. 30.*
8. *Павлова, А.А. Разработка нормативно-технической документации для ремонта соединений с натягом [Текст] / А. А. Павлова, А. Н. Лагода // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2011. - N 3/1. - С. 39-42.*

©Г.О. Павлова, А.М.Лагода

ПРОБЛЕМА СТВОРЕННЯ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕМОНТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Розглянуто проблеми створення нормативного забезпечення ремонтних технологій для ефективного функціонування ремонтного виробництва. Розроблено методичні основи створення нормативно-технічних документів для ремонтних технологій на основі структурно-параметричного принципу на прикладі розбирання з'єднань з натягом.

Ключові слова: типізація, уніфікація, класифікація, ремонтні технології, структурно-параметричні зв'язки, технологічні системи розбирання виробів, параметри якості.

PROBLEM OF CREATION OF THE NORMATIVE PROVIDING OF REPAIR TECHNOLOGIES

The problems of creation of regulatory Provision of the effective functioning of repair production are considered. The Methodical Bases creation of normative-technical documents for repair technologies based on structural-parametric principle is developed for creation of on the example of sorting out of connections with strength are developed.

Keywords: typization, standardization, classification, repair technologies, structural parametric connections, technological systems of sorting out of wares, parameters of quality.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЗАТОЧУВАННЯ ЛЕЗОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Показано, що найбільш проблемними в обробці як і раніше є лезові інструменти з надтвердих матеріалів. Останнім часом з'явилися інструментальні матеріали з наноструктурою обробка яких вимагає особливого підходу. Запропоновано комплексний підхід до процесу заточки лезових інструментів з цих матеріалів. Розглянуто питання, пов'язані з підвищенням ефективності заточки лезових інструментів в багатомісних пристосуваннях.

Ключові слова: лезові інструменти, надтверді матеріали, заточка лезових інструментів, багатомісні пристосування.

Вступ. Вимоги до якості заточування інструментів систематично підвищуються, особливо у зв'язку з розвитком автоматизованого виробництва. Для верстатів з програмним керуванням, багатоопераційних верстатів, багатопозиційних верстатів-автоматів і автоматичних ліній на яких обробка проводиться одночасно великою кількістю інструментів, потрібно забезпечити їх взаємозамінність, високу стійкість і стабільність якості, що в кінцевому підсумку обумовлює отримання у оброблюваних деталях високої точності, мінімальних похибок геометричної форми, зниження шорсткості поверхні і зменшення руйнувань поверхневого шару [1], [2]. В цьому сенсі треба окремо зазначити особливі труднощі, які виникають у разі заточування лезових інструментів з надтвердих матеріалів (алмаз та щільні модифікації нітриду бора), а також інструментальних матеріалів з нано- та субмікроструктурною структурою, наприклад, наноструктурного твердого сплаву марки «ВолКар» [3]. У першому випадку при обробці надтвердих матеріалів продуктивність процесу заточки дуже низька, а інтенсивність лінійного зносу алмазних кругів дуже велика, (питомі витрати алмазів круга досягають 15 карат на карат інструмента [4]). У другому випадку це пов'язане з тим, що нано- та субмікроструктурні метали відрізняються істотною нестабільністю зеренної структури. При нагріві металу відбуваються складні структурні зміни, пов'язані з розвитком процесів повернення, рекристалізації, як наслідок, зріст зерна і втрата унікальних фізико-механічних властивостей [5]. Тому завдання якісної обробки таких матеріалів є актуальним.

Мета роботи. Метою представленої роботи є підвищення ефективності процесу заточування лезових інструментів у багатомісних пристосуваннях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теперішній час інструменти з твердих сплавів, ріжучої кераміки та надтвердих матеріалів традиційно заточуються алмазними кругами на органічних самозаточувальних зв'язках [4]. В останньому випадку це, як правило, різцеві вставки, які обробляються в багатомісних пристосуваннях [6] на плоскошліфувальних верстатах периферійними алмазними кругами. Як звісно, лінійний характер контакту в зоні різання зумовлює високі питомі силові та температурні навантаження, що часто призводить до браку виробів. Особливо чутливими до цих факторів є матеріали з нано- та субмікроструктурною структурою. Тому в даному випадку більш ефективним вважається застосування процесу шліфування торцем круга на верстатах з вертикальним розташуванням шпинделю [7]. Ця схема обробки дозволяє найбільш просто реалізувати ідею низькотемпературного шліфування за рахунок використання ряду підходів серед

яких в першу чергу слід назвати обробку у суцільному шарі технологічної рідини [8], а також використання попереднього нахилу осі обертання шпинделю [9].

Відомі багатомісні пристосування для заточування інструментів як правило не дозволяють проводити весь цикл заточування (лиска, передня і задні поверхні та фаска). Тому ці поверхні заточуються (шліфуються) з застосуванням різних пристосувань.

Так, наприклад, на рисунку 1 наведено відоме багатомісне касетне пристосування (рис. 1 а- вид з боку; рис. 1 б- вид зверху; рис. 1 в- поперечний розріз) для обробки головного і допоміжного кутів у плані, головного і допоміжного задніх кутів і фаски при вершині різця [6].

Воно складається із збирного корпусу, в пазу якого розміщені з можливістю подовжного переміщення вкладиші і пристрій для їх переміщення, корпус пристосування виконаний у вигляді призми з трьома базовими площинами, крайні з яких утворюють кут, рівний головному куту в плані, а середня паралельна дну паза корпусу, при цьому вкладиші виконані з декількома базовими поверхнями, одна з яких плоска, а інша призматична, причому базові поверхні вкладишів нахилені до дна паза під кутом, рівним задньому куту [6].

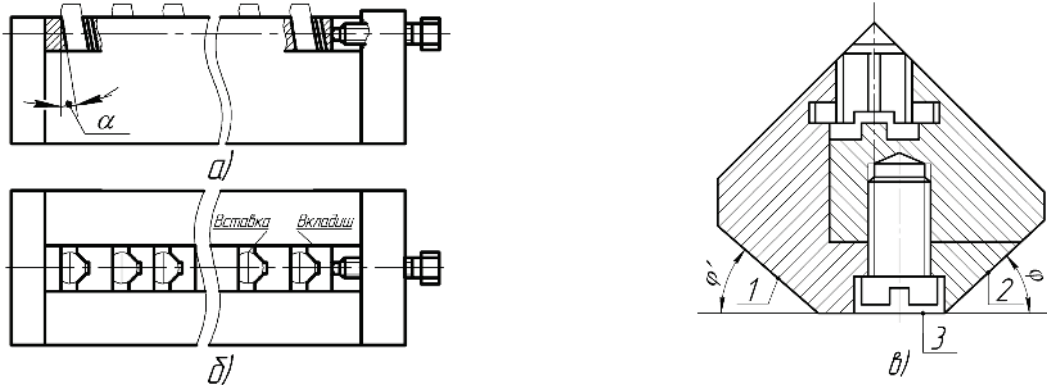


Рис. 1. Багатомісне касетне пристосування [6]

Суттєвим недоліком пристрою є те, що він дозволяє заточувати задні поверхні різцевих вставок тільки з певною геометрією і не призначений для обробки передніх поверхонь, що знижує його технологічні можливості.

Більш досконалою є конструкція багатомісного касетного пристосування (рис. 2 [10]) для обробки головного і допоміжного кутів у плані, головного і допоміжного задніх кутів і фаски при вершині різця яке містить збірний корпус з базовими площинами, призначеними для почергового базування, і вкладиші, розміщені у центральному поздовжньому пазу корпусу з можливістю переміщення.

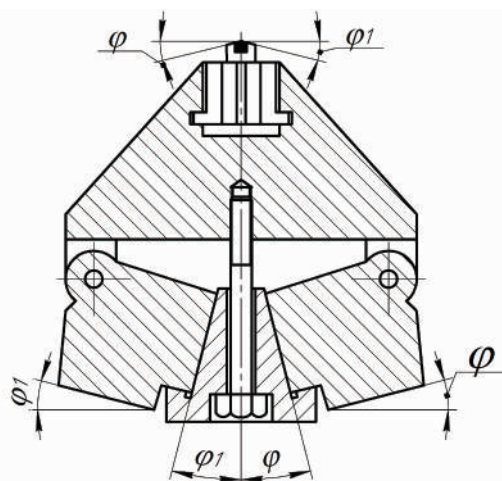


Рис. 2. Регульоване багатомісне касетне пристосування [10]

Збірний корпус виконаний у вигляді двох напівпризм, встановлених з можливістю повороту щодо частини корпусу, несучої вкладиші, і мають клинові поверхні, призначені для взаємодії з введеним в пристосування клином, при цьому дві базові поверхні розташовані на напівпризмах, а третя - на клині. Таке пристосування дозволяє формувати різні кути в плані за рахунок зміни клину, але також не призначене для обробки передньої поверхні інструменту.

Основні матеріали досліджень. Вирішувати цю задачу потрібно з використанням комплексного підходу. Він полягає в наступному. 1. В застосуванні алмазних кругів (особливо на зносостійких металевих зв'язках в комбінованих процесах шліфування). 2. В використанні низькотемпературних процесів шліфування. 3. В застосуванні більш досконалих багатомісних пристосовань та ін. Це дозволяє забезпечити підвищення стійкості інструменту, збільшення продуктивності і зниження собівартості заточки, а також досягти досить високої розмірної точності лезових інструментів (особливо вставок з надтвердих матеріалів в межах одного завантаження багатомісного пристосування).

Для практичної реалізації зазначеного комплексного підходу нами було запропоноване наступне. 1. У процесі шліфування ріжучий рельєф алмазного круга на металевій зв'язці підтримується в розвинутому стані за рахунок дозованого електрохімічного видалення зв'язки. Крім цього при обробці крихких матеріалів доцільно вводити в зону шліфування механічні коливання (особливо на чорнових стадіях обробки). Це сприяє активізації процесу самозаточування алмазних зерен круга і дозволяє суттєво підвищити продуктивність обробки і таким чином вирішити проблему заточки лезових інструментів з надтвердих матеріалів. 2. Для надійного охолодження зони обробки треба використовувати спеціальні ванни заповнені технологічною рідиною. Таким чином робоча поверхня круга і оброблювальні деталі знаходяться в процесі обробки у суцільному шарі технологічної рідини, а остання додатково подається ще й у внутрішню порожнину круга, що сприяє покращенню умов заповнення зони різання технологічною рідиною. Цей підхід з одного боку зводить до мінімуму негативний вплив на робочу частину лезових інструментів температурного фактора, а з другого гарантовано виключає можливість появи бракованих виробів, наприклад, у випадку непередбаченого припинення подачі технологічної рідини у внутрішню порожнину круга. 3. Запропонована конструкція багатомісного касетного пристосування. Її застосування дозволяє вести обробку всіх поверхонь інструментів (листка, передня, задні поверхні та фаска). Виняток складає радіус при вершині різця.

Для практичної реалізації першого і другого підходів нами була запропонована конструкція плоскошліфувального верстата з вертикальним розташуванням шпинделя стосовно використання торцевих кругів [8]. Вона розроблена з урахуванням існуючих напрацювань, а саме запропонованих способів шліфування і правки, а також пристроїв для їх здійснення.

Для практичної реалізації третього підходу нами була запропонована конструкція універсального багатомісного пристосування касетного типу. Це пристосування дозволяє поетапно шліфувати лиски, фаски, а також передні і задні поверхні на вставках [11].

Як відомо, універсальні пристосування є більш складними, а, отже, і дорогими. В той же час, коли мова йде про виготовлення значної кількості лезових інструментів, вони не тільки достатньо швидко окупаються, але й забезпечують отримання прибутку.

За основу цього пристосування були взяті конструкції, які були розглянуті вище (див. рис. 1, 2).

Відмінною ознакою цього пристосування (рис. 3) є те, що поздовжній паз виконаний зі зміщенням в одну з бічних сторін верхньої частини корпусу, у другій частині якого виконані наскрізні отвори, осі яких перпендикулярні до поздовжньої осі паза, причому верхня частина отворів зрізана таким чином, щоб довжина хорди, яка утворена в результаті перетину верхньої площини корпусу з кожним отвором знаходилася в межах:

$$d \cdot \sin(90 - \arcsin((2h-d-2h')/d)) \leq L_x \leq d - 0,2, \quad (1)$$

де L_x - довжина хорди, мм; d - діаметр отвору, що підлягає заточуванню, мм; h - висота вставки, мм; h' - гарантована висота вильоту вставки, рівна 0,1-0,2 мм.

Завдяки наявності системи отворів для установки різцевих вставок (при цьому діаметр отвору дорівнює діаметру вставки) створена можливість реалізації повного циклу заточування з використанням одного багатомісного касетного пристосування, що істотно розширює його технологічні можливості.

Пристосування (рис. 3) містить дві напівпризми 1, 2, встановлені на осях 3, 4 з можливістю повороту щодо корпусу 5, у верхній частині якого виконаний поздовжній паз 6, зміщений в одну із сторін (в даному випадку вліво).

При цьому верхня площина корпусу ділиться приблизно навпіл. Цей паз служить для закріплення різцевих вставок 7 при заточуванні їх задніх поверхонь. Кожна з напівпризм 1, 2 поєднана з відповідними поверхнями змінного клина 8, завдяки чому вони отримують нахил до горизонтальної площини під передніми кутами вставок «- γ » (установка на площину А) або «+ γ » (установка на площину В) відповідної величини.

При установці пристосування на торцеву поверхню клина 8 (установка на площину С) передній кут γ дорівнює нулю.

На протилежній від паза стороні верхньої частини корпусу виконана система отворів для розміщення різцевих вставок 7 при шліфуванні лисок і заточуванні їх передніх поверхонь. Для силового замикання конструкції використовується болт 9.

Схема розміщення різцевих вставок в отворах показана на рисунку 4.

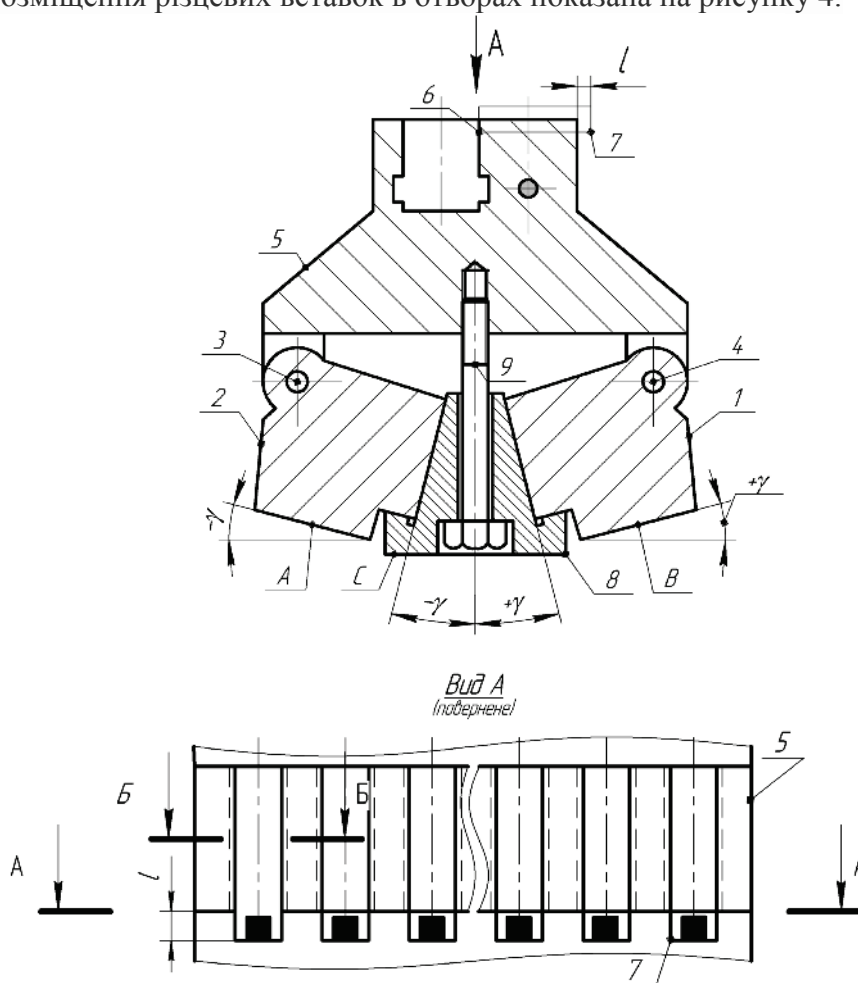


Рис. 3. Універсальне багатомісне касетне пристосування [11]

Осі цих отворів виконані перпендикулярно поздовжньої осі паза. Вставки зміщені в осьовому напрямку на величину l , приблизно рівну розміру їх головок. Це запобігає пошкодженню корпусу шліфувальним кругом.

Як видно з рисунку 4, верхня частина отворів зрізана. При цьому довжина хорди L_x , яка утворена в результаті перетину верхньої площини корпусу з кожним отвором повинна перебувати в певних межах (див. нерівність (1)). Це з одного боку створює можливість отримання необхідної висоти вставок h при шліфуванні лисок, а з іншого - виключає можливість вільного випадання вставок. Додаткова (гарантована) величина виступу вставок h' служить для захисту корпусу від можливого пошкодження шліфувальним кругом ($h' = 0,1 - 0,2$ мм).

Таким чином, зрізана верхня частина отворів дозволяє забезпечити повний доступ шліфувального круга для формоутворення лисок і передніх поверхонь лезових інструментів. У зв'язку з цим затискні елементи були розташовані знизу (рис. 5). В даному випадку процес затискання проводиться плунжерами 10 за допомогою, наприклад, гідропласту. Заглушки 11 служать для створення умови герметичності системи затиску.

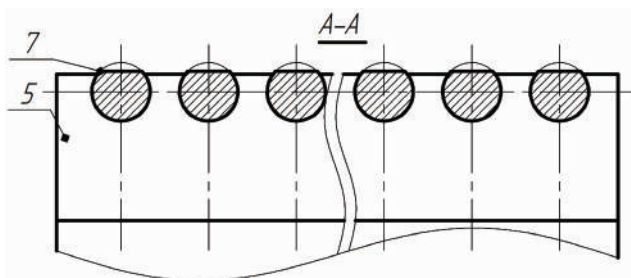


Рис. 4. Схема розташування вставок в отворах [11]

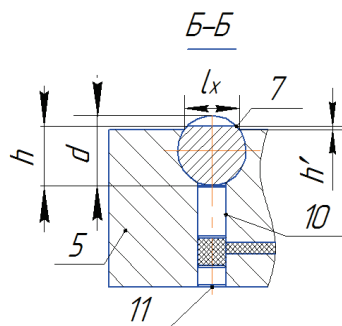


Рис. 5. Схема кріплення вставок в отворах [11]

Слід зазначити, що у разі шліфування задніх поверхонь та фаски, пристосування використовується аналогічно конструкції, показаної на рисунку 2.

Приклад використання пристосування наведемо стосовно заточування різцевих вставок $\varnothing 10$, оснащених, наприклад, надтвердим матеріалом ельбор - Р (на рисунку 3 надтвердий матеріал показаний чорною заливкою), алмазним торцевим кругом. Вставки по діаметру повинні бути точними (ІТ6-ІТ7), що достатньо просто реалізувати за допомогою безцентрово-шліфувальних верстатів. Висота вставок за кресленням $h = 7,5$ мм. Гарантований розмір h' був прийнятий рівним 0,2 мм. Довжину хорд отворів в касеті розраховували за запропонованою вище формулою:

$$L_x = 10 \cdot \sin(90^\circ - \arcsin((2 \cdot 7,5 - 10 - 2 \cdot 0,2) / 10)) \approx 8,9 \text{ мм.}$$

Приймаємо $L_x = 8,9$ мм.

Робимо перевірку: $L_x = d - 0,2 = 10 - 0,2 = 9,8$ мм. Оскільки $8,9 < 9,8$, умова не перебільшення довжини хорди витримується.

Практикою використання пристосування встановлено, що по-перше розрахована за запропонованою формулою (1) довжина хорди дозволяє при надійному закріпленні забезпечувати обробку лиски та передньої поверхні з заданими розмірами, а по-друге застосування запропонованого пристосування дозволяє зменшити собівартість заточування різце-

вих вставок приблизно на 6% за рахунок можливості виконання повного циклу їх обробки на одному пристосуванні.

Висновки та перспективи розвитку. Таким чином, комплексний підхід дозволяє забезпечити вирішення проблеми заточування інструментів з широкою гамою інструментальних (аж включно до надтвердих) матеріалів. У подальшому значний інтерес представляють дослідження по виявленню особливостей заточування інструментів з матеріалів, які мають з субмікро- і наноструктуру.

Література

1. Захаренко И.П. Приспособления для алмазной заточки режущего инструмента / И.П. Захаренко, А.А. Шепелев, Я.А. Кункин, В.С. Мендельсон. -К.:Техника, 1977. -108 с.
2. Уткин Н.Ф. Приспособления для механической обработки / Н.Ф. Уткин. Л.: Лениздат, 1983. – 175с.
3. Стрельчук Р.М. Особенности комбинированной обработки высокотвердых инструментальных материалов / Р.М. Стрельчук, В.Г. Клименко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць.-вип. 8.-Харків: НТУ «ХПИ», 2013.-с. 154-161.
4. Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с.
5. Пат. 57966 Україна, МПК (2011.01) В23 В 25/00. Спосіб визначення допустимої швидкості різання при механічній обробці субмікро- та нанокристалічних матеріалів / М.В. Везуб, А.А. Симонова, Дж. Каптай, О.К. Севидова. Власник Національний технічний університет «ХПИ». - № 201009836; заявл. 09.08.2010; опубл. 25.03.2011. Бюл. №6.
6. А.с. № 715296 СССР. МПК В24В 3/34. Многоместное кассетное приспособление / Н.А. Кунин, В.И. Иванов, П.И. Смирнов и А.А. Климова. -№ 2599391/25; заявлено 05.04.78; опубл. 15.02.1980, Б.И. № 06.
7. Грабченко А.И. Повышение эффективности заточки режущих инструментов в многоместных приспособлениях / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, С.А.Култышев // Резание и инструмент.- Харьков, 1990. - Вып.44. – с. 3-4.
8. Пат. 81400 Україна, МПК (2013.01) В24В7/00 В24В21/00. Плоскошлифовальный верстат / Грабченко А.И., Пыжов И.М., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № 2013 01144; заявл. 30.01.2013; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12.
9. Лоскутов В.В. Шлифовальные станки. / В.В. Лоскутов. -М.: Машиностроение. - 1976. – 191 с.
10. А.с. № 1541009 СССР. МПК (2014) В23Q/00, В24В3/34. Приспособление кассетного типа / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, С.А. Култышев. -№.4361368/31-08; заявлено 11.01.1988; опубл. 08.10.1989, Б.И. № 05.
11. Пат. 91976 Україна, МПК (2014.01) В23 Q 3/00 В24 В 3/00. Багатомісцеве касетне пристосування / Алексєнко Д.М., Пижов І.М., Клименко В.Г. Власник Сумський державний університет. - № 2014 01461; заявл. 14.02.2014; опубл. 25.07.2013. Бюл. № 14.

© В.Г. Клименко, І.М. Пижов

УДК 621.923

В.Г. Клименко, аспирант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,

И.М. Пыжов, д.т.н., профессор

Харьковской национальный технический университет «ХПИ»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЗАТАЧИВАНИЯ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Показано, что наиболее проблемными в обработке по-прежнему являются лезвийные инструменты из сверхтвердых материалов. В последнее время появились инструментальные материалы с наноструктурой обработка которых требует особого подхо-

да. Предложен комплексный подход к процессу заточки лезвийных инструментов из этих материалов. Рассмотрены вопросы, связанные с повышением эффективности заточки лезвийных инструментов в многоместных приспособлениях.

Ключевые слова: лезвийные инструменты, сверхтвердые материалы, затачивание лезвийных инструментов, многоместные приспособления.

UDC 621.923

*V. G. Klimenko, graduate student,
Poltava National Technical Yriy Kondratiuk University,
Y. M. Pyzhov, Doctor of Engineering, professor
National Technical University "KPI"*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF SHARPENING BLADE TOOLS

It is shown that edged tools made of superhard materials are still the most problematic ones when machining. Recently, tool materials with nanostructure have appeared, so their processing requires a special approach. A comprehensive approach to the process of sharpening of edged tools made of these materials is proposed. The problems related to improving the efficiency of sharpening of edged tool in multipart devices are considered.

Keywords: *edged tools, superhard materials, blade sharpening tools, multipart devices.*

Н.К. Резниченко, д.т.н., проф.

И.Я. Мовшович, д.т.н., проф.

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

Е.А. Фролов, д.т.н., проф.

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫМ НАНЕСЕНИЕМ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

В статье изложены требования, предъявляемые к проектированию и изготовлению деталей машин с детонационно-газовым покрытием, приведены используемые порошковые материалы и технология детонационно-газового уплотнения, механическая обработка, контроль качества и приемка упрочненных деталей.

В результате на поверхности упрочненных деталей образуется слой покрытия, обладающий новыми свойствами, отличными от свойств материала деталей.

Ключевые слова: *упрочняющее покрытие, порошковые материалы, технология механической обработки, механический и пылевой износ.*

Введение.

Детонационно-газовые покрытия успешно применяются в машиностроении, авиационной промышленности.

Детонационно-газовое упрочнение деталей предназначено для повышения их служебно-эксплуатационных характеристик путем высокоскоростного импульсного напыления на их рабочие поверхности порошковых материалов преимущественно в расплавленном состоянии.

Обзор последних источников исследований и публикаций.

Основу номенклатуры деталей составляют детали авиационных газотурбинных двигателей, двигатели внутреннего сгорания и детали фонтанной аппаратуры для нефтедобычи, работающие в условиях повышенных температур, агрессивных сред и интенсивного механического и пылевого износа [1].

Состояние исследований вопросов нанесения упрочняющих покрытий на детали машин.

Методы детонационно-газового напыления являются наиболее перспективным направлением как с точки зрения обеспечения качества покрытий (повышения стойкости инструмента и деталей машин), так и технико-экономических показателей их получения.

Обзор литературных источников показал, что, несмотря на преимущества наносимых покрытий, внедрение детонационно-газового метода осуществляется очень медленно. Причиной тому является:

- высокий уровень шума (от 120 до 146 дБ), что требует строительства отдельных боксов;

- отсутствие единых технологических рекомендаций по выбору режимов напыления различных порошковых материалов.

Постановка задачи.

Поиск новых путей интенсификации процесса покрытий на сложнопрофильные поверхности требует совершенствования технологии детонационно-газового метода напыления, что и является актуальной задачей.

Основное содержание работы.

При проектировании конструкции деталей с детонационным покрытием следует учитывать:

- Покрытие можно наносить только на наружные открытые поверхности.
 - Форма поверхности должна позволять производить на неё напыление под углом $90^{\circ} \pm 15^{\circ}$.
 - Зазоры, отверстия, карманы и другие труднодоступные места детонационно-газовому упрочнению не подлежат.
 - Толщина теплозащитного керамического покрытия должна быть в пределах 1-1,5 мм.
 - Толщина термостойкого эрозийноустойчивого металло- керамического покрытия должна быть в пределах 0,5 - 0,8 мм.
 - Толщина износостойкого металлического покрытия должна быть в пределах 0,1 - 0,3 мм.
 - Толщина антифрикционного приработочного металлического покрытия должна быть в пределах 0,03 - 0,05 мм.
 - Для повышения прочности сцепления покрытия с основой напыление проводят по подслою, толщина которого составляет 0,05 - 0,1 мм.
 - Детали под детонационно-газовое упрочнение могут быть изготовлены из стали, чугуна, алюминиевых сплавов и других металлов и должны иметь твердость поверхности не более 40-45 НК.С.
 - Термообработка деталей после детонационно-газового упрочнения не допускается.
 - Шероховатость поверхности под упрочнение может быть любой, отклонения от геометрии поверхности (в случае последующей механической обработки покрытия) не должны превышать 10% от толщины покрытия [2,3].
 - Кромки упрочняемой поверхности должны иметь округления радиусом не менее 1 мм, допускается применение фасок размером 18° - 45° .
- Подготовка деталей под упрочнение.
- Детали должны быть окончательно механически обработаны кроме мест, подлежащих упрочнению. В этих местах должен быть удалён слой металла, равный толщине упрочняющего покрытия.
 - Подготовка поверхности, хранение и транспортирование подготовленных под упрочнение деталей проводится в помещении при температуре не ниже 18°C и относительной влажности не выше 75%. При этом допускается наличие в окружающей среде веществ, способствующих коррозии упрочняемых поверхностей.
 - Поверхности, подлежащие упрочнению, подвергаются струйно-абразивной обработке в специальной камере при давлении сжатого воздуха 4-6 кгс/см², расстояние от среза сопла воздушного пистолета до обрабатываемой поверхности 40-70 мм, угол наклона потока 60 - 90° .
 - Поверхности деталей, не подлежащие упрочнению, защищаются от воздействия струйно-абразивной обработки (а также последующего напыления) специальными экранами.
 - После струйно-абразивной обработки деталь обдувается с воздухом для удаления частиц абразива.
 - Качество подготовки поверхности детали под упрочнение контролируется внешним осмотром с применением лупы 4-кратного увеличения, шероховатость поверхности должна быть Rz 80-100 по ГОСТ 2789.
- Порошковые материалы, используемые для нанесения покрытий.
- Перечень порошковых материалов, используемых для детонационно-газового напыления, и их назначение приведены в приложении Б к ТУ.

- Порошковые материалы должны подвергаться входному контролю по сертификатам на соответствие техническим условиям (ГОСТам) по гранулометрическому и химическому составам.

- При отсутствии сертификата проводятся определение гранулометрического и химического составов по ГОСТам 18318, 12344, 12352, 12356.

- Порошковые материалы перед использованием просушиваются при температуре для металлических и металлокерамических покрытий — 120-150°C, для керамических покрытий - 250-300°C в течение не менее 1,5 часов на противнях из нержавеющей стали и периодически перемешиваются. Толщина слоя насыпки порошка при этом должна быть не более 15 мм.

- Приготовление механических смесей порошков производится в специальном барабане, для смешивания использовать смесительные тела (ерши, шары и т.п.).

Материалы для струйно-абразивной обработки.

Для струйно-абразивной обработки применяется сухой, незагрязненный маслом, ржавчиной и другими веществами острогранный абразивный материал - шлифзерно зернистостью от 20П до 32П по ГОСТ 3847.

Газы.

- В качестве рабочих газов применяются: ацетилен технический по ГОСТ 5457, кислород газообразный по ГОСТ 5583, азот газообразный по ГОСТ 9293 и сжатый воздух по ГОСТ 9.010.

- Сжатый воздух, используемый для струйно-абразивной обработки, должен быть очищен от масла, влаги и быть не ниже 7-9 классов загрязненности по ГОСТ 17433.

- Методы измерения загрязнённости сжатого воздуха по ГОСТ 24484.

Детонационно-газовое упрочнение.

- Длительность перерыва между струйно-абразивной обработкой и напылением упрочняющего покрытия не должна превышать 6-8 часов.

- Перед напылением поверхность детали должна быть сухой и чистой и соответствовать первой степени обезжиривания по ГОСТ 9.402.

- Упрочняемая деталь с помощью специальной оснастки закрепляется на манипуляторе, обеспечивающем необходимую свободу перемещения относительно ствола детонационной установки, таким образом, чтобы исключить препятствия на пути потока напыляемых частиц.

- Поверхности детали, не подлежащие напылению, должны быть защищены металлическими экранами.

- Дистанция напыления в зависимости от типа напыляемого порошкового материала и режима напыления колеблется от 35 до 200 мм.

- Подслой и основное покрытие напыляются с одной установки послойно, при этом необходимая толщина покрытия достигается путем циклического напыления единичных пятен покрытия со смещением одного пятна относительно другого на шаг, не превышающий половину диаметра ствола установки — до 10 мм.

- Параметры технологического режима детонационно-газового напыления определяются технологическим процессом, разрабатываемым на каждую конкретную деталь.

- Припуск под шлифование покрытия должен быть не менее 0,1 на сторону.

- Для охлаждения напыляемого покрытия следует применять обдув струёй сжатого воздуха.

- Допускается в процессе напыления покрытия делать кратко-временные (до 10 минут) паузы между нанесением отдельных слоев с целью охлаждения внешнего осмотра и измерения толщины напыляемого покрытия [3].

Механическая обработка деталей с покрытием.

- После детонационно-газового упрочнения детали с покрытиями при необходимости следует подвергать механической обработке с целью обеспечения необходимых раз-

меров и шероховатости упрочнённых поверхностей в соответствии с требованиями конструкторской документации.

- Механической обработке подвергаются износостойкие покрытия, работающие на трение в контакте с рабочими поверхностями сопряженных деталей. Теплозащитные покрытия, как правило, мехобработке не подлежат.

- Механическая обработка детонационно-газовых покрытий осуществляется методом шлифования.

- Для шлифования следует применять абразивные материалы; электрокорунд белый и нормальный, электрокорунд легированный хромом и титаном (марок 91А и 92А), карбид кремния зелёный (карборунд), а также алмаз.

- Ввиду высокой твёрдости покрытий следует применять шлифовальные круги с керамическими связками средней мягкости (СМ1, СМ2) и мягкие. Алмазные круги, как правило, на металлической связке.

- Поперечная подача при шлифовании должна быть в пределах 0,01—0,04мм/дв.ход.

- Следует применять интенсивное охлаждение 0,3%-ным водным раствором кальцинированной соды.

- Другие параметры режима шлифования должны подбираться для каждой конкретной детали.

Контроль качества и приемка упрочненных деталей.

- Контроль качества упрочнённых деталей выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 27953 и ГОСТ 9.304.

- Внешний вид напылённой и прошлифованной детали контролируется с применением лупы 4-кратного увеличения ГОСТ 25706. Покрытие должно быть равномерным, без трещин, раковин, сколов, отслоений (вздутий). Цветовые оттенки не нормируются.

- Шероховатость поверхности покрытия должна соответствовать требованиям конструкторской документации и контролироваться путём визуального сравнения с образцами шероховатости по ГОСТ 2789 [4].

- Обмеры упрочнённой детали следует производить универсальными измерительными средствами. Контроль толщины напылённого покрытия осуществлять путём определения размеров детали до и после напыления и последующей мехобработки.

- Контроль качества покрытия по показателям, определяемым при разрушающих методах контроля, а именно: прочность сцепления покрытия с основой и его твёрдость, следует проводить на образцах-свидетелях.

- Должно быть изготовлено по три образца-свидетеля на партию однотипных деталей, упрочняемых за смену (одним и тем же покрытием).

- Образцы-свидетели должны быть изготовлены из того же материала, пройти ту же термообработку и иметь такую же твёрдость, что и упрочняемые детали. Детонационно-газовое упрочнение и последующая мехобработка покрытия на образцах-свидетелях должны быть выполнены по той же технологии, что и упрочняемые детали.

- Образцы-свидетели представляют собой штифтовые образцы с углом конусности 30°.

Покрытие толщиной не менее 0,3 мм напыляется на торец конусного штифта, вставленного и закреплённого во втулку, затем штифт отрывается от покрытия на разрывной испытательной машине Р-05 ГОСТ 7855, при этом измеряется усилие отрыва. Прочность сцепления покрытия с основой (адгезия) определяется как отношение усилия отрыва к площади торца

штифта [5].

- Для определения твёрдости покрытий использовать втулки со штифтовых образцов, прошедших адгезионные испытания.

- Твёрдость покрытия определяется по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 2999. Испытательная нагрузка - 5 кгс.

- При необходимости проведения исследования микроструктуры покрытия, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов, а также других исследований следует использовать те же образцы.

В случае выявления некачественного покрытия оно должно быть удалено механическим способом (например, сошлифовано) и нанесено повторно.

Выводы.

Метод детонационно-газового нанесения покрытий является наиболее перспективным как точки зрения обеспечения качества покрытий, так и технико-экономических показателей их получения; а именно:

- прочность сцепления покрытия с изделием достигает от 180 до 360 МПа, что на порядок выше, чем у покрытий, наносимых другими методами;

- толщина наносимого слоя лежит в пределах 0,2-0,6 мм;

- температура деталей при напылении зависит от ее размеров и не превышает 530 К, что соответствует низкому отпуску;

- возможность плавного и устойчивого регулирования параметров

процесса в широком диапазоне позволяет для каждого материала установить наиболее оптимальные режимы напыления.

Литература

1. Мовшович И.Я., Резниченко Н.К., Горелик Б.В. Нанесение упрочняющих покрытий: монография.- Харьков: Украинская инженерно-педагогическая академия, 2012,- 171 с.

2. Богуслав В.А., Долматов А.И., Мовшович И.Я., др. Повышение ресурса модулей двигателей технологическими методами.- Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003, - 253.

3. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущий инструмент с износостойкими покрытиями.- М.: Машиностроение, 1986,- 192с.

4. Этингант А.А. Исследование влияния технологических параметров способов конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой на работоспособность режущих инструментов: Дис. канд. техн. наук.- М.: 1981,- 190с.

5. Жолткевич Н.Д., Мовшович И.Я., Кобзев А.С., Горбулин В.П., др. Обратимая технологическая оснастка для ГПС.- Киев: «Техника», 1992,- 215с.

© М.К. Резніченко, І.Я. Мовшович, Є.А. Фролов

УДК 621. 7.793:621.65.073

М.К. Резніченко, д.т.н., проф.

І.Я. Мовшович, д.т.н., проф.

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

Є.А. Фролов, д.т.н., проф.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ БАЗОВИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН З ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИМ НАНЕСЕННЯМ ЗМІЦНЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ.

У статті викладені вимоги, пропонувані до проектування і виготовлення деталей машин з детонаційно-газовим покриттям, наведені використовувані порошкові матеріали і технологія детонаційному-газового ущільнення, механічна обробка, контроль якості і приймання зміцнених деталей.

В результаті на поверхні зміцнених деталей утворюється шар покриття, що володіє новими властивостями, відмінними від властивостей матеріалу деталей.

Ключові слова: зміцнюючі покриття, порошкові матеріали, технологія механічної обробки, механічний і пиловий знос.

UDC 621. 7.793:621.65.073

M.K. Reznichenko, Doctor of Science, Professor.

I.Y. Movshovich, Doctor of Science, Professor.

Ukrainian engineering pedagogics academy, Kharkov

E.A. Frolov, Doctor of Science, Professor.

Poltava national technical Yuri Kondratyuk university

DESIGN AND MANUFACTURE OF BASIC MACHINE PARTS WITH DETONATION-GAS DEPOSITION OF HARDENING COATINGS

The article outlines the requirements for the design and manufacture of machine parts with detonation gas-coated. The used powder materials and technology detonation-gas seals, machining, quality control and acceptance of hardened parts are listed.

As a result, on the surface of hardening details of the coating layer is formed possessing new properties different from the properties of the workpiece material.

Keywords: *hardening coating, powder materials, technology of machining, mechanical abrasion and dust*

ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ И КОНСОЛИДИРОВАННЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

В работе представлены результаты создания консолидированных наноматериалов и композиционной керамики с использованием вышеуказанных особенностей для синтеза прекурсоров порошков и заданных фаз, самоармирующих керамические матрицы.

Ключевые слова: наноматериалы консолидированные, композиты органические, композиты неорганические.

Введение. Современный этап развития науки и техники характеризуется значительными достижениями в области создания композиционных материалов (КМ). В современных разработках высоких технологий смешение компонентов на молекулярном уровне и создание КМ с дисперсными, наноразмерными и волокнистыми включениями являются основной тенденцией керамического материаловедения. Поэтому механохимия и золь-гель процесс, которые позволяют проектировать, создавать и управлять свойствами материалов и изделий из них, являются самыми перспективными направлениями при разработке новых технологических решений и новых материалов с заданными свойствами.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Известно, что свойства композитов на основе тугоплавких соединений становятся размерно-зависимыми при уменьшении размера частиц до нескольких межатомных расстояний в одном, двух или трех измерениях [1,2]. Получение прочной наноструктурной керамики на основе ZrO_2 с значительным повышением механических свойств может быть реализовано путем создания материала с тонкой однородной структурой, на основе порошков бескислородных соединений прочностные свойства и трещиностойкость повышаются при создании –интра и –интер наноструктур [3,4].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Одной из характерных особенностей метода создания нанопропрочненных КМ наночастицами и нановолокнами β -SiC и Si_3N_4 является самоорганизация гелевых структур и целенаправленная организация нанореакторов для синтеза наночастиц и нановолокон указанных соединений. В нанореакторах посредством физических воздействий (температура и давление) удается управлять процессами химических превращений тетраэтоксисилана и последующей самоорганизации радикалов ($-CH_3$) в гелевых кластерах β -кristобалитовой структуры в органо-неорганический комплекс $(-CH_3)-(SiO_2)_n$. Этот комплекс является прекурсором компонентов для синтеза бескислородных соединений, в первую очередь, β -SiC при низких температурах. Низкотемпературный синтез SiC, согласно термодинамическим расчетам [5-8], возможен только из таких компонентов как углерод и монооксид кремния. При $P_{SiO} = 10^{-19} - 10^{-12}$ атм. и $P_{CO}/P_{CO_2} = 9:1 - 8:2$ синтез SiC может осуществиться при температуре ниже 700 К, что подтверждено экспериментально [6,7] в процессе термодеструкции гелей и при модифицировании порошков тугоплавких соединений для КМ при их измельчении с алкоксидом кремния. Механизмы низкотемпературного синтеза β -SiC в процессе механохимической активации порошков при измельчении с алкоксидом кремния и при термообработке гелей на его основе идентичны. При модифицировании порошка любого тугоплавкого наполнителя при измельчении с добавкой алкоксида кремния наблюдалось заро-

дышеобразование и синтез наночастиц β -SiC, а также систематические и несистематические нарушения кристаллических решеток измельчаемых порошков, что интенсифицирует спекание тугоплавких порошков при изготовлении КМ. Использование модифицированных алкоксидом кремния порошков α -SiC, B_4C , Si_3N_4 и Al_2O_3 в качестве наполнителей керамических матриц привело к созданию горячепрессованной трещиностойкой керамики, корундовых покрытий для защиты графита от окисления с нанопропрочненным β -SiC промежуточным слоем, нанопропрочненных углеграфитовых и карбидкремниевых КМ [9].

Использование наночастиц WC и частично стабилизированных оксидом иттрия наночастиц ZrO_2 позволяет методом горячего прессования при прямом пропускании тока через графитовую форму получить тонкую микроструктуру композитов с высокими физико-механическими свойствами. Данный процесс осуществляли на специально разработанной установке горячего прессования [10].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В данной работе представлены результаты использования указанных тенденций для создания перспективных композиционных материалов. Применение современных способов консолидации керамических материалов и объединение методов синтеза органической и неорганической химии, золь-гель метода и механохимии, позволяющих контролировать процессы синтеза заданных фаз на молекулярном уровне, дает возможность создавать высокоэффективные композиционные материалы.

Изложение основного материала. Консолидацию композиционных материалов на основе порошков бескислородных соединений осуществляли известным методом горячего прессования при температурах 1873-2573 К (30 мин). Горячее прессование ZrO_2 осуществляли при помощи разработанной установки горячего прессования с применением высокоамперного тока при пропускании его через графитовую пресс-форму [10] при температуре 1473-1673 К и скорости подъема температуры 400 градусов/мин.

Фазовый состав модифицированных порошков и разработанных материалов на их основе, размер зерен синтезированных фаз, свойства образцов определяли известными методами. Структуру SiC материалов изучали с помощью поляризационного микроскопа МИН-8 и электронного микроскопа Jeol. Рентгенофазовый анализ осуществляли на дифрактометре DRON-3М при $Cu_{K\alpha}$ излучении.

Фазовый состав полученных образцов ZrO_2 - Y_2O_3 -WC исследовали методом рентгенофазового анализа (дифрактометр Rigaku Ultima IV ($Cu_{K\alpha}$ – излучение, Ni – фильтр). Для определения точного элементного состава материала был выполнен рентгеноспектральный анализ с использованием растрового ионно-электронного микроскопа Quanta 200 3D. Определение формы и размеров частиц порошков осуществляли с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100.

Исследование структуры спеченных образцов на основе частично стабилизированного диоксида циркония проводили методами силовой зондовой (атомносиловой микроскоп Ntegra Aura) и растровой микроскопии (растровый ионно-электронный микроскоп Nova NanoSEM). Микротвердость образцов керамики определяли с помощью автоматического микротвердомера AFFRI DM8 методом Виккерса с применением 1 кг нагрузки в течение 15 секунд.

Одноосные испытания образцов материалов на сжатие проводились при комнатной температуре на воздухе с помощью испытательной машины Instron 300LX.

Для создания трещиностойкой конструкционной керамики на основе бескислородных соединений использовали модифицированные порошки этих соединений при измельчении с добавкой алкоксида кремния (тетраэтоксисилана). Зародышеобразование и механохимический синтез β -SiC при измельчении порошков с этой добавкой наиболее ярко может быть представлен при получении модифицированного электрокорунда (рис.1). Уже через 1 час помола в шаровой мельнице наблюдается механохимический синтез β -

SiC из образовавшегося в процессе измельчения органо-неорганического комплекса $(-\text{CH}_3)-(\text{SiO}_2)_n$ [7].

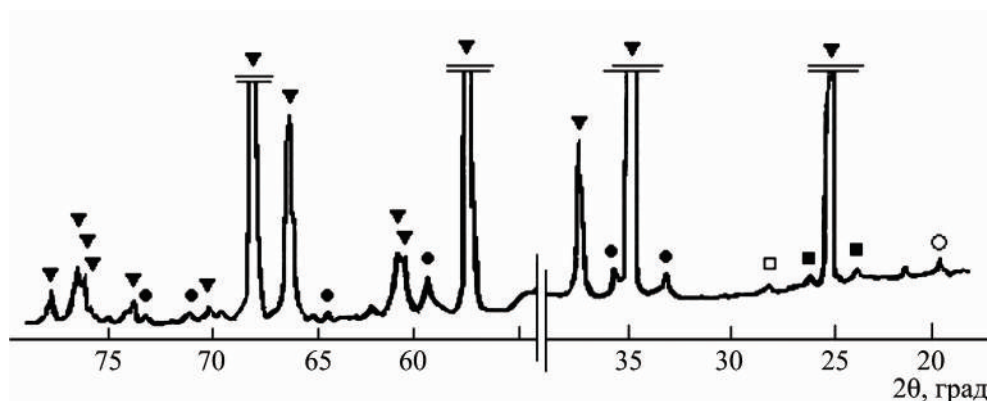


Рис. 1 Phase composition of modified fused corundum after one hour of milling:

▼ – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, ● – $\beta\text{-SiC}$, ○ – Si_2ON_2 , ■ – mullite, □ – Si

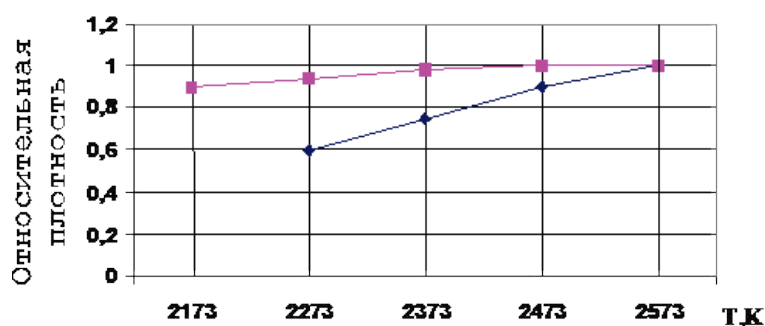


Рис. 2 Зависимость плотности ГП образцов из обычного (●) и модифицированного порошка (■) карбида кремния

Использование модифицированных алкоксидом кремния порошков тугоплавких соединений позволяет получить материалы теоретической плотности при значительно более низких температурах их консолидации (рис 2).

Благодаря наличию созданных при механохимической активации органо-неорганических комплексов $(-\text{CH}_3)-(\text{SiO}_2)_n$, механохимическому синтезу из них наночастиц $\beta\text{-SiC}$ и созданию глобул $\beta\text{-SiC}$ размером 80-30 нм, армирующих керамические матрицы из модифицированных порошков тугоплавких соединений таких как Al_2O_3 , $\alpha\text{-SiC}$, так и из B_4C , приводит к повышению прочности этих материалов при сжатии и трещиностойкости.

При консолидации модифицированных порошков алкоксидом кремния наблюдается самоармирование матриц материалов наночастицами $\beta\text{-SiC}$, создание –интра и –интер наноструктур.

Особенностью структур консолидированных при горячем прессовании материалов из модифицированных порошков является не только самоармирование керамических матриц наночастицами, что приводит к их дисперсионному упрочнению, но и отсутствие силикатных прослоек между зернами модифицированного наполнителя (рис.3).

Свойства горячепрессованной керамики из модифицированных порошков бескислородных соединений представлены в табл. 1.

Как видно из табл.1 показатели свойств горячепрессованных материалов из модифицированного алкоксидом кремния порошка SiC превосходят значения показателей плотности, пористости, прочности, а это обеспечивает более высокие показатели трещиностойкости и твердости при одинаковом значении коэффициента трения при сравнении из свойствами консолидированных материалов из обычного порошка SiC.



Рис.3 Поверхность разрушения горячепрессованного (1850 °С, 30 мин) SiC материала из модифицированного алкоксидом кремния порошка α -SiC 1 – глобулы наночастиц β -SiC, 2 – зерна α -SiC

Таблица 1. Свойства КМ из порошка карбида кремния

Свойства материала	Самосвязанный SiC	ГП из модифицированного порошка SiC	ГП из обычного порошка SiC
Плотность, г/см ³	3,0	3,3	2,92-3,03
Пористость, %	2,5	0	2-5
Предел прочности при изгибе, МПа	220	Не менее 650	Не более 440
K_{1C} , МПа.м ^{0,5}	2,9-4,1	6,2-6,5	Не более 4,4
Твердость, ГПа	9,1-9,6	14,7	10-11
Коэффициент трения	0,15-0,25	0,16	0,16

Исследование процессов горячего прессования с прямым пропусканием высокоамперного тока нанопорошковых смесей частично стабилизированного диоксида циркония ZrO₂- 3 мас.% Y₂O₃ и монокарбида вольфрама WC показали, что оптимальными режимами, обеспечивающими материалу максимальную плотность и механические свойства, являются: T_{сп} = 1300. - 1400 °С, P_{прес} = 30 МПа, t_{сп} = 2 мин.. Исследования микроструктуры полученных композитов ZrO₂- Y₂O₃-WC с содержанием в исходных смесях 10 мас.% и 20 мас.% WC, проведенные при помощи растровой электронной микроскопии., показали разницу как исходных смесей, так и полученных материалов.

На рис.3 видно, что агломераты монокарбида вольфрама со средним размером зерен распределены в «облаке» белой фазы ZrO₂-3 мас.% Y₂O₃. При этом заметно, что внутри агломерированных частичек WC существует некая сцепка, похожая на звенья в цепочке, которые в свою очередь хаотично извиваются. Микроструктура полученная в результате горячего прессования с прямым пропусканием высокоамперного тока при температуре 1350 °С показана на рис.4

Из рисунка 4 можно заметить, что зерна карбида вольфрама в основной массе расположены в виде мельчайших колоний из нанозерен, однако есть крупные агломераты монокарбида вольфрама внутри которой находятся также зерна диоксида циркония. Это наглядно видно на рентгеноспектральном анализе в точке 1.

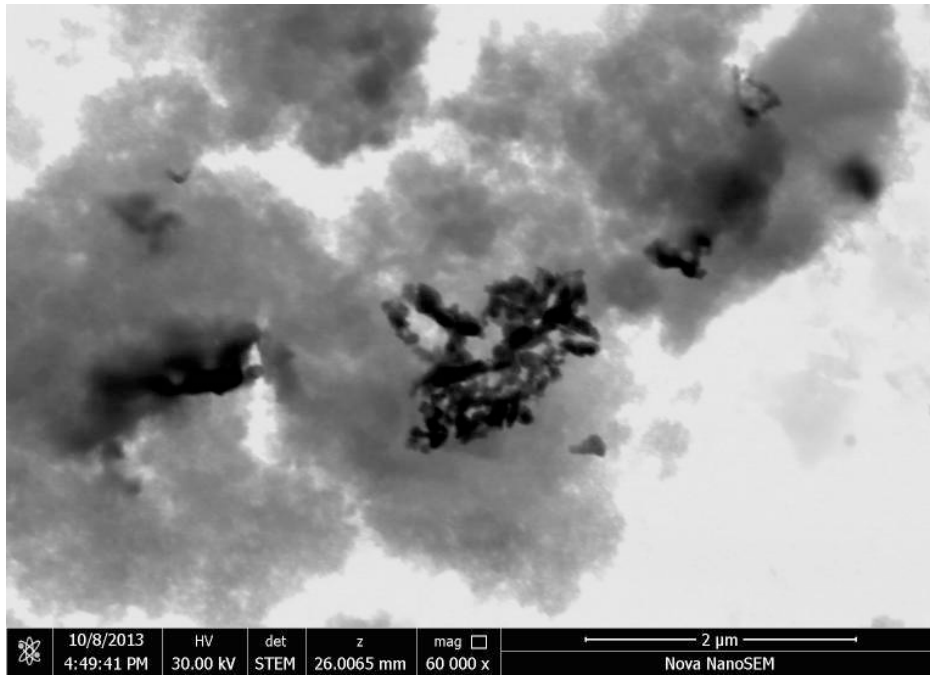


Рис 3. Исходная нанопорошковая смесь ZrO_2 - 3 мас.% Y_2O_3 -10 мас. % WC

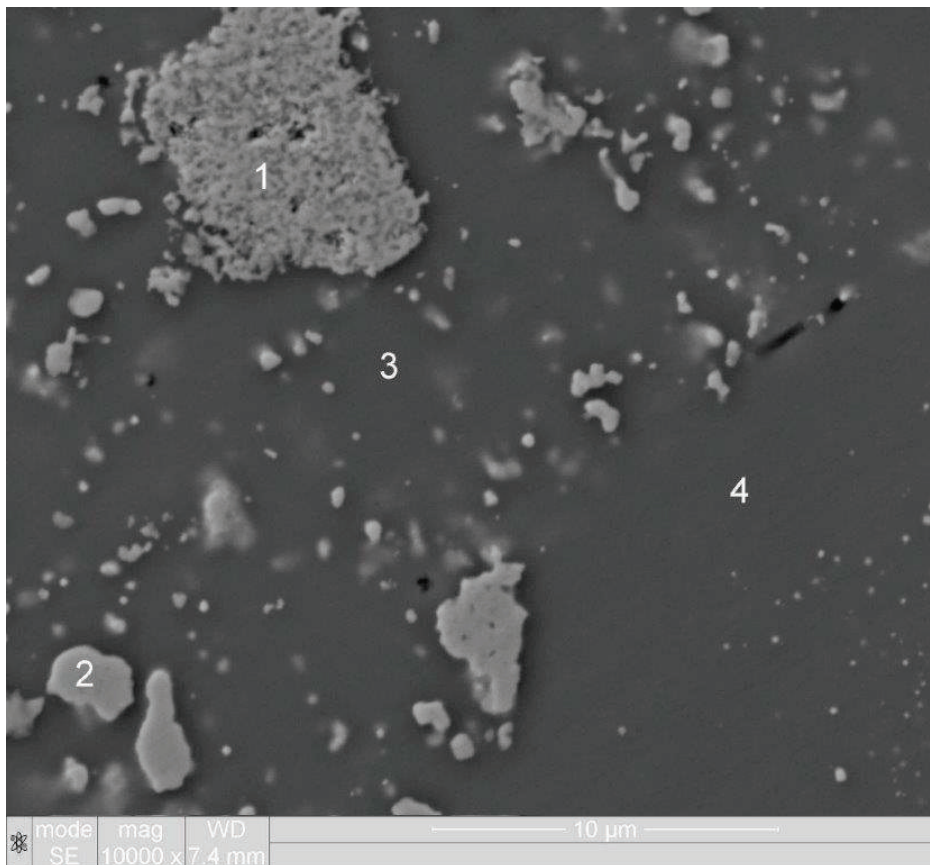


Рис.4 Микроструктура композита ZrO_2 - 3 мас.% Y_2O_3 -10 мас. % WC (спеченного при температуре $T=1350\text{ }^{\circ}C$, $P=30\text{ МПа}$ и времени выдержки 2 мин), $\cdot x\ 10000$

1-WC агломерат, 2-WC – субмикронная частица , 3,4-ZrO₂- 3 мас.% Y_2O_3

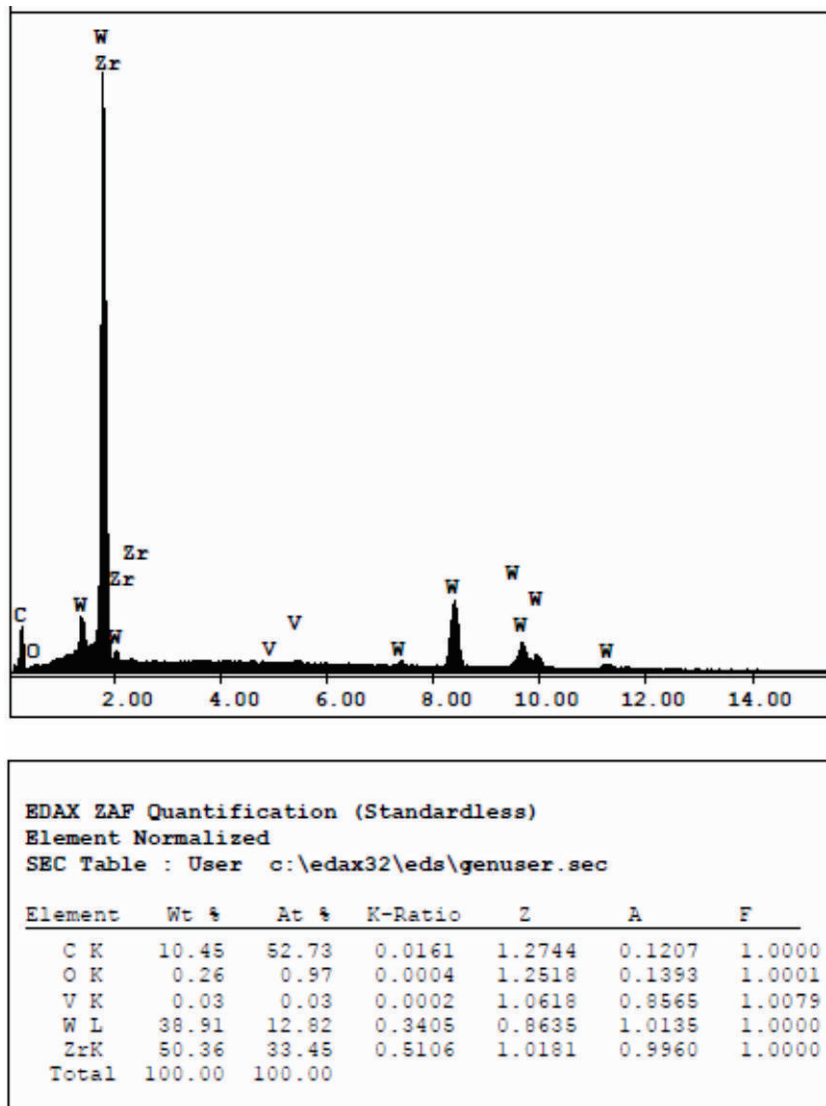


Рис.5 Ренгеноспектральный анализ образца ZrO_2-10 мас.% WC, полученного горячим прессованием при $T=1400^\circ C$

Результаты исследования свойств известной консолидированной керамики $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ и разработанной горячепрессованной $ZrO_2 - Y_2O - 10$ мас.% WC приведены в табл.2

Таблица 2. Свойства горячепрессованной модифицированной циркониевой керамики

Состав материала	Микротвердость, HV	Прочность при сжатии, МПа	Плотность пикнометрическая, $г/см^3$	Плотность относительно теоретической, %
$(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.8}$	1408	2586	6,08	98
$ZrO_2 - Y_2O - 10$ мас.% WC	1650	3200	6,2	99

Из сравнения механических характеристик частично стабилизированного диоксида циркония и разработанного композита на основе диоксида циркония с добавкой 10 мас. % WC видно, что механические свойства последнего заметно возрастают с введением монокарбида вольфрама.

Выводы. Таким образом, механохимический синтез наночастиц β -SiC в нанореакторах из созданного органо-неорганического комплекса $(-\text{CH}_3)(\text{SiO}_2)_n$ при модифицировании порошков тугоплавких наполнителей и углеродистых связей алкоксидом кремния и гелями на его основе позволил создать КМ на основе SiC, B_4C , Si_3N_4 с прочностью при изгибе не менее 650 МПа и трещиностойкостью $6,5-7,9 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, а также высокостойкие к окислению и шлакоустойчивые периклазоуглеродистые материалы.

Методом горячего прессования (1200-1400 °С, скорость подъема температуры 400 градусов/мин) также синтезирован наноматериал $\text{ZrO}_2\text{-WC}$ из смеси нанопорошков WC и ZrO_2 путем терморазложения циркониевых солей. Добавки нанопорошков монокарбида вольфрама к частично стабилизированному диоксиду циркония приводят к повышению микротвердости и прочности, что, по-видимому, объясняется повышением прочности на межфазных границах и мелкозернистой структурой полученных образцов. Образцы из разработанного материала имели прочность при изгибе 250-300 МПа, трещиностойкость $10-15 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, твердость 22-24 ГПа, теплопроводность 30-35 Вт/м К. Из проведенных исследований следует, что добавки нанопорошков монокарбида вольфрама к частично стабилизированному диоксиду циркония приводят к повышению микротвердости и прочности, что, по-видимому, объясняется повышением прочности на межфазных границах и мелкозернистой структурой полученных образцов.

Созданные гибридные органо-неорганические композиты на основе кальцийфосфатной матрицы, самоармированной кристаллами периклаза, нанопропрочняются в 3-4,5 раза, значительно повышая свои эксплуатационные характеристики

Литература

1. D.Sherman *Mechanical Properties of hard materials and their relation to microstructure* / D.Sherman, D.Brandon // *Advanced Engineering Materials*, 1999. – Vol. 1. – № 3-4. – P. 161–181.
2. Yuan Z. X. *Preparation of Y2O3-coated ZrO2 powder by suspension drying* / Z. X Yuan, J.Vleugels, Biest O. Van Der // *J. Mater. Scien. Let.*, 2000.- Vol. 19.- №5.- P. 359-361.
3. Шевченко В.Я. *Техническая керамика* / В.Я Шевченко, С.М. Баринов.- М.: Наука, 1993.- 192 с.
4. Баринов С.М. *Прочность технической керамики* / С.М Баринов, В.Я. Шевченко. - М.: Наука, 1996.- 157 с.
5. Семченко Г.Д. *Термодинамическое исследование возможности низкотемпературного синтеза SiC в системе Si-O2-C* / Г.Д.Семченко, И.Ю.Шутеева, М.А. Куценко [и др.] // *Современные проблемы термодинамики и теплофизики: Всероссийская конференция, 1-3 декабря 2009 г.: тезисы докладов.*- Новосибирск, 2009.- С. 187.
6. Семченко Г.Д. *Конструкционная керамика и огнеупоры* / Г.Д. Семченко.-Харьков: Штрих, 2000.- 304 с.
7. Семченко Г.Д. *Корундовые покрытия для высокотемпературной защиты графита от окисления* / Г.Д.Семченко, И.Ю.Шутеева, О.Н.Борисенко.- Харьков: Радуга, 2011.- 204 с.
8. Семченко Г.Д. *Золь-гель процесс в технологии керамики* / Г.Д. Семченко.-Харьков: БИ, 1997.- 144 с.
9. Семченко Г.Д. *Проверено огнем и временем* / Г.Д.Семченко / Харьков: Радуга, 2013.- 380 с.
10. Patent № 72841, Ukraine. *Device for hot pressing of powders by means of direct transmission of electric current.*/ Azarenkov M.O., Gevorkyan E.S., Lytovchenko S.V., Chyshkala V.O., Tymofeyeva L.A., Melnyk O.M., Gutsalenko Yu.G.; applicant for a patent and patent owner is Gevorkyan E.S. - №U 2012 03 031; application 15.03.12; published on 27.08.12, bulletin N 16.

©Г.Д. Семченко Е.С.Геворкян.

УДК 620.197

Г.Д. Семченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

Е.С.Геворкян.

Українська державна академія залізничного транспорту

ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ И КОНСОЛИДОВАНІ НАНОМАТЕРИАЛИ ІЗ ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

В роботі представлені результати створення консолідованих наноматеріалів і композиційною кераміки з використанням вищевказаних особливостей для синтезу прекурсорів порошків і заданих фаз, самоарміруючих керамічні матриці.

Ключові слова: *наноматеріали консолідовані, композити органічні, композити неорганічні.*

UDC 620,197

GD Semchenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

E.S.Gevorkyan.

Ukrainian State Academy of Railway Transport

ORGANIC-INORGANIC COMPOSITES AND NANOMATERIALS CONSOLIDATED SPECIFIED PROPERTIES

The paper presents the results of creating consolidated nanomaterials and composite ceramics with the above features for the synthesis of precursor powders and defined phases samoarmiruyuschih ceramic matrix.

Keywords: *nanomaterials consolidated, organic composites, inorganic composites.*

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ СКОРОЧЕННЯ РЕСУРСУ ОПОР КОВЗАННЯ РОТОРНИХ МАШИН ВІД ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ

Проведено розрахунок величини додаткових навантажень від дії неконтрольованих експлуатаційних дефектів. Зроблено аналіз впливу робочих навантажень, статичної та динамічної невірноваженості робочого органу на ресурсні характеристики опор машини.

Ключові слова: опора ротору, аналіз, навантаження.

Вступ. Стаціонарні роторні машини (СРМ) знаходять широке застосування в самих різних галузях та об'єднують великий клас пристроїв (насоси, генератори, вентилятори, турбіни, двигуни, компресори та ін.), призначених для перетворення енергії та здійснення корисної роботи. Невід'ємним елементом будь-якого агрегату є роторна система, роторно-опорний вузол. Слід зазначити, що роторно-опорний вузол, різко обмежує надійність і ресурс СРМ через недослідженість впливу створеного експлуатаційним дефектами динамічного розцентрування, рівень навантаження вузла, як найбільш відповідального елемента конструкції. [1]

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Велика кількість досліджень і публікацій, обумовлена тенденцією збільшення швидкостей і навантажень СРМ, вдосконалення їх конструкцій, застосуванням нових мастильних матеріалів і, як наслідок, необхідністю вивчення процесів спрацювання, накопичення пошкоджень, дефектів, що мають помітний вплив на експлуатаційні властивості працездатність агрегату, а також розробкою методів їх виявлення, аналізу та запобігання досягнення граничних станів. Створення математичних моделей для визначення експлуатаційних властивостей роторно-опорного вузла, повністю адекватних реальному об'єкту, представляє значні труднощі з огляду величезного числа факторів, що вимагають їх врахування. У зв'язку з цим, в дослідженнях є теоретична тенденція, це власне динаміка роторів, задача якої є вивчення руху і стійкості роторів. В цьому випадку в описі роторної системи визначальну роль відводиться факторам, які належать безпосередньо до ротора як твердого, в тому числі деформівного тіла з пружними і інерційними властивостями, а вплив опор зводиться до лінеаризованих реакціям їх мастильних шарів. При цьому найбільш впливовішою групою факторів, на його стан, є експлуатаційні, такі як, зміна параметрів монтажу та налагодження умов центрування, зміна під впливом часу та виробничих умов пружно - деформівних характеристик опор обладнання, зміна умов динамічної рівноваги СРМ, робота обладнання в умовах, які не відповідають області використання, несвоєчасне проведення технічного обслуговування, невідповідність режиму навантаження технічним вимогам документації та інше [2]. Стверджується, що від надійної й безаварійної роботи стаціонарного обладнання в значній мірі залежать продуктивність праці, безпека виробничих процесів, економічні показники виробництва.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Встановлено виняткову суттєвість впливу технічного стану стаціонарних роторних машин на ефективність їх використання, та недостатню дослідженість закономірностей формування, зростання, експлуатаційних навантажень при наявності та розвитку дефектів технічного стану СРМ, недостатню вивченість впливу додаткових навантажень, а особливо рівня динамічного роз-

центрування агрегатів, на ресурсні характеристики та безвідмовність СРМ. Головною метою проведення досліджень є забезпечення стійкої роботи роторної машини, з врахування впливу експлуатаційних дефектів на характер і рівень навантаження, величину скорочення ресурсу опор ковзання СРМ.

Постановка завдання. Факти скорочення ресурсу підшипникових опор СРМ від дії експлуатаційних факторів обумовлюють задачу теоретичного пояснення процесів їх спрацювання. Необхідно дослідити зміну стану механізму в залежності від дії неконтрольованих експлуатаційних факторів та зробити аналіз впливу робочих навантажень, статичної та динамічної неврівноваженості робочого органу на ресурсні характеристики опор машини, та засобами математичного моделювання встановити вагомість впливу динамічного розцентрування на ступінь скорочення ресурсу опор машини.

Основний матеріал і результати. Аналіз проведених досліджень показав низьке значення ресурсних характеристик СРМ, що вимагає дослідження причин і факторів, що їх обумовлюють. З цією метою проведено аналіз та дослідження коефіцієнту відмов для більшості СРМ. В результаті статистичного аналізу по величині коефіцієнта відмов встановлено, що під дією експлуатаційних факторів виникає додаткове неконтрольоване навантаження на опорах конструкції, що призводить до зниження працездатності та скорочення ресурсу машини. [3]

Серед процесів втрати працездатності, що погіршують ресурсні характеристики, переважають процеси накопичення пошкоджень у виді механічного, абразивного та втомного зношення опор роторів, робочих поверхонь роторів та корпусів СРМ. Відповідно до класичної теорії зношення інтенсивність спрацювання робочої поверхні опори пропорційна питомому навантаженню p , яке має тенденцію неконтрольованого зростання від дії динамічної неврівноваженості та динамічного розцентрування, і відносній швидкості руху поверхонь v , що утворюють пару тертя:

$$\lambda = kp^m v^n \quad (1)$$

З врахуванням характеру впливу названих факторів та задач, потрібно з'ясувати відповідність експлуатаційних навантажень на опори СРМ їх проектним значенням. Дopusкаючи, що умови проектування, виготовлення, експлуатації дотримані, при використанні за призначенням, зростає вплив факторів спрацювання, які обумовлюють наявність радіального відхилення осі опор щодо головної центральної осі інерції ротора.

Нехтуючи пружними реакціями ротора можна розглядати паралельний зсув осі такого ротора щодо його головної центральної осі інерції, як суму дефектів статичного центрування та дефектів опор. В першому випадку при розвитку дефектів статичної неврівноваженості робочого органу від експлуатаційного зростання зазорів у підшипникових вузлах абсолютно жорсткі опори примушують ротор обертатися вже навколо іншої осі ротора, не співпадаючої з його головною центральною віссю інерції. Внаслідок цього ротор стане в загальному випадку статично неврівноваженим, тобто порушується умова (2) і (3), яка характеризується рівністю нулю суми всіх неврівноважених сил і суми всіх моментів цих сил [3].

$$\sum \bar{F}_i = \sum m_i \cdot \bar{r}_i \cdot \omega^2 \quad m_{\text{рот}} \cdot \bar{e}_{\text{см}} \cdot \omega^2 = 0 \quad (2)$$

$$\sum \bar{M}_i = \sum [\bar{l}_i \cdot \bar{F}_i] = \sum [\bar{l}_i \cdot \bar{r}_i] \cdot \omega^2 = 0 \quad (3)$$

де \bar{r}_i - ексцентриситет i -ї маси m ; ω - частота власних кутових коливань ротора; $m_{\text{рот}}$ - маса ротора; l - відстань між опорами; \bar{F}_i - додаткова сила, що виникає від дії дисбалансу.

У разі збільшення ступеню неврівноваженості на опори діють додаткові сили:

$$\sum \bar{F}_i = m_{\text{рот}} \cdot \bar{e}_{\text{см}} \cdot \omega^2 \neq 0 \quad (4)$$

В експлуатації СРМ регламентовані значення $e_{ст}$, практично завжди перевищенні, через що виникають додаткові динамічні навантаження від дії дисбалансів ротора, і як наслідок, відбувається зменшення терміну служби підшипникових опор в s разів.

$$s = \left(\frac{e_{cm\ дод} \cdot m_{ром} \cdot \omega^2}{2 \sum Q_{AB}} + 1 \right)^{3.33} = \left(\frac{K}{2} + 1 \right)^{3.33} \quad (5)$$

Цей висновок пояснює різке скорочення ресурсу підшипникових опор СРМ, але тільки в випадку з симетричним навантаженням опор.

Для визначення додаткових сил від ефекту статичної невірноваженості, що діють на опори використовують поняття головний вектор дисбалансів ротора шляхом ділення рівняння (4) на ω^2 тоді:

$$\frac{\sum \bar{F}_i}{\omega^2} = \sum \bar{D}_i = m_{ром} \cdot \bar{e}_{cm} = \bar{D}_{cm} \neq 0 \quad (6)$$

де \bar{D}_{cm} - головний вектор дисбалансів ротора;

Для дослідження впливу додаткових навантажень на ресурс опор СРМ припустимо, що незбалансований абсолютно твердий ротор обертається з постійною кутовою швидкістю ω навколо горизонтальної осі на двох абсолютно жорстких опорах. Ці опори A і B сприймають постійні по величині і напрямку сили:

$$\bar{Q}_{AB} = \bar{G}_{AB} + \bar{P}_{AB} \quad (7)$$

\bar{G} - сума вагового навантаження на опору;

\bar{P} - радіальний компонент від робочих коліс і невірноважені сили від дисбалансів ротора $\bar{D}_{AB} \omega^2$ в площинах опор A і B , постійні по величині, але змінні по напрямку, оскільки вектори сил $\bar{D}_{AB} \omega^2$ обертаються разом з ротором.

Для ротора з абсолютно твердого матеріалу і при абсолютно жорстких опорах це приведе до коливання його цапф з частотою обертання ротора щодо геометричних центрів підшипників. У зв'язку з тим, що зростання додаткових навантажень викликають непропорційну інтенсивність спрацювання розглянемо співвідношення, яке називається коефіцієнтом дисбалансу для відповідних опор A і B .

$$\frac{D_{AB} \omega^2}{Q_{AB}} = K_{AB} \quad (8)$$

При цих умовах зменшення терміну служби підшипникових опор в s разів відповідно виразу (5) може мати різні значення в залежності від значення коефіцієнту дисбалансу.

Коли $K_{AB} < 1$, підшипники працюють по першому режиму навантаження. При такому K_{AB} ротор з абсолютно твердого матеріалу обертається навколо своєї осі і вектори невірноважених (динамічних) сил в опорах $\bar{D}_{AB} \omega^2$ обертаються разом з ним. Завдяки цьому сумарний вектор \bar{R}_{AB} сил, що діють на опору, змінюватиметься, наприклад, при $K_{AB} = 0,5$ в інтервалі $0,5 \bar{Q}_{AB} < \bar{R}_{AB} < 1,5 \bar{Q}_{AB}$ з частотою обертання ротора. Це викличе розгойдування цапфи з частотою обертання ротора в межах кута 2α гойдань вектора \bar{R}_{AB} (рис. 1). При коефіцієнті дисбалансу $K_{AB} < 1$ відбувається одностороннє зношення підшипника і рівномірне по колу зношення цапфи.

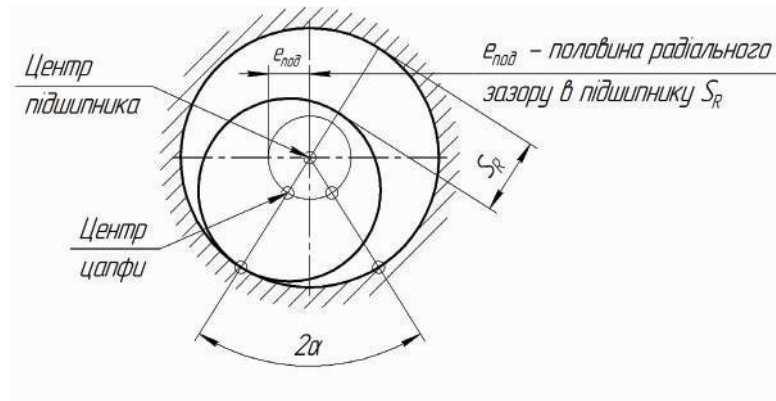


Рис. 1. Характер спрацювання підшипника ковзання при коефіцієнті дисбалансу $K_{AB} < 1$

Еквівалентні навантаження на підшипники з урахуванням дії дисбалансів в опорах для певної кутової швидкості обертання ω ротора визначаються так:

$$Q_{AB \text{ макс}} - Q_{AB \text{ мин}} = 2D_{AB}\omega^2$$

$$Q_{A,B \text{ экв}} = Q_{A,B \text{ мин}} + 2 \cdot 0,75D_{A,B}\omega^2 = Q_{A,B \text{ мин}} + 1,5D_{A,B}\omega^2 \quad (9)$$

що перевищує $Q_{A,B} = Q_{A,B \text{ мин}} + D_{A,B}\omega^2$ на $0,5D_{A,B}\omega^2$.

Збільшення навантаження $0,5D_{A,B}\omega^2$, скоротить термін служби підшипників в s разів, що адекватно збільшенню їх навантаження в $s^{0,3}$ разу. Отже, в силу (6):

$$\sum Q_{A,B \text{ экв}} = s^{0,3} \sum Q_{A,B} + \sum Q_{A,B} + 0,5D_{A,B}\omega^2 \quad (10)$$

Прийнявши середнє значення коефіцієнта дисбалансу ротора $K = \frac{e_{cm} m_{ром} \omega^2}{\sum Q_{A,B}}$, знайдемо з (7), що $K = 2(s^{0,3} - 1)$.

Скорочення ресурсу опори ковзання роторної машини знаходиться в математичній залежності від коефіцієнту дисбалансу, що дає можливість розрахувати ступінь скорочення для встановленого в процесі експлуатації коефіцієнту дисбалансу i -ї опори.

Висновки. Таким чином, представлено розрахунок режимів навантаження для підшипників ковзання, визначено величину скорочення ресурсу опор ковзання роторних машин від впливу експлуатаційних дефектів. Встановлено математичну залежність між коефіцієнтом дисбалансу та ступенем скорочення ресурсу опори ковзання роторної машини. На підставі діагностичного моніторингу навантажень, впродовж експлуатації, відбувається уточнення ресурсних характеристик, з метою оперативного запобігання скороченню ресурсу засобами адекватного технічного обслуговування і ремонту «за фактичним станом».

Література:

1. Александров, А.М. Динамика роторов / А.М.Александров, В.В. Филиппов; под. ред. А.И. Кобрин. - М.: Изд-во МЭИ, 1995.- 132 с.
2. Кіяновський М.В., Бондар О.В. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на працездатність гірничого обладнання // Вісник КТУ – Кривий Ріг, 2010р.
3. Савин, Л.А. Исследование динамики системы "ротор-подшипники скольжения" на основе анализа траекторий движения центра цапфы / Л.А. Савин, О.В. Соломин, Д.Е. Устинов // Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия: Материалы международного научного симпозиума.- Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2000. - С. 239 - 243.

© М.В. Кіяновський, О.В. Бондар

Н.В. Кияновский, д.т.н., профессор

Е.В. Бондарь, старший преподаватель

Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СОКРАЩЕНИЯ РЕСУРСА ОПОР
СКОЛЬЖЕНИЯ РОТОРНЫХ МАШИН ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ**

Проведен расчет величины дополнительных нагрузок от действия неконтролируемых эксплуатационных дефектов. Произведен анализ влияния рабочих нагрузок, статической и динамической неуравновешенности рабочего органа на ресурсные характеристики опор машины.

Ключевые слова: *опора ротора, анализ, нагрузка.*

UDC 621.165:622

N.V. Kiyanovsky, Professor

E.V. Bondar, Senior Lecturer

State institution of higher education « Krivoy Rog National University»

**DETERMINATION OF THE RESOURCE REDUCTION SLIDING
BEARINGS ROTOR MACHINES FROM INFLUENCE OPERATIONAL
DEFECTS**

The calculation of the value of the additional loads from the effects of uncontrolled operational defects. The analysis of the impact of workloads, static and dynamic unbalance working body on resource characteristics of the machine feet.

Keywords: *rotor bearing analysis, load.*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ У БУКСИРНИХ ПРИСТОСУВАННЯХ АВТОМОБІЛІВ

Проведено математичне моделювання динамічних процесів, що виникають у буксирних пристосуваннях автомобілів. У результаті процесів, що протікають у зчпному пристосуванні при буксируванні автомобілів отримано математичну залежність для визначення максимального динамічного зусилля, яку можна застосовувати при проектуванні та розрахунку деталей та вузлів буксирних пристосувань.

Ключові слова: динамічне зусилля, пружні коливання, математичне моделювання.

Стійкість процесів, що протікають при математичному моделюванні, відіграють важливу роль в оцінці характеру динамічного зв'язку режимних параметрів. В свою чергу, задача оцінки поточного та перспективного стану обладнання в динаміці неминуче упирається в необхідності технічного вдосконалення засобів та методів аналізу, які зможуть забезпечити отримання достовірної оперативної інформації безпосередньо від об'єкту математичного моделювання.

Математична модель – це наближений опис будь-якого класу явищ або об'єктів реального світу мовою математики. Основною задачею моделювання є дослідження цих об'єктів та прогнозування результатів майбутніх спостережень. Також математичне моделювання це і метод пізнання навколишнього світу, що дає можливість ним керувати.

Класифікувати моделі можна за різними критеріями. Наприклад, за характером розв'язуваних проблем, моделі можуть бути розділені на функціональні й структурні. У першому випадку всі величини, що характеризують явище або об'єкт, виражаються кількісно. При цьому одні з них розглядаються як незалежні змінні, а інші — як функції від цих величин. Математична модель являє собою систему рівнянь різного типу (диференційних, алгебраїчних, тощо), що встановлюють кількісні залежності між розглянутими величинами. У другому випадку модель характеризує структуру складного об'єкта, що складається з окремих частин, між якими існують певні зв'язки [1].

Постановка проблеми. Математичне моделювання динамічних процесів, що виникають у буксирних пристосуваннях автомобілів є порівняно складною задачею, оскільки воно пов'язане з необхідністю опису руху механічної системи з урахуванням впливу середовища на динаміку машин.

У зв'язку з цим виникає необхідність приймати припущення, які допомагають спростити математичний апарат та скоротити кількість обчислень при розв'язанні рівнянь не порушуючи при цьому заданої точності отримуваних результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Спираючись на досвід, А. А. Яблонського, В. М. Никифорова [5], що накопичений при вирішенні подібних задач, при математичному моделюванні динамічних процесів, що виникають у буксирних пристосуваннях було прийнято такі припущення:

– жорсткість буксирного пристосування прийнято величиною лінійною у всьому діапазоні можливих деформацій;

– автомобіль, який буксирує та автомобіль, якого буксирують прийнято вважати абсолютно твердими тілами певної маси, які не деформуються під час динамічних навантажень;

- опір дороги прийнято величиною сталою, яка в процесі руху не змінюється і залежить від типу дорожнього покриття;
- враховуючи невелику швидкість руху обох автомобілів при буксируванні опором повітря нехтуємо.

Мета дослідження. Математичне моделювання динамічних процесів, що виникають у буксирних пристосуваннях автомобілів.

Основні матеріали досліджень. Пружні коливання, які виникають при динамічному навантаженні будь-якого механізму машини значно відрізняються від статичних та інерційних за величиною й характером зміни. Знання дійсного характеру навантаження механізмів дозволяє виготовляти надійні конструкції машин зі значним збереженням матеріалу, а при експлуатації досягти найбільшої продуктивності за рахунок обґрунтованого використання резервів міцності й потужності.

Зчіпні буксирні пристосування автомобілів являють собою пружні елементи в яких при буксируванні автомобілів виникають коливальні процеси, які супроводжуються динамічними навантаженнями.

Динамічне зусилля у зчіпному буксирному пристосуванні автомобілів визначають за формулою [4]

$$P_0 = c \cdot f, \quad (1)$$

де c – жорсткість пружного елемента буксирного пристосування;

f – видовження зчіпного буксирного пристосування при навантаженні.

Розглянемо динамічні навантаження в двохмасовій системі лінійною жорсткістю C та масами M_1 і M_2 , на які діють сила тяги автомобіля P та сила опору F [2]. Пристосування для буксирування автомобілів являє собою пружну ланку, яка з'єднує між собою дві маси M_1 і M_2 . Під впливом зовнішніх сил в неусталений період у пружній системі виникають коливальні процеси, в результаті яких у пружному елементі виникають динамічні навантаження.

Розрахункову схему буксирування автомобіля представимо у вигляді двохмасової коливальної системи, яка представлена на рисунку 1.

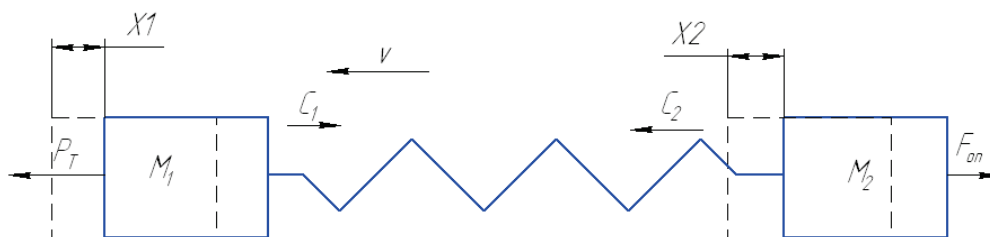


Рисунок 1 – Розрахункова схема двохмасової коливальної системи

Вісь x направимо по ходу руху автомобілів.

Тоді до першої маси M_1 (автомобіль – буксир) будуть прикладені такі сили:

P_T – сила тяги автомобіля – буксира;

$F_{ПР}$ – сила пружності у пристосуванні для буксирування.

До другої маси M_2 (автомобіль якого буксирують) прикладені сили:

$F_{ПР}$ – сила пружності у пристосуванні для буксирування;

$F_{ОП}$ – сила опору коченню.

У ряді випадків при розрахунках тягово-швидкісних властивостей автомобіля доцільно розглядати спільно опір коченню й опір підйому, рештою сил опору можна знехтувати. Сума цих опорів називається опором дороги.

Кожна із мас M_1 і M_2 у будь-який момент часу може мати різні положення. Отже дана система має два ступені вільності, а математична модель руху системи матиме вигляд системи із двох диференціальних рівнянь.

Для складання диференціальних рівнянь руху мас M_1 і M_2 скористаємось принципом Даламбера згідно якого

$$x - m_i \ddot{x} = 0, \quad (2)$$

де x – сума зовнішніх сил, що діють на масу m_i ;

$m_i \ddot{x}$ – сила енергії маси m_i .

Оскільки дана динамічна модель має два ступені вільності то система складатиметься із двох диференціальних рівнянь. Складемо для кожної із мас диференціальні рівняння руху. Отримаємо систему рівнянь у вигляді:

$$\begin{cases} P_T - F_{np} - M_1 \ddot{x}_1 = 0 \\ F_{np} - F_{on} - M_2 \ddot{x}_2 = 0, \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_1 + F_{np} = P_T \\ M_2 \ddot{x}_2 - F_{np} = -F_{on}. \end{cases} \quad (4)$$

Оскільки

$$F_{np} = C(x_1 - x_2), \quad (5)$$

де C – жорсткість пристосування для буксирування;

x_1 – переміщення маси M_1 ;

x_2 – переміщення маси M_2 .

Позначивши взаємне переміщення мас як $x_1 - x_2$, та врахувавши, що сили пружності однакові за модулем та протилежні за знаком і пропорційні жорсткості пристосування, то система рівнянь (4) набуде вигляду

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_1 + C(x_1 - x_2) = P_T \\ M_2 \ddot{x}_2 - C(x_1 - x_2) = -F_{on}. \end{cases} \quad (6)$$

Дана система диференціальних рівнянь є математичною моделлю руху автомобіля-буксира та автомобіля якого буксирують.

Визначення необхідного зусилля для складання дишла методом важеля Жуковського:

Співвідношення між силами, прикладеними до механізму, може бути одержане за допомогою метода Жуковського [6]. Він ґрунтується на теоремі, котра формулюється наступним чином:

Якщо будь-який механізм під дією сил, прикладених до цього механізму, знаходиться у рівновазі, то повернутий на 90° у будь-який бік план швидкостей механізму, розглянутий як жорстка незмінна система, що здатна обертатися навколо полюса і навантажена тими ж силами, прикладеними у відповідних точках плану швидкостей, також знаходиться у рівновазі.

Для спрощення побудови у нашому випадку було повернуто сили прикладені до плану швидкостей.

Оскільки під час застосування даного методу план швидкостей розглядається як жорсткий важіль, що може обертатися навколо полюса, то повернутий на 90° план швидкостей називають "важелем Жуковського" або "жорстким важелем Жуковського". Метод Жуковського може бути застосований для знаходження величини будь-якої сили, якщо точка прикладання та лінія дії сили задані, а також відомі лінії дії, величини та точки прикладання всіх інших сил, що діють на ланки механізму.

На відміну від кінетостатичного розрахунку, за методом Жуковського не може бути визначена величина реакцій кінематичних пар[6]. Але застосування важеля Жуковського є доцільним, коли постає питання визначення однієї (наприклад, зрівноважувальної) сили в декількох положеннях механізму [5].

Для визначення сили яка потрібна для складання дишла, будуємо кінематичну схему підкатного візка який зображено на рисунку 2.

Швидкість точки А може бути визначена за рівнянням

$$\vec{V}_A = \vec{V}_B + \vec{V}_{BA} \quad (7)$$

Останнє рівняння може бути розв'язане графічно шляхом побудови плану швидкостей [3]. Для цього відмічаємо полюс р рисунок 3 і з нього відкладаємо швидкість точки В у вигляді відрізка рb в довільному масштабі, направленою горизонтально швидкості сили F1. З полюсу р проводимо лінію перпендикулярно відрізку АО на якій буде знаходитись поки що невідомий за величиною відрізок ра, з точки b проводимо пряму перпендикулярно відрізку ВА. Бачимо, ці лінії перетинаються. Точка а їх перетину є графічним розв'язком рівняння (7), адже визначає величини швидкості Va.

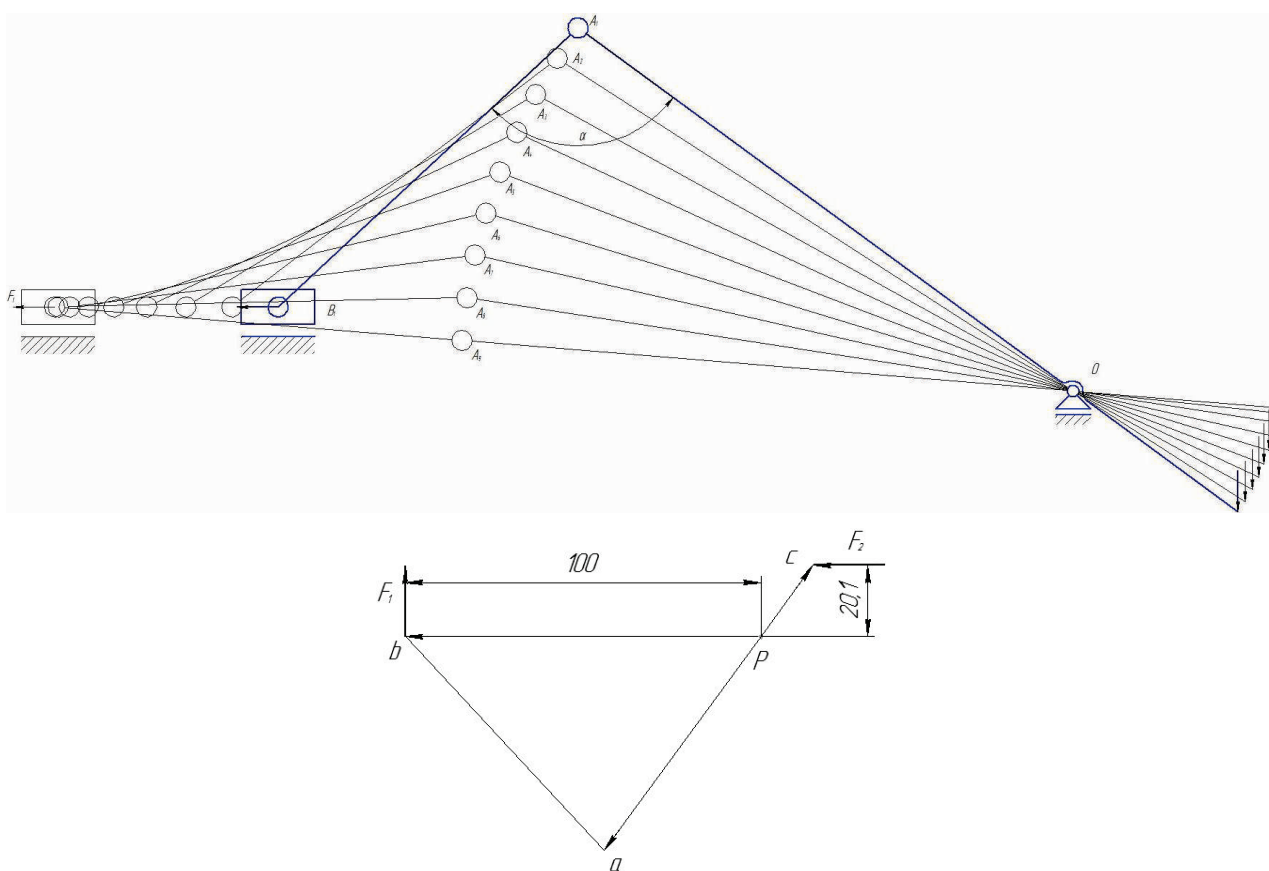


Рисунок 2 – Кінематична схема підкатного візка

$$\vec{V}_C = \vec{V}_A \frac{OC}{OA} \quad (8)$$

Для прикладу наводимо план швидкостей для першого положення, а інші наводимо на листі графічної частини БМіО.501-мМА.005-00.00.000 Н1. Так, як швидкості точок нас не цікавлять, то будуючи план швидкостей, ми будуємо його в довільному масштабі. Та прикладаємо сили повернуті на 90^0 . Визначивши співвідношення плечей визначаємо силу, F_1 , Н

$$F_1 = \frac{F_2 \times h_2}{h_1} \quad (9)$$

де h_1, h_2 відповідно плече першої та другої сил.

Знаходимо силум F_1 , Н

$$F_1 = \frac{8000 \times 20,1}{100} = 1608.$$

Розрахунок проводимо для дев'яти положень дишла. Розрахункові дані наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розрахункові дані

Кут α , градусів	Сила F_1 , Н
100	1608
110	1900
120	2308
130	2859,2
140	3662,4
150	4971,2
160	7544
170	15174,4
180	∞

Так як в останньому положенні дишла сила зростає до безкінечності, то для забезпечення складання дишла запроєтуємо його складання при куті 170° .

За даними таблиці будуємо графік, рисунок 4, залежність сили яку потрібно прикласти від кута складання дишла.

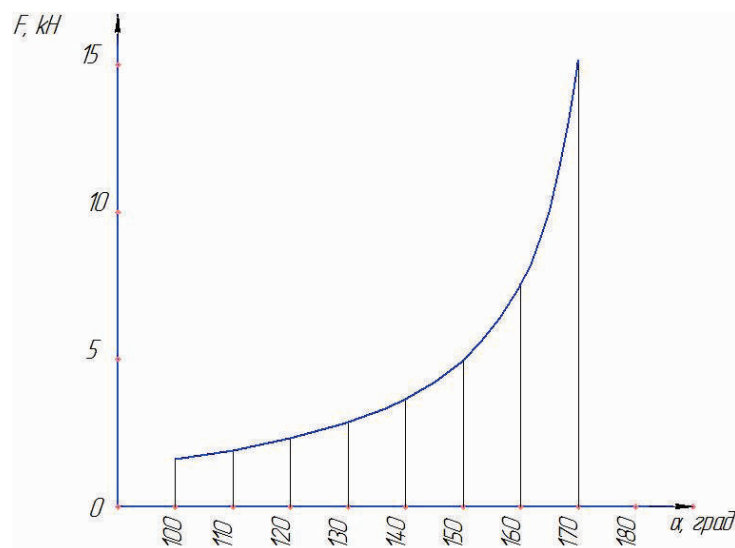


Рисунок 4 – Залежність сили яку потрібно прикласти від кута складання дишла.

Висновок. У результаті математичного моделювання динамічних процесів, що протікають у зчпному пристосуванні при буксируванні автомобілів отримано математичну залежність для визначення максимального динамічного зусилля, яку можна застосовувати при проектуванні та розрахунку деталей та вузлів буксирних пристосувань.

Література

1. *Техническая эксплуатация легковых автомобилей.* Напольский Г.М., Кривенко Е.И., Фролов Ю.Н., Москва «Транспорт» 1975.
2. *Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник.* Лудченко О. К., К.: Знання-Прес, 2003. 511 с.

3. Кореняко А. С. Теория механизмов и машин: учебник / А. С. Кореняко. – К. : Вища шк., 1976. – 438 с.

4. Сердюк Л.И., Жигилий С.М., Осина Л.М. Некоторые подходы к составлению математических моделей вибромашин // Вибрации в технике и технологиях. - 1998. - № 1(5). – С. 52 – 54.

5. Курс теоретической механики: статика. Кинематика. Динамика [Текст] : учеб. / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. - 16-е изд., стереотип. - М. : Кнорус, 2011. - 603 с.

6. Онищенко О. Г., Коробко Б. О., Ващенко К. М. Структура, кінематика та динаміка механізмів : Навчальний посібник. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – 274 с.

© Нижник О.В., Гринькова М.В.

УДК 621.165:622

Нижник О.В., д.т.н., с.н.с.,

Гринькова М.В., аспирант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В БУКСИРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЯХ АВТОМОБИЛЕЙ

Проведено математическое моделирование динамических процессов, возникающих в буксирных приспособлениях автомобилей. В результате этих процессов протекающих в сцепном приспособлении при буксировке автомобилей получена математическая зависимость для определения максимального динамического усилия, которую можно применять при проектировании и расчете деталей и узлов буксирных приспособлений.

Ключевые слова: динамическое усилие, упругие колебания, математическое моделирование.

UDC 621.165:622

Nyzhnyk O.V.

Grynkova M.V.

Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN A CAR TOWING DEVICES

Mathematical modeling of dynamic processes occurring in the towing vehicle devices. As a result of these processes occur in the coupling device for towing vehicles the mathematical relationship to determine the maximum dynamic force that can be applied in the design and calculation of parts and assemblies towing devices.

Keywords: dynamic force, elastic vibrations, mathematical modeling.

В.А. Гайдар, начальник отдела программной обработки
АО «Полтавский турбомеханический завод» концерна «Укрросметалл»,
г. Полтава, Украина

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ КРУГОВОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК НА СТАНКАХ С ЧПУ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ ПОЛУЧИТЬ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЕ ШЛИФОВАНИЮ.

Приведена методика расчета параметров скоростного фрезерования при круговой обработке поверхности турбинной лопатки с качеством позволяющим исключить процесс шлифования. (Указанный режим высокоскоростной механической обработки (HSM - High Speed Machining) рабочих поверхностей турбинных лопаток стал возможным при внедрении в производство прогрессивного инструмента и современных высокопроизводительных станков с ЧПУ.)

Ключевые слова: турбинная лопатка, поверхность, шероховатость, технология, фрезерование, программа, станок, управление.

Введение. Существенное повышение качества фрезерной обработки поверхности турбинной лопатки до уровня шлифования даёт возможность исключить его (шлифование) из общего технологического процесса, что позволит избежать потерь времени, связанных с трудоёмкой работой шлифовщика, а результаты обработки будут выше и по геометрической точности, и с точки зрения качества обработанной поверхности.

Анализ последних исследований и публикаций. За последние годы высокоскоростное фрезерование совершило переворот в методах механообработки. Основными показателями процесса HSM обработки является производительность станков и качество обработки деталей.

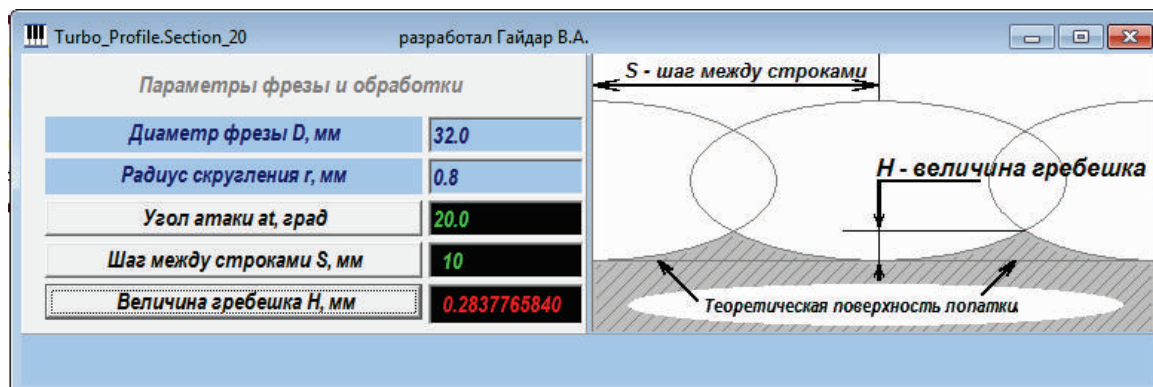


Рис.1а

Для расчета зависимостей между технологическими параметрами концевой фрезы (D, r), угла атаки (α_t) и заданной заранее величине гребешка H по программе «Turbo_Profile.Section_20a» (Рис. 1а) используем уравнения кривых, описывающих следы фрезы в металле при круговом фрезеровании, например, рабочей части турбинной лопатки. В статье [1] автором были получены уравнения таких кривых (1) (кривых Персея) и их производных (2) в параметрической форме:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \left(\frac{D}{2} - r\right) * \cos(t) + \frac{r * \sin(at)}{\sqrt{tg^2(t) + \sin^2(at)}} \\ y(t) = y_0 + \left(\frac{D}{2} - r\right) * \sin(at) * \sin(t) + \frac{r}{\sqrt{1 + \sin^2(at) * ctg^2(t)}} \end{cases} \text{ при } t \in [0, 2\pi], \quad (1)$$

$$\begin{cases} x' = \left(r - \frac{D}{2}\right) * \sin(t) - r * \sin(at) * \left(\frac{1}{\sqrt{tg^2(t) + \sin^2(at)}}\right)^3 * \frac{tg(t)}{\cos^2(t)} \\ y' = \left(r - \frac{D}{2}\right) * \sin(at) * \cos(t) + r * \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2(at) * ctg^2(t)}}\right)^3 * \frac{ctg(t)}{\sin^2(t)} \end{cases} \text{ при } t \in [0, 2\pi] \quad (2)$$

где : D – диаметр фрезы, r – радиус скругления режущей кромки фрезы, at – угол атаки фрезы

t - эксцентрический угол внешней эквидистанты эллипса

x0,y0 – координаты центра фрезы (точка пересечения оси фрезы и плоскости, проходящей через центры окружностей, образованных кромками).

Цель исследований. В работе рассмотрен механизм расчета технологических параметров для HSM обработки, использующихся при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ, с помощью которых получается качество поверхности обработки, соответствующее шлифованию.

Основной материал статьи. При работе с программой “Turbo_Profile.Section_20a”, технолог-программист имеет возможность:

1. Задав параметры фрезы, угол атаки, шаг между строками фрезерования определить соответствующую им шероховатость поверхности H.
2. Определить угол атаки или шаг между строками (для конкретной фрезы) так, чтобы шероховатость поверхности H была определенной величины.

Рассмотрим пример расчета параметров черновой, чистовой и суперфинишной обработки турбинной лопатки.

1. Черновая обработка (концевая фреза со скруглёнными кромками)

Выбираем, например, концевую фрезу с параметрами D=32мм, r=0.8мм (она соответствует нашей задаче по результатам испытаний).

Для наглядности с помощью программы “Turbo_Profile.Section_20a” строим графики зависимостей

между шероховатостью **H** и шагом между строками круговой обработки **S** для некоторых значений угла атаки **at** (Рис.2а).

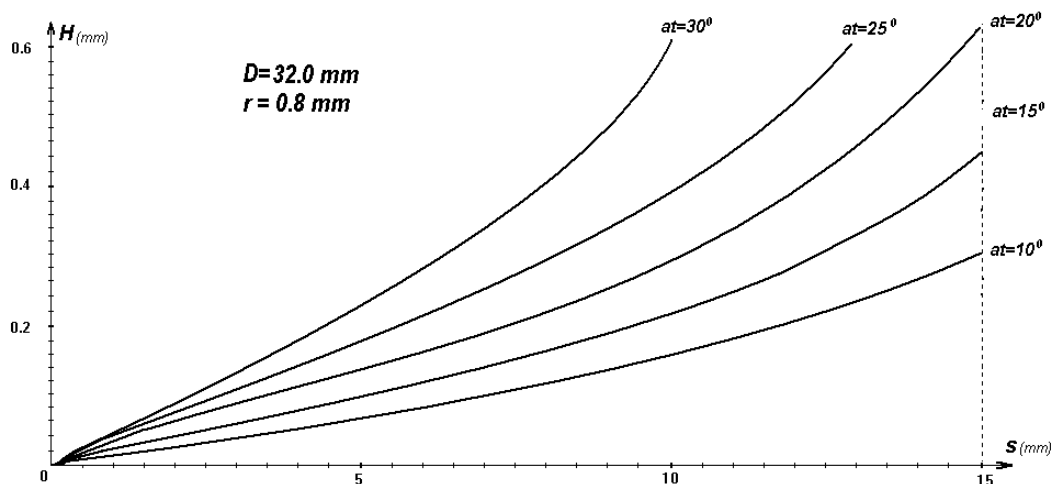


Рис.2а

Выбираем для данной обработки шероховатость, которую нужно получить, например, $H=0.3$ и ,используя параметры фрезы, рассчитываем для данной H по несколько очевидных расчетов по программе “Turbo_Profile.Section_20a”,
 искомые значения параметров : (Рис.1а)
 $at=20$ град. $S=10$ мм и уже более точное значение $H=0.2838$ мм
 Аналогично производится расчет для чистовой и суперфинишной обработки.

2. Чистовая обработка (концевая фреза со скруглёнными кромками)

Выбираем концевую фрезу с параметрами $D=20$ мм, $r=0.8$ мм и производим аналогичные действия.

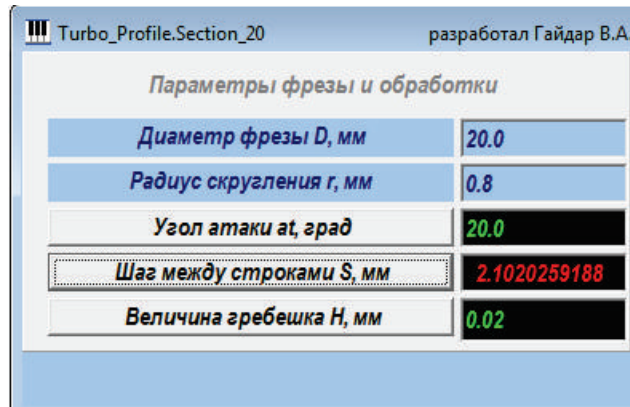


Рис 3

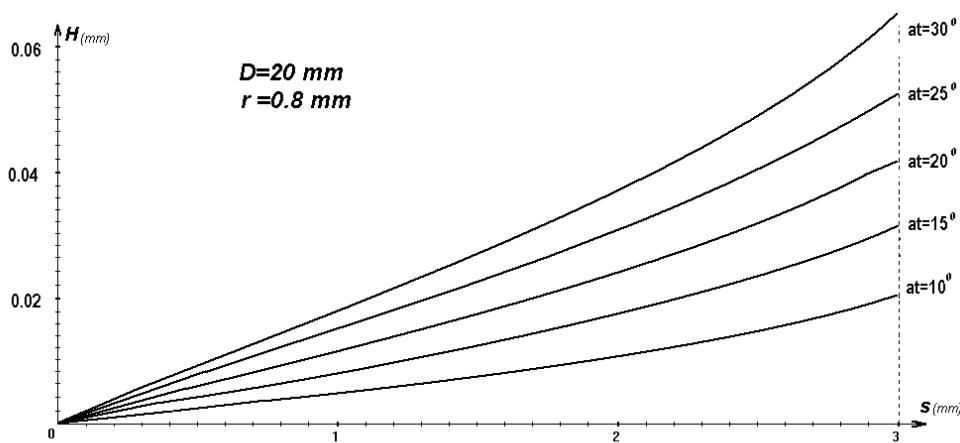


Рис.4

Получаем искомые значения параметров :

$at=20$ град. $S=2.102$ мм и $H=0.02$ мм

3. Суперфинишная обработка (шаровая фреза)

Чистовая обработка, при которой $H < 0.0016$. (Считаем ,что $H=0.0016$ получается после шлифования)

Выбираем шаровую фрезу $D=20$ мм, $r=10$ мм, $at=10$ град и строим только один график, так как H не зависит от at для шаровой фрезы.

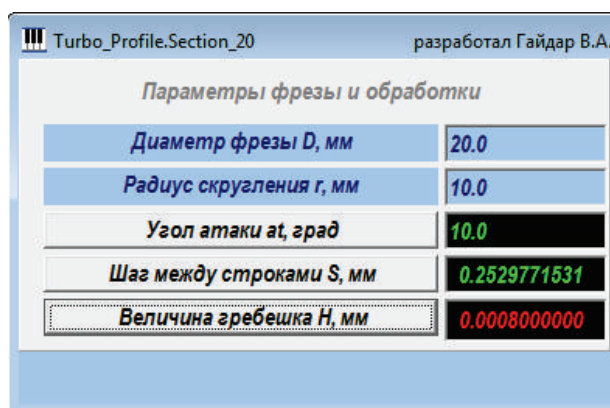


Рис 6

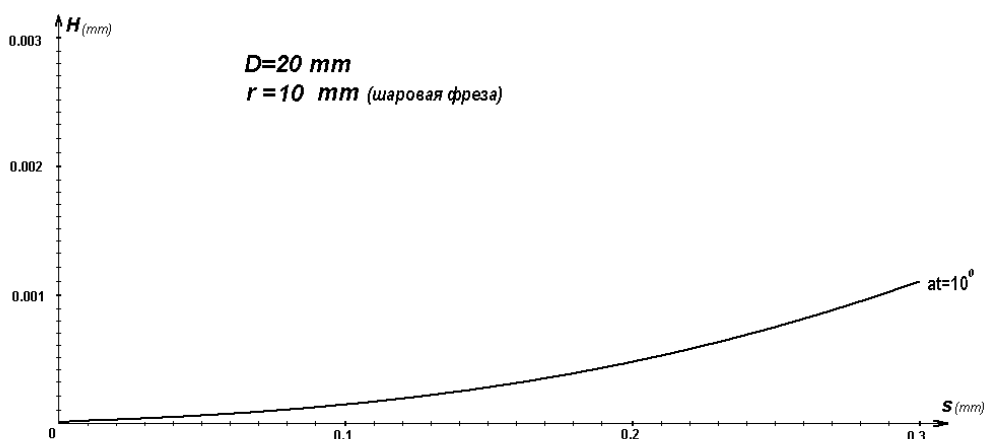


Рис 5

Получаем искомые значения параметров :
 $at=10$ град. $S=0.253$ мм и $H=0.0008$ мм

Очень важно, что при всех расчетах параметров черновой, чистовой и суперфинишной обработки турбинной лопатки сохраняется - "постоянная высота гребешка", что позволяет оптимально задавать режимы резания.

В предложенной методике рассматривается только часть параметров фрезерной обработки (H, at, s, D, r).

Остальные параметры, включая инструмент, относящиеся к режимам резания, подбираются по рекомендациям их фирм-производителей и постоянно совершенствуются.

Выводы.

Предложенная методика расчета параметров для чернового, чистового и суперфинишного фрезерования при круговой обработке поверхностей турбинных лопаток, предоставляет возможность технологю-программисту исключить шлифование из общего технологического процесса без потери качества обрабатываемой поверхности.

Литература

1. Гайдар В. А. Автоматизированный расчет технологических параметров фрезерной обработки турбинных лопаток "Компрессорное и энергетическое машиностроение", 2013. – №3. – с. 51 - 55
2. Савелов А. А. Плоские кривые: Систематика, свойства, применения. М.: Физматгиз, 1960. – 293 с.
3. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989. – 390 с.

4. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Корн Г. и Корн Т. – М.: Наука, 1973.- 408 с.
5. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1973.– 283 с.
6. Пшеничный Б.Н. Численные методы в экстремальных задачах / Б.П.Пшеничный Ю.М.Данилин.– М.: Наука, 1975.- 320 с.

© В.А. Гайдар

УДК 621.914.1

*В.А. Гайдар, начальник відділу програмної обробки
АТ «Полтавський турбомеханічний завод» концерну «Укрросметал»,
м Полтава, Україна*

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ КРУГОВОГО
ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ
ТУРБІННИХ ЛОПАТОК НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК, ЯКЕ ДОЗВОЛЯЄ
ОДЕРЖАТИ ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ, ЩО ВІДПОВІДАЄ ШЛІФУВАННЮ.**

Наведена методика розрахунку параметрів швидкісного фрезерування при круговій обробці поверхні турбінної лопатки з якістю, що дозволяє виключити

Процес шліфування. (Вказаний режим високошвидкісної механічної обробки (HSM - High Speed Machining) робочих поверхонь турбінних лопаток став можливим при впровадженні у виробництво прогресивного інструмента та сучасних високопродуктивних верстатів з ЧПК.)

Ключові слова: турбінна лопатка, поверхня, шорсткість, технологія, фрезерування, програма, верстат, управління.

UDC 621.914.1

*VA Gaidar, head of software processing
JSC "Poltava Turbomechanical Plant" concern "Ukrrosmetall"
Poltava, Ukraine*

**CALCULATION OF PARAMETERS FOR CIRCULAR HIGH-SPEED
MILLING WORKING SURFACE OF TURBINE BLADES ON CNC
MACHINES, YIELDS ACCEPTABLE SURFACE CORRESPONDING
GRINDING.**

The design procedure of parameters of high-speed milling is resulted at circular processing of a surface of a turbine shovel with quality allowing to exclude grinding process. (The specified mode of high-speed machining (HSM - High Speed Machining) working surfaces of turbine shovels became possible at introduction in manufacture of the progressive tool and modern high-efficiency machine tools with CNC.)

Keywords: the turbine shoulder-blade, surface, roughness, technology, milling, program, machine-tool, management.

<i>Автор</i>	<i>стор.</i>	<i>Автор</i>	<i>стор.</i>
Аврамчук С.К.	252	Кравченко С.А.	220
Алиев А.И.	27	Кравченко С.И.	3
Андрієнко В.О.	233	Куліков І.П.	259
Антонюк В.С.	233, 252	Кухарь В.В.	326
Багров В.А.	333	Кухарь В.В.	81
Баланюк А.В.	131	Лагода А.Н.	345
Барандич К.С.	228	Литвин С.М.	185
Берднікова А.Л.	287	Логоминов В.А.	57
Білоконь С.О.	233	Манжос Ю.С.	287
Бобер М.В.	252	Манзюк В.М.	185
Бондар О.В.	372	Мельник В.О.	73
Бондарь О.В.	15	Мехнін Д.С.	172
Бородій Ю. П.	139, 147	Міськов В.П.	66
Ваниев Э.Р.,	27	Мовшович И.Я.	358, 377
Васильєв А.В. .	198, 206	Морнева М.О.	239
Васильченко Т.А.	89	Мороз М.М.	156
Вислоух С.П.	228	Мосъпан Д.В.	32
Вихованець І.В.	113	Наумова Е.А.	165
Волкогон В.М.	252	Николенко Л.В.	306
Воронин А.В.	165	Николенко Р.С.	326
Гайдар В.А.	383	Носенко О.Г.	3
Геворкян Э.С.	364	Оконченко І.В.	22
Головченко Я.О.	245	Олександренко Я.С.	259
Гончар Н.В.	178	Охріменко О.А.	22
Горностаї В.М.	108	Павленко В.Н.	19
Дерябкина Е.С.	301	Павлова А.А.	345
Доброскок В.Л.	266	Панчук А. Г.	73
Драгобецкий В.В.	165	Панчук В. Г.	73
Загорянский В.Г.	32	Петренко А.М.	314
Зейниев Т.Г.	48	Пижов І.М.	351
Ізотова К.О.	102	Пирнат А.М.	10
Іскович-Лотоцький Р.Д.	66	Повстяна Ю.С.	192
Калашников А.В.	213	Попов С.В. .	198, 206
Калашникова І.А.	213	Постернак А.А.	220
Калін М.А.	102	Пузырь Р.Г.	165
Калюжний В.Л.	108, 113	Равська Н.С.	22
Кіяновський М.В.	372	Резниченко Е.Н.	306
Клименко В.Г.	351	Резниченко Н.К.	306, 358, 377
Коваленко І.В.	340	Романенков Ю.А.	48
Кондратюк Е.В.	178	Рудь В.Д.	44, 192
Костюк А.И.	220	Сабол С.Ф.	172
Котляр Д.А.	252	Самчук Л.М.	192

<i>Семченко Г.Д.</i>	364	<i>Хоменко І.В.</i>	198
<i>Сергеев В.В</i>	44	<i>Хорольский В.Л.</i>	318
<i>Сердюк А.И.</i>	40	<i>Храпаций С.В.</i>	233
<i>Симинченко И.П.</i>	270	<i>Черная Ю.А.</i>	301
<i>Сошко В.А.</i>	270	<i>Чувільов Є.Ю.</i>	113
<i>Степанов Д.Н.</i>	178	<i>Шаповал А.А.</i>	32
<i>Столевич И.А.</i>	220	<i>Шиберко В.В.</i>	44
<i>Тимошенко І.В.</i>	206	<i>Шпилька А.М.</i>	266
<i>Федоран Ю.О.</i>	252	<i>Явтушенко А.В.</i>	89, 95
<i>Фролов Е.А.</i>	358	<i>Якубов Ч.Ф.</i>	27
<i>Фролов Е.А.</i>	3, 10	<i>Ясько С.Г.</i>	10

ЗМІСТ

<i>Е.А. Фролов, С.И. Кравченко, О.Г. Носенко</i> ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ	3
<i>Е.А. Фролов, С.Г. Ясько, А.М. Пирнат</i> СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЙ ОСНАТКИ ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ (ГПС).....	10
<i>О.В. Бондарь</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СБОРОЧНО-СВАРОЧНОЙ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ	15
<i>В.Н. Павленко</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗОВЫХ ПЛИТ ШТАМПОВОЙ ОСНАТКИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	19
<i>Н.С. Равська, О.А. Охріменко, І.В. Оконченко</i> УМОВИ НЕПІДРІЗАННЯ ПРОФІЛЮ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ УТВОРЕНОЮ ДИСКОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ ПРЯМОЛІНІЙНОЇ ФОРМИ	22
<i>Э.Р. Ваниев, Ч.Ф. Якубов, А.И. Алиев</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРИРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА.....	27
<i>В.Г. Загорянский, А.А. Шаповал, Д.В. Мосьпан</i> АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ЛИСТОВ ПЛАКИРУЮЩИМ СЛОЕМ ВНУТРЬ	32
<i>А.И. Сердюк</i> ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ В СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР – БАК-АККУМУЛЯТОР.....	40
<i>В.Д. Рудь, В.В. Шиберко, В.В. Сергеев</i> ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ ПОРОШКІВ.....	44
<i>Ю.А. Романенков, Т.Г. Зейниев</i> МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МОДЕЛИ БРАУНА НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ	48
<i>В.А. Логоминов</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ	57
<i>Р.Д. Іскович-Лотоцький, В.П. Міський</i> ВІБРАЦІЙНЕ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКІВ ВІБРОПРЕС-МОЛОТОМ З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ КЕРУВАННЯМ.....	66
<i>В. Г. Панчук, А. Г. Панчук, В.О. Мельник</i> МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНІ ПРИРОДНОГО ЗНОСУ ФІЛЬЄРИ МУНДШТУКА ПРЕСА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ	73
<i>В.В. Кухарь</i> МАЛОУТХОДНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ШТАМПОВКА МЕДНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОКОВОК.....	81
<i>А.В. Явтушенко, А.В. Явтушенко, Т.А. Васильченко</i> АНАЛИТИЧЕСКАЯ КИНЕМАТИКА ШЕСТИЗВЕННОГО МЕХАНИЗМА ВЫТЯЖНОГО ПРЕССА.....	89
<i>А.В. Явтушенко</i> ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ВЫТЯЖНОГО ПРЕССА.....	95
<i>М.А. Калін, К.О. Ізотова</i> ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ МАЛОВУГЛЕЦЕВИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ З ОКИСЛЮВАЛЬНИМ ПОКРИТТЯМ.....	102
<i>В.Л. Калюжний, В.М. Горностаї</i> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНОГО ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ТА ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ З РОЗДАЧЕЮ ЗАГОТОВОК ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА ВАЛІВ	108
<i>В.Л. Калюжний, І.В. Вихованець, Є.Ю. Чувільов</i> ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ОБТИСКУ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК В КОНУСНІЙ МАТРИЦІ.....	113

В.Л. Калюжний УТОЧНЕНА ТЕОРІЯ КОМБІНОВАНОГО ВИТЯГУВАННЯ В ДВОКОНУСНІЙ МАТРИЦІ	121
А.В. Баланюк КОЛЕБАНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ КОНСОЛЬНЫХ БОРШТАНГ ПРИ ТОНКОМ РАСТАЧИВАНИИ ...	131
Ю. П. Бородій РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ДЕТАЛІ ТИПУ ВАЛУ	139
Ю. П. Бородій СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА РІЗУЧИХ КРОМКАХ НОЖІВ ДЛЯ РІЗАННЯ ДРОТУ	147
М.М. Мороз УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ М. КРЕМЕНЧУК.....	156
В.В. Драгобецкий, Е.А. Наумова, А.В. Воронин, Р.Г. Пузырь РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК	165
Д.С. Мехнін, Е.А., С.Ф. Сабол ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КУТОВОЇ РОЗДАЧІ ПЛАСКИХ ФЛАНЦІВ В ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВКАХ З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ 08Х18Н10	172
Н.В. Гончар, Е.В. Кондратюк, Д.Н. Степанов ФОРМИРОВАНИЕ РАДИУСА СКРУГЛЕНИЯ ОСТРЫХ КРОМОК СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФОРМ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА	178
С.М.Литвин, В.М.Манзюк ЕКОНОМІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ В ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ	185
В.Д. Рудь, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна ПЕРСПЕКТИВНІ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ НОВИХ ПОРИСТИХ ПРОНИКЛИВИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИРОДНИХ МІНЕРАЛІВ.....	192
С.В. Попов, А.В. Васильєв, І.В. Хоменко ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗКОЧУВАННЯ ОТВОРІВ В АЛЮМІНІЄВИХ КОРПУСНИХ ВИРОБАХ	198
А.В. Васильєв, С.В. Попов, І.В. Тимошенко ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛИБОКОГО СВЕРДЛІННЯ СТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК.....	206
І.А.Калашишникова, А.В.Калашиников ПРОЦЕСИ ВІДНОВЛЕННЯ В БАГАТОСТУПІНЧАТИХ СВЕРДЛОВИННИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСАХ ТА ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЇХ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ	213
С.А. Кравченко, А.И. Костюк, А.А. Постернак, И.А. Столевич ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ И ФРАГМЕНТОВ ВНУТРЕННИХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ КЕРАМЗИТОПЕРЛИТОБЕТОНА НА МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ	220
К.С. Барандич, С.П. Вислоух СТВОРЕННЯ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ВАЛУ ТА ВИРІШЕННЯ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ	228
С.О. Білоконь, В.О. Андрієнко, В.С. Антонюк, С.В. Храпатий МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗОНДА АТОМНО-СИЛОВОГО МІКРОСКОПУ З ДИЕЛЕКТРИЧНОЮ ПОВЕРХНЕЮ	233
М.О. Морнева АНАЛІЗ СИСТЕМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В СОВРЕМЕННОМ ВАГОНОСТРОЕНИИ	239
Я.О. Головченко ПРОЕКТИРОВАНИЕ АГРЕГАТОВ САМОЛЕТА ИЗ КОМПОЗИТОВ	245
В.М. Волкогон, Д.А. Котляр, С.К. Аврамчук, Ю.О. Федоран, М.В. Бобер, В.С. Антонюк ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГАРЯЧЕПРЕСОВАНИХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВІ КАРБІДІВ ВОЛЬФРАМУ ДЛЯ ТЕРМОЦЕНТРОБІЖНОГО РОЗПИЛЕННЯ.....	252
Олександренко Я.С., Куліков І.П. ВПЛИВ КУТА КОНУСУ ЗПРОФІЛЬОВАНОГО ПУАНСОНУ НА СИЛОВІ РЕЖИМИ ТА ЯКІСТЬ ВИРОБІВ ПРИ РОЗДАЧІ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК ІЗ СТАЛІ 12Х18Н10Т	259
В.Л. Доброскок, А.М. Шпилька ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН РАДІАЛЬНОГО БИТТЯ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ.....	266

В.А. Сошко, И.П. Симинченко ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	270
Ю.С. Манжос, А.Л. Берднікова АНАЛІЗУВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МОДЕЛЮВАННЯ КОСМІЧНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	287
Ю.А. Черная, Е.С. Дерябкина ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ ШТАМПОВ	301
Н.К. Резниченко, Е.Н. Резниченко, Л.В. Николенко ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА	306
А.М. Петренко ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ХРОМОМАНГАНЦЕВОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛУ	314
В.Л. Хорольский ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТРЕЗКИ МЕТАЛА ПРИ КРОМКООБРАЗОВАНИИ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПОД СВАРКУ	318
В.В. Кухарь, Р.С. Николенко ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЗАГОТОВОК ПРИ ЭКСЦЕНТРИЧНОЙ ОСАДКЕ ВЫПУКЛЫМИ ВСТАВКАМИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ПРОФИЛЯ	326
В.А. Багров КРИТЕРІЙ ЗНОСОСТІЙКОСТІ НАПЛАВОЧНИХ СТАЛЕЙ.....	333
І.В. Коваленко НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РЕМОНТУ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ	340
А.А. Павлова, А.Н.Лагода ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕМОНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	345
В.Г. Клименко, І.М. Піжов ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЗАТОЧУВАННЯ ЛЕЗОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ	351
Н.К. Резниченко, И.Я. Мовшович, Е.А. Фролов ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ДЕТОНАЦИОННО- ГАЗОВЫМ НАНЕСЕНИЕМ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ.....	358
Г.Д. Семченко, Э.С.Геворкян ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ И КОНСОЛИДИРОВАННЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ	364
М.В. Кіянєвський, О.В. Бондар ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ СКОРОЧЕННЯ РЕСУРСУ ОПОР КОВЗАННЯ РОТОРНИХ МАШИН ВІД ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ.....	372
О.В. Нижник, М.В. Гринькова МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ У БУКСИРНИХ ПРИСТОСУВАННЯХ АВТОМОБІЛІВ.....	377
В.А. Гайдар РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ КРУГОВОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК НА СТАНКАХ С ЧПУ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ ПОЛУЧИТЬ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЕ ШЛИФОВАНИЮ	383
АЛФАВІТНИЙ ВКАЗІВНИК.....	388

Збірник наукових праць
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка
Серія: ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ, БУДІВНИЦТВО
Випуск 2 (41)

Комп'ютерна верстка	<i>С.Г. Ясько</i>
Коректор	<i>Т.Г. Кардаш</i>
Відповідальний за підбір матеріалів у збірник	<i>Є.А. Фролов</i>

Оригінал-макет виготовлено на кафедрі технології машинобудування
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка

Підписано до друку 26.11.2014
Формат 60×84 ¹/₈. Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. – 32,76. Тираж 300 прим.

Адреса редакції:
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка
Україна, 36011, Полтава, Першотравневий проспект, 24

Видавництво та друк ФО-П Шейніна О.В.
61052, Україна, м. Харків, вул. Слов'янська, 3
Тел. 057 759-48-79

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2779 від 28.02.2007 р.
