

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

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Серія: ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ,
БУДІВНИЦТВО

Випуск 2 (37)

Полтава 2013 р.

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

Редколегія: С.Ф. Пічугін (головний редактор) та ін. – Вип. 2 (37). – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – 206. с.

Видається з 1999 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію KB 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 № 1 від 25.09.2013 р.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку I Міжнародної науково-технічної конференції «Високі технології у машинобудівному виробництві та транспортному машинобудуванні». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Збірник уключений до переліку наукових фахових видань, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт (Постанова президії ВАК України № 1-05/4 від 14.10.2009 року).

Відповідальний за випуск – ректор університету, д.е.н., проф. В.О. Онищенко.

Редакційна колегія:

- С.Ф. Пічугін* – **головний редактор**, д.т.н., проф., завідувач кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- Ю.Л. Винников* – **заступник головного редактора**, д.т.н., проф., проф. кафедри видобування нафти і газу та геотехніки Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- Є.А. Васильєв* – **відповідальний секретар**, к.т.н., ст. викладач кафедри будівельних машин та обладнання ім. Олександра Онищенко;
- М.Л. Зоценко* – д.т.н., проф., завідувач кафедри видобування нафти і газу та геотехніки Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- О.Г. Маслов* – д.т.н., проф., завідувач кафедри основ конструювання машин і технологічного обладнання Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського;
- В.В. Нічке* – д.т.н., проф., проф. кафедри дорожньо-будівельних машин Харківського державного автомобільно-дорожнього технічного університету;
- А.М. Павліков* – д.т.н., проф., завідувач кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- О.О. Петраков* – д.т.н., проф., завідувач кафедри основ, фундаментів і підземних споруд Донбаської національної академії будівництва та архітектури;
- О.В. Семко* – д.т.н., проф., завідувач кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- Л.І. Стороженко* – д.т.н., проф., проф. кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- А.Ф. Строй* – д.т.н., проф., завідувач кафедри теплогазопостачання і вентиляції Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка;
- В.Г. Таранов* – д.т.н., проф., завідувач кафедри механіки ґрунтів, фундаментів та інженерної геології Харківської національної академії міського господарства;
- Л.А. Хмара* – д.т.н., проф., завідувач кафедри будівельних і дорожніх машин Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.

В.Н. Павленко, д.т.н., доц.

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

В.В. Муравлев, к.т.н., доц., С.И. Кравченко, к.т.н., доц.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В статье приведены определения комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий. Определены разработчики и сферы их преобладающего применения.

Ключевые слова: *высокие технологии, комплексные, комбинированные, интегрированные, синергетические технологии, качество продукции, конкурентоспособность продукции.*

Актуальность проблемы. Интенсивное развитие техники на протяжении XX и в начале XXI столетия привело к тому, что технологии, новые и достаточно эффективные для одного поколения производителей и потребителей продукции, становились для последующих традиционными и не всегда удовлетворяли возросшим потребностям времени и рынка. В конце 70-х — в начале 80-х годов XX столетия появился и получил широкое распространение термин «высокие технологии», обозначающий принципиально новые, передовые, наукоемкие, нетрадиционные (прецизионные, нанотехнологии, детонационно-газовое нанесение упрочняющих покрытий и т. д.) технологии, обеспечивающие использующим их предприятиям лидирующие позиции на рынке.

В настоящее время 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.

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

Сформировалось новое понимание производства будущего: 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 высокоэффективные технологии, которые в отличие от традиционных называют «наукоемкими», например, прецизионные, нанотехнологии и т. д.

Высокими считают 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 [1].

Использование высоких технологий показало, что дело не только в заинтересованности предприятий, но и в его организации, мотивации людей к деятельности и множестве других факторов. Уже в 90-е годы XX столетия оказалось, что ряд высоких технологий утратили передовые позиции и заменены другими. Следует отметить, что машиностроение характеризуется широкой номенклатурой выпускаемой продукции, отличающейся по конструктивным и технологическим признакам, таким как размеры, масса, точность

формы и размеров, предъявляемым к ней техническим, экономическим и другим требованиям к современным технологиям, а также к условиям эксплуатации и производства, серийности выпуска. Соответственно различаются и технологии производства различной по применению продукции. Кроме того, имеет место заимствование технологий из одной отрасли машиностроения в другие. Все это обусловило потребность не столько в разработке новых технологий, сколько в выработке новых подходов к их разработке.

Такие подходы были выработаны. Некоторые из них получили название комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий. Как правило, эти подходы применялись и применяются при разработке технологий изготовления наиболее сложной и наукоемкой машиностроительной продукции.

Анализ последних научных достижений. В настоящее время в технической литературе приводится большое количество определений, относящихся к высоким технологиям, таких понятий как комплексные, комбинированные, интегрированные и синергетические технологии. Эти определения постоянно дополняются, уточняются и совершенствуются, так как появляются новые технологии, учитывающие и использующие взаимодействие все большего количества факторов. Иногда эти понятия используются как синонимы, что указывает на наличие у них общих признаков.

Комплексные технологии предусматривают увязку основных и вспомогательных технологических процессов в единый технологический процесс [2, 3]. В данном случае превалирует организационный аспект. Данная группа технологий может не влиять непосредственно на качество выпускаемой продукции, но влияет на величину затрат времени и средств на ее производство, а следовательно, на экономическую эффективность деятельности предприятия.

Комбинированные технологии предполагают использование сочетания различных физических и химических эффектов, а также способов обработки для изготовления продукции [4]. Данная группа технологий непосредственно предназначена для обеспечения необходимых технических характеристик продукции, производительности труда и принципиальной возможности изготовить изделие, которое невозможно обработать с использованием какого-либо одного эффекта или процесса обработки.

Синергетические технологии — основаны на инициировании и использовании самоорганизационных явлений при осуществлении технологического процесса. Характер этих явлений, а также механизмы самоорганизации могут быть различными. Само слово «самоорганизация» предполагает наличие двух и более явлений или эффектов, имеющих место при осуществлении технологического процесса. Выделены также характеристики технических систем, процессов, протекающих в этих системах и условий их протекания, способствующие возникновению синергетических эффектов [5, 6].

К определению понятия интегрированные технологии имеется несколько подходов. В работе [6] выделяются следующие направления создания интегрированных технологий: генеративные методы изготовления; усовершенствованные традиционные методы изготовления; комбинированные методы. Процессы разработки и внедрения таких технологий до настоящего времени не стандартизированы именно в силу необходимости учета большого числа разнообразных факторов, на первый взгляд мало связанных между собой. Кроме того, не определено, кто должен разрабатывать такие технологии, на основании чего следует принимать решение об их внедрении, и кто имеет право санкционировать их внедрение. В результате эффект от разработки технологий снижается, так как их разработчики не всегда в состоянии определить все источники повышения эффективности деятельности предприятия и, соответственно, конкурентоспособности продукции.

Таким образом, необходимо конкретизировать являющиеся важными общие признаки и различия между ними, а также оптимальные сферы их применения. Также необходимо разработать методологические основы разработки и применения комплексных, комби-

нированных, интегрированных, синергетических технологий и обучения этому специалистов различных отраслей машиностроения и различных служб машиностроительных предприятий.

Основной материал статьи. Главной особенностью комплексных, комбинированных, интегрированных, синергетических технологий и их общей чертой является поиск, создание и использование синергетического взаимодействия (синергии) между факторами, в общем случае влияющими на принятие и выполнение управленческих, конструкторских, технологических, организационных решений и действующими на всех этапах жизненного цикла изделия. Под синергией понимается взаимное усиление или ослабление эффектов, а также проявление новых эффектов от взаимодействия таких факторов. Выявляется такое взаимодействие на этапе проведения научно-исследовательских работ, а также на этапах проектирования и подготовки производства и собственно изготовления конкретного изделия. Различие между комплексными, комбинированными, интегрированными, синергетическими технологиями состоит в том, между какими факторами обнаруживается или создается синергия и что является целевой функцией разработки технологии, иными словами, на непосредственное получение какого эффекта рассчитана та или иная технология.

Для обеспечения конкурентоспособности продукции высокие технологии должны сопровождать весь ее жизненный цикл от научно-исследовательской работы до утилизации.

Оптимальными сферами применения комбинированных и синергетических технологий является в первую очередь производство продукции, а целью их разработки является обеспечение максимально высоких технических характеристик изделия, то есть технический эффект, достижение которого призвано повысить конкурентоспособность изделий. Естественно, что наличие либо отсутствие, а также необходимость разработки и возможность использования таких технологий учитывается на стадии проектирования изделий и технологической подготовки их производства. Следовательно, рассматривается синергия только технических эффектов. Причем термин «синергетические технологии» предполагает разработку единого технологического процесса, в ходе которого проявляются несколько усиливающих либо ослабляющих друг друга эффектов, а комбинированные технологии — двух и более отдельных технологических процессов, каждый из которых может применяться и самостоятельно, но по отдельности не обеспечивает необходимого качества изделия либо требует неприемлемых затрат времени и средств на изготовление продукции. Для синергетических технологий характерно взаимодействие факторов, выявляемых и действующих не только на стадиях конструкторского и технологического решений, но и на стадии научно-исследовательской работы. Комбинированные технологии, как правило, учитывают взаимодействие факторов на стадии реализации технологического решения, иногда в его взаимосвязи с конструкторским. Как правило, синергетические технологии разрабатываются на стадии проектирования изделия либо проведения научно-исследовательских работ, комбинированные — на стадии освоения изделия в производстве.

Разработка комплексных технологий направлена в первую очередь на обеспечение экономической эффективности деятельности предприятия, не затрагивая напрямую технические характеристики выпускаемой продукции, то есть целью их внедрения является получение непосредственного экономического эффекта. При этом имеет место синергетическое взаимодействие факторов на стадии разработки и выполнения технологического и организационного решений. Комплексные технологии, как правило, разрабатываются на стадии производства либо подготовки производства изделия.

Интегрированные технологии основаны на выявлении синергетического взаимодействия между факторами, действующими на стадиях принятия управленческих, конструкторских, технологических и организационных решений, то есть может достигаться технический, экономический, экологический и социальный эффекты. Проявляется такое

взаимодействие на всех стадиях жизненного цикла изделия. Характерной для создания интегрированных технологий является ориентация на потребности рынка и работа в условиях одновременного проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также разработки изобретательских решений.

Естественно, что целью деятельности любого предприятия является получение прибыли, то есть экономический эффект. При использовании комплексных технологий экономический эффект достигается непосредственно. Внедрение комбинированных и синергетических технологий обеспечивает получение экономического эффекта посредством достижения технического. В ряде случаев, особенно для государств с развитым природоохранным законодательством и социальными гарантиями, экономический эффект может достигаться путем обеспечения экологического и социального эффектов. Таким образом, непосредственным фактором обеспечения конкурентоспособности продукции может служить любой из перечисленных эффектов, а остальные обеспечиваются через его достижение, что характерно для интегрированных технологий.

Таким образом, четко разделить сферы применения комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий не представляется возможным — они перекрываются.

В самом общем виде можно сделать следующие **выводы**.

1. Основа комбинированной технологии — инженерное решение, как правило, технологическое, комплексной — управленческое и организационное, интегрированной — как правило, научно-исследовательская работа, изобретательское и инженерное решения, синергетической — научно-исследовательская работа.

2. Преимущественное использование методов научной, изобретательской и инженерной деятельности для разработки и собственно разработка комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий зависит от того, каким способом предполагается повышать или обеспечивать конкурентоспособность продукции.

3. Значительное влияние на выбор комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий оказывает соответствующая потребностям рынка стадия совершенствования продукции, для создания которой они предназначены: оптимизация по принципу действия, по конструкции или по параметрам (показателям качества).

4. Наиболее общим признаком различных видов высоких технологий является наукоемкость, базирующаяся на новейших результатах фундаментальных и специальных прикладных исследований.

Литература

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

2. Бондаренко, И.И. Совершенствование организации транспортного обслуживания — важный резерв повышения эффективности производства в машиностроении. [Текст] / И.И. Бондаренко, И.Ю. Калмыкова, Н.С. Момот // Республиканская научно-техническая конференция «Обеспечение технологичности и экономической эффективности изделий машино- и приборостроения»: тез. докл. — Днепропетровск: ДГУ, 1983. — 161 с.

3. Бондаренко, И.И. Интенсификация транспортного обслуживания машиностроительного производства [Текст] / И.И. Бондаренко, А.Р. Малкович, Н.С. Момот. — Л.: ЛДНТП, 1988.

4. Проволоцкий, А.Е. Развитие комбинированных методов обработки как база интегрированных технологий [Текст] / А.Е. Проволоцкий // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-та «ХПИ». — Вып. 1. — Харьков, 2003.

5. Переверзев, Е.С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности [Текст] / Е.С. Переверзев. — К.: Наукова думка, 1995. — 358 с.

6. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления [Текст] / Под общ. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченка. — Харьков, 2002 — 140 с.

© В.Н. Павленко, В.В. Муравлев, С.И. Кравченко

В.М. Павленко, д.т.н., доц.

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

В.В. Муравльов, к.т.н., доц., С.І. Кравченко, к.т.н., доц.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ У МАШИНОБУДУВАННІ

У статті наведені визначення комплексних, комбінованих, інтегрованих і синергетичних технологій. Визначені розробники та сфери їх переважного застосування.

Ключові слова: високі технології, комплексні, комбіновані, інтегровані, синергетичні технології, якість продукції, конкурентоздатність продукції.

V.N. Pavlenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

National Aerospace University N.E. Zhukovsky «KHAU»

V.V. Muravlev, Ph.D., Associate Professor, S.I. Kravchenko, Ph.D., Associate Professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

HIGH TECHNOLOGIES IN MACHINE-BUILDING

Determinations for complex, combine, integrated and synergetic technologies are represented in this article. Spheres of best using for complex, combine, integrated and synergetic technologies are looked.

Keywords: high tech, complex, combined, integrated, synergistic technologies, product quality, competitiveness of the products.

УДК 621.791

А.Я. Мовшович, д.т.н., проф., Ю.А. Черная, ассист., Е.С. Дерябкина, к.т.н., доц.

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ВЫБОР СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ КОЛОНОК ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ ШТАМПОВ

Показана возможность восстановления и упрочнения направляющих колонок детонационно-газовым напылением. Установлено повышение износостойкости поверхности с покрытием ПГ 10Н-01 в 1,5 раза по сравнению с колонками, изготовленными из стали 20 с цементацией.

Ключевые слова: детонационное напыление, упрочняющие покрытия, адгезионная прочность, пористость, износостойкость.

Постановка проблемы. Надежность и долговечность работы штампов для холодной штамповки, а также точность листовых штампованных деталей существенно зависят от точности и постоянства размеров направляющих колонок, изнашиваемых в условиях возвратно-поступательного движения в местах сопряжения с втулками. Перспективным направлением повышения стойкости и долговечности направляющих элементов технологической оснастки, является нанесение на их рабочие поверхности упрочняющих покрытий.

В современном машиностроении особое место занимают технологии, связанные с приданием рабочим поверхностям деталей машин и инструментальных материалов необходимых свойств, обеспечивающих повышение их эксплуатационных характеристик.

В настоящее время разработаны и активно развиваются способы газотермического напыления: плазменный, электродуговой, газопламенный, детонационный, отличающиеся видом энергии, используемой для создания покрытий.

Цель исследования — выбрать способ упрочнения и исследовать качественные показатели напыленных покрытий.

Основной материал. Для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей колонок применено детонационно-газовое напыление, на основе сравнения качественных показателей напыленных покрытий (прочности сцепления, пористости). Детонационно-газовый метод напыления позволяет не только восстанавливать рабочие поверхности изделий и деталей, но и значительно увеличить их эксплуатационный ресурс. Для нанесения покрытий этим способом могут быть использованы практически любые материалы: от полимеров до тугоплавкой керамики, а также любые металлы и сплавы. Размер частиц порошка, который применяется для нанесения покрытий, обычно лежит в пределах 5...100 мкм в зависимости от материала порошка и требуемых параметров пористости покрытий. Напыляемые частицы обладают чрезвычайно высокой кинетической энергией, что определяет уровень прочности покрытий на порядок превышающий прочность сцепления покрытий, полученных другими газотермическими и газoeлектрическими способами. Прочность детонационных покрытий может достигать 180–200 МПа, в зависимости от материала покрытия и детали. К тому же детонационно-газовые покрытия имеют минимальную пористость — до 0,5–1,0 % (газопламенные — 10 %, а плазменные — 2 %). При этом, как правило, при формировании покрытия температура детали при напылении зависит от ее размеров, не превышает 530 °К, что соответствует низкому отпуску. Ввиду малой продолжительности процесса напыления температурное воздействие незначительно, отсутствует деформация напыляемой детали.

К особенностям данного способа можно также отнести следующее:

– возможность плавного и устойчивого регулирования параметров процесса в широких диапазонах позволяет для каждого материала установить наиболее оптимальные режимы напыления;

– применение мелкодисперсных композиционных материалов для напыления позволяет формировать покрытия с шероховатостью от 10 до 20 мкм, что в некоторых случаях не требует дополнительной механической обработки;

– высокая энергия продуктов детонации, ускоряющая частицы, повышающая их температуру, позволяет формировать покрытия из тугоплавких материалов не только на металлических деталях с твердостью поверхности 60 HRC₃ и выше, но и на неметаллических материалах (стекло, керамика, дерево, картон и др.).

Перед напылением необходимо обеспечить выполнение следующих подготовительных операций:

– направляющие колонки должны быть окончательно механически обработаны кроме мест, подлежащих упрочнению. В этих местах должен быть удален слой металла, равный толщине упрочняющего покрытия.

– подготовка поверхности, хранение и транспортирование подготовленных под упрочнение проводится в помещении при температуре не ниже 18 °С и относительной влажности не выше 75 %. При этом не 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, не подлежащие упрочнению, защищаются от воздействия струйно-абразивной обработки (а также последующего напыления) специальными экранами.

– после струйно-абразивной обработки колонка обдувается сжатым 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.

Напыление производили на установке детонационного напыления «УН-102» (ДГУ), (рис. 1), в состав которой входит манипулятор, обеспечивающий синхронизированное перемещение колонки в процессе формирования покрытия.

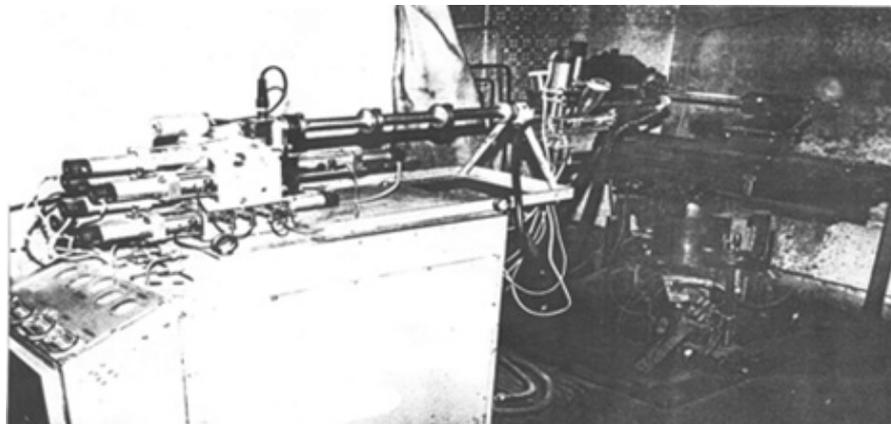


Рис. 1. Общий вид установки детонационно-газового упрочнения

Техническая характеристика установки для детонационно-газового напыления покрытий приведена в табл. 1.

Покрытия из самофлюсующегося сплава ПГ-10Н-01 наносили на поверхность направляющей колонки, длина изнашиваемого участка $l = 150$ мм, соответствующая зоне контакта колонки с втулкой. Материал колонки — сталь 20, диаметр $\varnothing 60$ мм.

Таблица 1. Техническая характеристика установки

| Параметры | Значение |
|--|---|
| Калибр ствола, мм | 20 |
| Длина ствола, мм | 640...1840 |
| Скорострельность, цикл/с | до 15 |
| Подача порошка в ствол | радиальная |
| Объем бункера дозатора, мл | 160 |
| Толщина покрытия за 1 выстрел, мкм | 2...20 |
| Коэффициент использования порошка | до 0,8 |
| Рабочие газы | газообразное топливо (ацетилен, пропан, водород), кислород, азот (воздух) |
| Рабочее давление всех газов, МПа | 0,12 + 0,01 |
| Соотношение топлива и кислорода в горючей смеси | от 1:1 до 1:5 |
| Быстродействие: газовых клапанов, порошковых дозаторов, мс | 12+2 16+2 |
| Система охлаждения | водяная, замкнутая |
| Управление | дистанционное, автоматическое, программируемое |
| Напряжение питания, В | 380/220 |
| Наибольшая потребляемая мощность, кВт | 5 |
| Габаритные размеры, мм | 2500×644×1200 |
| Масса, кг | 360 |

Выбор режимов детонационно-газового напыления износостойкого покрытия выполнен на основании серии проведенных экспериментов и математической модели, где в качестве критериев оптимизации были приняты прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{\text{сц}}$, твердость покрытия, толщина слоя покрытия, напыляемого за единичный выстрел.

Для обеспечения геометрических показателей поверхностного слоя и требуемой точности после напыления проведена шлифовка восстановленной поверхности:

– для шлифования были применены абразивные материалы: электрокорунд белый и нормальный.

– ввиду высокой твердости покрытий следует применять шлифовальные круги с керамическими связками средней мягкости (СМ1 и СМ2) и мягкие. Алмазные круги, как правило, на металлической связке;

– поперечная подача при шлифовании была в пределах 0,01–0,04 мм/дв. ход;

– при интенсивном охлаждении 0,3%-ным водным раствором кальцинированной соды.

Анализ лабораторных испытаний образцов-свидетелей показал: прочность сцепления покрытия с основой на сдвиг составила 110...120 МПа, твердость покрытия — 58...60 HRC, что соответствует требованиям эксплуатации и твердости серийно выпускаемых новых колонок — 56...60 HRC, толщина напыленного слоя — 0,6 мм.

Сравнительные износные испытания показали повышение износостойкости восстановленных колонок в 1,5 раза по сравнению с новыми колонками, изготовленными с цементацией стали 20 на глубину 0,8–1,0 мм.

Испытания проводились на машине трения МЧ-1М: продолжительность испытаний 20 ч; путь трения — 6,4 км; количество циклов — 1,6 млн.

Средний износ составил $3 \cdot 10^{11}$ мкм, линейный износ — 0,07 мкм, показатель усталостной прочности — 0,56–0,63, коэффициент трения — 0,148–0,153.

Также наносилось покрытие из механической смеси карбида вольфрама с кобальтом ВК15. Напыление производилось на следующих режимах:

– скорострельность – 2 выстрела в секунду;

– дистанция напыления — 150 мм;

– соотношение рабочих компонентов $O_2:K_2:C_2H = 30:40:30$ %;

– толщина получаемых покрытий 0,20–0,25 мм.

В результате анализ результатов испытаний по совокупной оценке служебных характеристик показал, что оптимальное упрочняющее покрытие получено с: твердостью 56...58 HRC; адгезионной прочностью до 200 МПа; (160...180 МПа), прочностью на срез $\tau_{\text{ср}} = 500$ МПа; толщиной — 200...300 мкм.

После шлифовки толщина твердосплавного покрытия составляла 0,10–0,12 мм. Таким образом, удалось получить рабочую направляющую колонку, представляющую собой стальной стержень, заключенный, а твердосплавную оболочку. При этом колонка сохраняла все преимущества твердого сплава и одновременно исключала его недостатки.

Выводы. Получены восстановительные напыленные покрытия с высокими качественными показателями. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что нанесение износостойких покрытий детонационно-газовым напылением на направляющие колонки позволит обеспечить экономию металла и исключить затраты на изготовление новых колонок.

Литература

1. Буденный, М.М. Исследование износостойкости рабочих частей разделительных штампов из некоторых инструментальных сталей [Текст] / М.М. Буденный, А.Я. Мовшиович // Сб. науч. тр. VII научно-техн. семинара. – Х.: ХДПУ, 1997 – С. 27–32.

2. Мовшиович, А.Я. Особенности конструирования и сборки штампов из композиционных материалов для разделительных операций листовой штамповки [Текст] / А.Я. Мовшиович, М.М. Буденный // М.: Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 6 – С. 24–27.

3. Богуслаев, А.В. Исследование качества материала деталей после нанесения покрытий [Текст] / А.В. Богуслаев. – Харьков: НАКУ. – 2000. – Вып. 21(4). – С. 55–67.

© А.Я. Мовшович, Ю.А. Черная, Е.С. Дерябкина

О.Я. Мовшович, д.т.н., проф., Ю.А. Чорна, асист., Є.С. Дерябкина, к.т.н., доц.

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

ВИБІР СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ НАПРАВЛЯЮЧИХ КОЛОНОК ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНИХ ШТАМПІВ

Показано можливість відновлення і зміцнення направляючих колонок детонаційно-газовим напиленням. Встановлено підвищення зносостійкості поверхні з покриттям ПГ 10N-01 в 1,5 рази у порівнянні з колонками, виготовленими зі сталі 20 з цементациєю.

***Ключові слова:** детонаційне напилення, зміцнюючі покриття, адгезійна міцність, пористість, зносостійкість.*

A.Ya. Movshovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Yu.A. Chernaya, assistant, Ye.S. Deryabkina, Ph.D., Associate Professor

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov

RESTORATION TYPE SELECTION COLUMN GUIDES FOR RE-ADJUSTABLE STAMPS

The possibility of restoration and strengthening of column guides detonation-gas spraying. Found an increase in wear resistance of the coated surface PG 10N-01 1.5 t. compared with the columns made of a carburizing steel 20.

***Keywords:** detonation spraying, reinforcing coating adhesive strength, porosity, durability.*

УДК 621.65.011:621:73.07

В.В. Кухарь, к.т.н., проф., Р.В. Суглобов, ст. преп.

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

УЧЕТ СИЛЫ ИНЕРЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗАХВАТНЫХ ОРГАНОВ ГРЕЙФЕРНЫХ ПЕРЕКЛАДЧИКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ШТАМПОВКИ НА ПРЕССАХ

Выполнен анализ условий позиционного переноса цилиндрической заготовки захватными органами грейферного переключателя. Установлены уровни влияния скорости перемещения и массы заготовки на требуемую силу сжатия захватных органов в технологиях автоматизированной штамповки на кривошипных прессах.

***Ключевые слова:** грейферный переключатель, заготовка, захватный орган, сила инерции, объемная штамповка на прессе.*

Введение. Объемная штамповка представляет собой неотъемлемую часть заготовительного производства в машиностроении. Эффективные технологические решения позволяют минимизировать отходы металла при последующей механической обработке поковок, уменьшить общие энергетические затраты на единицу продукции. При этом, наличие таких факторов как монотонность труда, работа с раскаленным металлом, высокая

скорость движения ползуна, большая масса поковок требует применения средств механизации и автоматизации. В технологических линиях на основе кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) наибольшее распространение получили грейферные переключатели, позволяющие подавать заготовку на первую позицию обработки и перемещать полуфабрикат по переходам в штамповом пространстве прессы. Интенсивный автоматический режим работы переключателей требует надежного удержания заготовки захватными органами.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Управление транспортирующими механизмами при автоматизированной объемной штамповке осуществляется при помощи датчиков движения, положения, скорости, температуры, массы и сил [1]. Для этого используют фотодатчики, реле времени, фотопирометры, тензодатчики и т. п. Кроме фактической силы штамповки требуется контроль состояния и силы сжатия захвата заготовки для исключения её смещения или падения в процессе перемещения. Осуществление такого контроля приобретает особую актуальность в технологиях, требующих высокоточного позиционирования заготовки в штампе, установки её на выпуклые рабочие поверхности штамповых вставок [2].

Известные конструкции грейферных переключателей [3, 4] содержат грейферные линейки, оснащенные захватами, механизмы их подъема, смыкания и перемещения, кинематически связанные с системой управления прессом. Однако, несмотря на расширение технологических возможностей в виде обеспечения жесткой синхронизации работы переключателя и прессы, исключения износа деталей муфты и тормоза прессы, увеличения вертикального перемещения линеек и упрощения конструкции механизма подъема, данные устройства не обеспечивают надежного захвата заготовок при смыкании линеек ввиду отсутствия контроля и регулирования силы сжатия захватных органов.

Производительность штамповочных линий определяется стойкостью штампов, быстродействием переключателей и нагревателей [5]. В автоматизированных линиях на базе КГШП с номинальной силой 16...40 МН при штамповке поковок массой от 1 до 10 кг производительность составляет 240...1200 шт/ч [5], а в линиях на базе штамповочных автоматов — до 7200 шт/ч [1, 5]. Это свидетельствует о высокой скорости перемещения грейферных линеек и значительной инерционной нагрузке на захватные органы переключателей, которые постоянно находятся в режимах разгона и торможения. По данной причине циклическая работа электродвигателя ограничивает его предел быстродействия, а средства автоматизации и механизации являются наименее эффективными по параметрам энергопотребления.

В работе [6] разработаны основы теории создания рекуперативных средств механизации, в которых кинетическая энергия подвижных звеньев аккумулируется на этапе торможения в специальных устройствах, а затем используется для разгона при выполнении следующего движения. Такие конструкции призваны исключить влияние инерционных сил на потребляемую двигателем мощность и стабилизировать требуемые кинематические параметры работы переключателей. Их использование позволяет увеличить быстродействие средств механизации при автоматической штамповке, а, следовательно, связано с возрастанием уровня динамических нагрузок на захватные органы.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Таким образом, захватные органы грейферных переключателей испытывают тяжелые динамические нагрузки, уровень которых зависит от скорости перемещения линеек и массы заготовок. На величину действующих нагрузок оказывают влияние условия трения на контакте захвата с заготовкой, конструкция и геометрия захватных органов, схема захвата заготовки. Базовыми для расчета силы сжатия заготовки захватами являются методики, изложенные в источниках [7, 8]. Однако данные методики не позволяют оценивать величину динамических нагрузок в захватных органах, выделять уровни влияния скорости перемещения и массы заготовки на силу сжатия захватов, контроль и регулирование которой необходимо осу-

ществлять для снижения энергопотребления и при перестройке технологической линии на выпуск нового изделия.

Постановка задачи. Целью настоящего исследования является анализ условий переноса цилиндрической заготовки захватными органами грейферного переключника на позициях автоматической многопереходной штамповки на КГШП. Для этого требуется решить следующие задачи: разработать расчетную схему удержания цилиндрической заготовки захватом грейферного переключника, установить закономерности влияния на силу сжатия захвата технологических и кинематических факторов штамповки, установить уровень влияния скорости перемещения и массы заготовки на требуемую силу сжатия захватных органов переключника.

Основной материал и результаты. Грейферные переключники являются автономными устройствами, прикрепляемыми к станине КГШП. Основными рабочими органами переключников являются захваты, монтируемые на грейферных линейках (рис. 1). При работе трехкоординатных средств механизации их линейки движутся по траектории, связанной с захватом заготовки (рис. 1, «*e – a*»), вертикальным подъемом (рис. 1, «*a – б*»), горизонтальным перемещением (рис. 1, «*б – в*»), вертикальным опусканием (рис. 1, «*в – г*»), высвобождением заготовки (рис. 1, «*г – д*») для проведения обработки на следующей позиции и возвратом линеек в исходное положение (рис. 1, «*д – e*») [9]. При извлечении поковки из окончательного ручья она перемещается на транспортер.

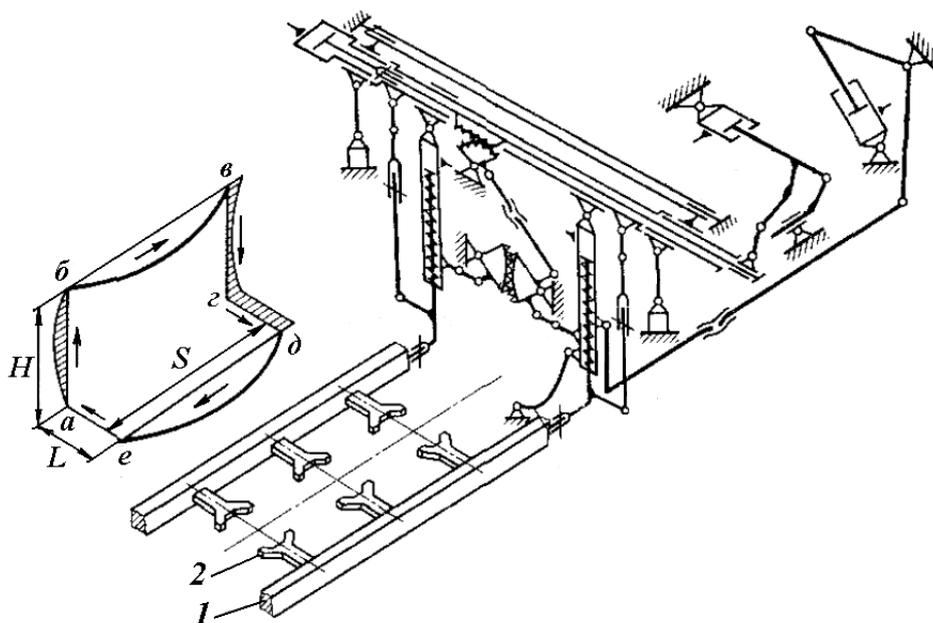


Рис. 1. Кинематическая схема трехкоординатного трехпозиционного грейферного переключника:

1 – грейферные линейки (балки), *2* – захваты; *H*, *L* и *S* – шаг линеек по высоте, ширине и длине соответственно; *a – б – в – г – д – e* – траектория движения линеек

Величина шага линеек по высоте настраивается в зависимости от конструкции поковки и ручьев штампа и может составлять 5...200 мм, шаг линеек по горизонтали зависит от размеров штампового пространства прессы и количества ручьевых вставок и составляет 220...420 мм [7–9]. Следовательно, для выполнения описанной выше траектории с коэффициентом загрузки операции 0,5...1,0 (последний — идеальный случай автоматической штамповки) на проведение одного движения линеек отводится 0,25...2,5 с (см. табл. 1). В табл. 1 также приведены данные по скоростям движения грейферных линеек.

Таблица 1. Характеристики линий и грейферных переключателей

| КГШП в линии | Масса штампующих поковок, кг | Максимальная производительность линии | | Время на полную траек- торию движения линеек, с | Время на одно движение линеек, с | Скорость движения линеек, м/с |
|-----------------|---------------------------------------|---|--------|--|---|--|
| | | шт/ч | шт/мин | | | |
| 16 МН | 1...4 | 1200 | 20 | 3 | 0,25...0,5 | 0,4...1,8 |
| 40 МН | 10...22 | 240 | 4 | 15 | 1,2...2,5 | 0,1...0,4 |

В случае выполнения условий симметричного удержания заготовки грейфером его губки шириной B захватывают заготовку диаметром D_0 по середине её высоты H_0 , как показано на разработанной схеме (рис. 2).

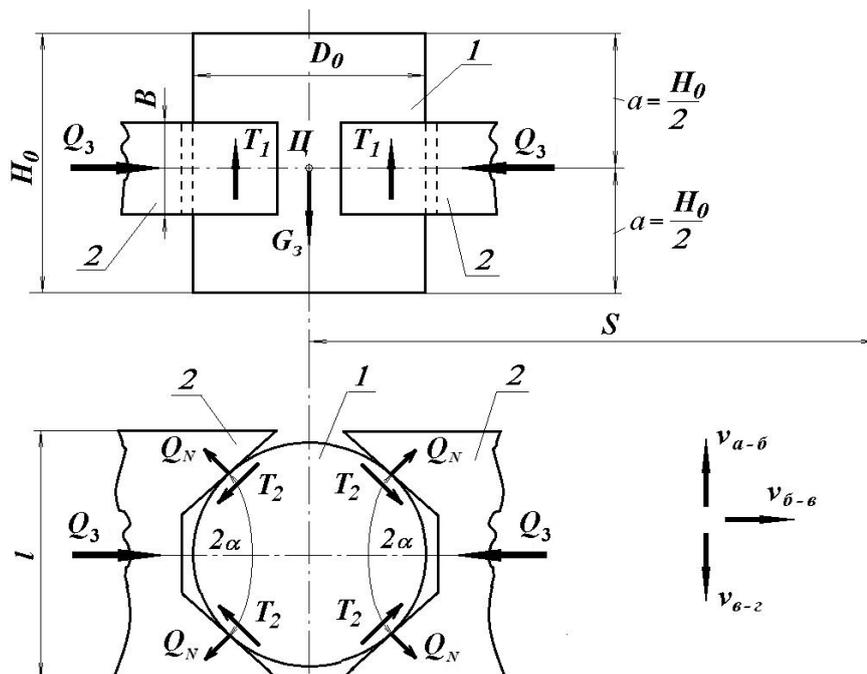


Рис. 2. Схема действия сил при симметричном захвате заготовки грейфером:
 1 – заготовка, 2 – захваты грейфера; Π – центр тяжести заготовки,
 Q_3 – сила сжатия заготовки грейфером, Q_N – силы, направленные перпендикулярно
 поверхностям губок захватов, T_1 и T_2 – силы трения, α – угол раскрытия губок
 захвата, B и l – высота и ширина губок; v_{a-b} , v_{b-e} , v_{e-z} – скорости движения заготовки
 при перемещении по траектории переключки

При этом силу, необходимую для захвата и удержания заготовки, рассчитывают как [7, 8]

$$Q_3 = \frac{k \cdot G_3 \cdot \cos \alpha}{2\mu}, \quad (1)$$

где $k = 1,3 \dots 1,6$ – коэффициент учета динамической нагрузки; $G_3 = m_3 \cdot g$ – сила тяжести заготовки, здесь m_3 – масса заготовки, кг; μ – коэффициент трения между заготовкой и губками захвата ($\mu = 0,2 \dots 0,3$ – гладкие губки; $\mu = 0,3 \dots 0,4$ – губки с рифлениями; $\mu = 0,08 \dots 0,12$ – при смазке поверхностей [7, 8]).

Выбор коэффициента учета динамической нагрузки в формуле (1) в указанных пределах является приближенным. В случаях его неоправданно высоких значений возрастает технологическое энергопотребление, увеличиваются масса и габариты захватных органов. Низкие значения данного коэффициента не обеспечивают надежного захвата заготовки. Это требует уточнения методики расчета силы сжатия заготовки захватами.

Перемещение заготовки массой m_3 по горизонтали «б – в» на шаг S со скоростью v приводит к динамическим нагрузкам, для учета которых силу сжатия заготовки захватами необходимо рассчитывать как

$$Q_3 = Q_3^* + Q_{in.S} + Q_{in.gr}, \quad (2)$$

где $Q_3^* = (G_3 \cdot \cos \alpha) / 2\mu$ – сила сжатия, учитывающая только статические нагрузки; $Q_{in.S} = m_3 \cdot v^2 / S$ – сила инерции при горизонтальном перемещении заготовки; $Q_{in.gr} = m_{gr} \cdot v^2 / S$ – сила инерции при перемещении захватных органов грейфера массой m_{gr} .

Следовательно, коэффициент учета динамической нагрузки:

$$k = \frac{Q_3}{Q_3^*} = 1 + \frac{Q_{in.S}}{Q_3^*} = 1 + \frac{v^2(1+c) \cdot 2\mu}{S \cdot g \cdot \cos \alpha}, \quad (3)$$

где $c = m_{gr} / m_3$ – коэффициент пропорциональности масс.

Результаты численного анализа изменения коэффициента k от скорости и расстояния горизонтального перемещения заготовки при $\alpha = 45^\circ$ и $c = 2$, а также с учетом изменения коэффициента трения на контакте заготовки и захватов приведены на рис. 3. Полученные данные свидетельствуют о том, что динамические нагрузки при работе грейферного переключателя могут в 8 раз превышать статические.

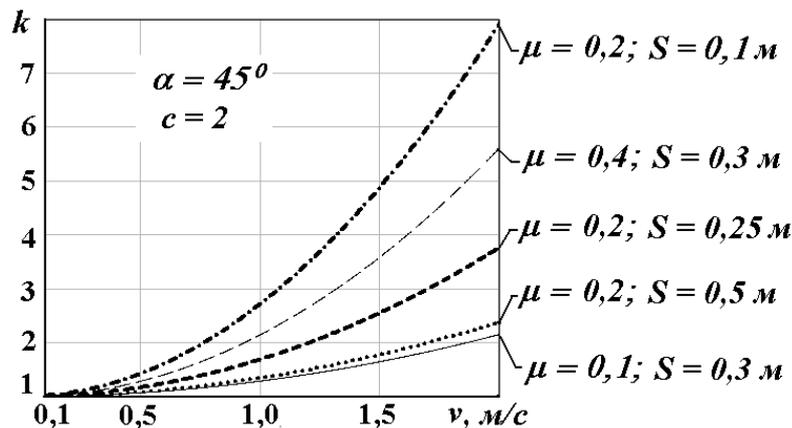


Рис. 3. Результаты расчетов коэффициента учета динамических нагрузок

Подставляя правую часть выражения (3) в формулу (1) получим:

$$Q_3 = \frac{\left(1 + \frac{v^2(1+c) \cdot 2\mu}{S \cdot g \cdot \cos \alpha}\right) \cdot m_3 \cdot g \cdot \cos \alpha}{2\mu}. \quad (4)$$

Если одновременно по переходам штамповки перемещается n заготовок, полуфабрикатов и поковок (масса их, как правило, одинаковая), то суммарную силу сжатия вычисляют как

$$Q_{3\Sigma} = \frac{\left(1 + \frac{v^2(1+n \cdot c) \cdot 2\mu}{S \cdot g \cdot \cos \alpha}\right) \cdot n \cdot m_3 \cdot g \cdot \cos \alpha}{2\mu}. \quad (5)$$

Принимая $n = 3$, $c = 2$ и $\alpha = 45^\circ$, проводили анализ выражения (5), результаты которого приведены на рис. 4. Вычисления выполняли для случаев использования грейферного переключателя в линиях КГШП 16 и 40 МН (см. табл. 1), а также для различных значений коэффициента трения на контакте заготовки с губками захвата.

Исходя из полученных данных, с увеличением массы заготовки и скорости её перемещения силу сжатия захватов необходимо увеличивать. Причем величина данной силы является более чувствительной к скоростным режимам работы быстроходных грейферных переключателей, установленных в линиях КГШП 16 МН.

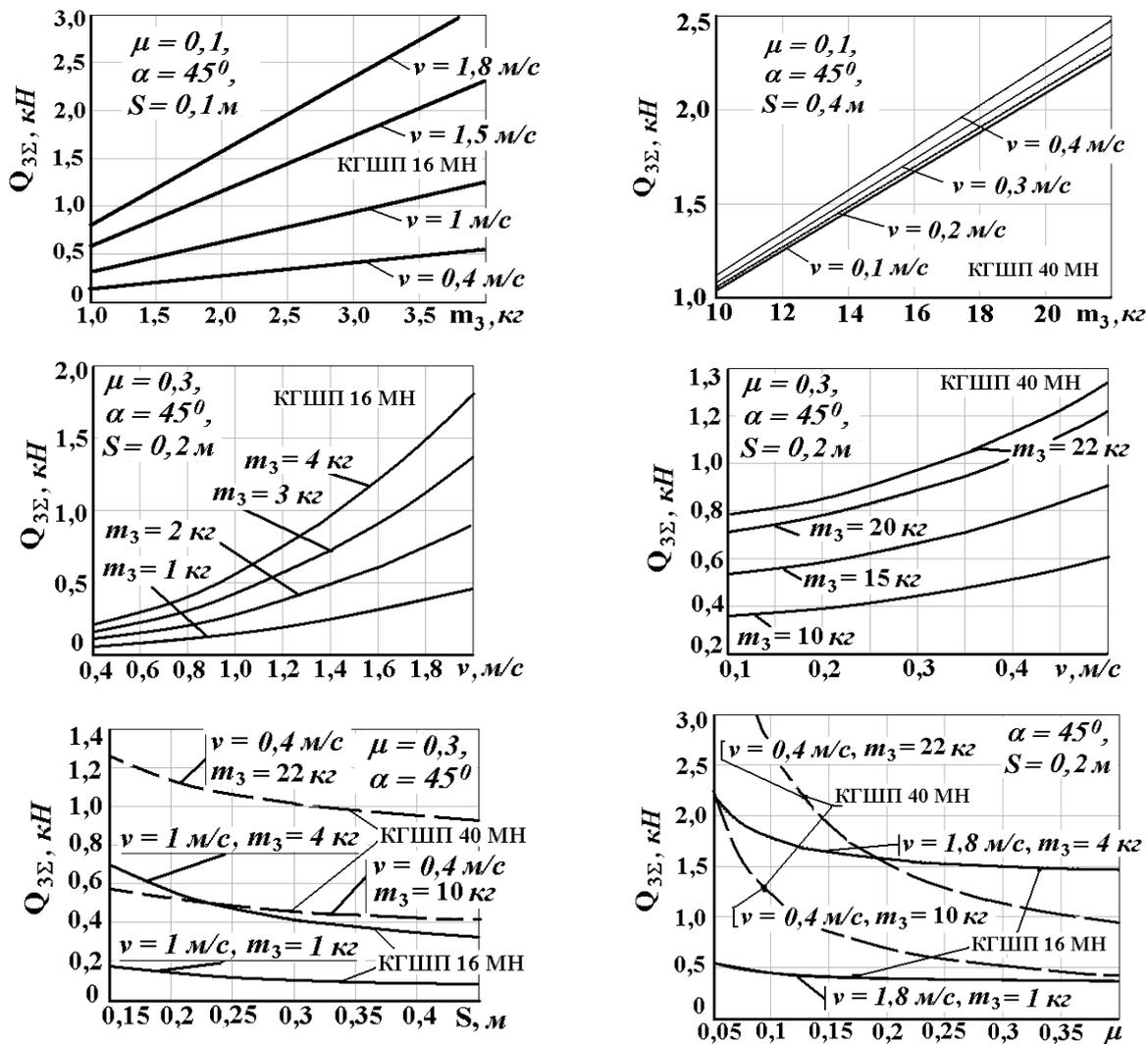


Рис. 4. Результаты расчетов необходимой суммарной силы сжатия заготовки захватами грейферного переключателя в зависимости от различных факторов

Выводы. Установлено, что динамические нагрузки при работе грейферных переключателей могут превышать в 8 раз статические нагрузки, связанные с подъемом заготовки. Ввиду относительной быстроходности грейферных переключателей, установленных на менее мощных прессах, в их работе преобладают силы инерции, связанные со скоростными режимами, что требует надежного обеспечения суммарной силы захвата заготовки. Показано, что с ростом расстояния переноса заготовки сила сжатия захватов может быть ослаблена, а применение гладких губок и вероятность попадания смазки на их поверхность, влекущая за собой снижение коэффициента трения при захвате, требует увеличения мощности сжимающего привода.

Литература

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.Ф. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.: под общ. ред. В.Ф. Мануйлова, 1996. – 736 с.

2. Моделирование формоизменения цилиндрических заготовок при осадке коническими плитами [Текст] / В.В. Кухарь, Р.В. Суглобов, Т.Г. Данилова, Е.А. Мкртчян, Р.С. Николенко // *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр.* – 2013. – № 2 (35). – С. 9–13.

3. Пат. 2146618 Российская Федерация, МПК⁷ В 30 В 15/30, В 21 D 43/10. Грейферная подача к штамповочному прессу / Ачкасов А.Т.; заявитель и патентообладатель Воронежское ЗАО по выпуску тяжелых механических прессов. – № 98101533/02; заявл. 29.01.1998; опубл. 20.03.2000, Бюл. № 6.

4. Пат. 2090291 Российская Федерация, МПК⁶ В 21 D 43/00, В 30 В 15/30. Грейферная подача к штамповочному прессу / Ачкасов А.Т.; заявитель и патентообладатель Воронежское ЗАО по выпуску тяжелых механических прессов. – № 95116785; заявл. 16.05.1995; опубл. 10.02.1998, Бюл. № 3.

5. Автоматические линии в машиностроении: Справочник. В 3-х т. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 3. Комплексные автоматические линии и участки / Под ред. А.И. Даценко, Г.А. Навроцкого, 1985. – 480 с.

6. Семеновенков, В.С. Разработка теории, методов проектирования и создание рекуператорных средств механизации кузнечно-штамповочного производства : дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.05 / Семеновенков Владимир Степанович. – Воронеж, 1999. – 365 с.

7. Норицын, И.А. Автоматизация и механизация технологических процессовковки и штамповки [Текст] / И.А. Норицын, В.И. Власов. – М.: Машиностроение, 1987. – 388 с.

8. Смирнов, А.М. Основы автоматизации кузнечно-прессовых машин [Текст] / А.М. Смирнов, К.И. Васильев. – М.: Машиностроение, 1987. – 245 с.

9. Семендий, В.И. Прогрессивные технология, оборудование и автоматизация кузнечно-штамповочного производства КамАЗа [Текст] / В.И. Семендий, И.Л. Акаро, Н.Н. Волосов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

© В.В. Кухарь, Р.В. Суглобов

В.В. Кухар, к.т.н., проф., Р.В. Суглобов, ст. викл.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

ВРАХУВАННЯ СИЛИ ІНЕРЦІЇ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЗАХВАТНИХ ОРГАНІВ ГРЕЙФЕРНИХ ПЕРЕКЛАДНИКІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ШТАМПУВАННЯ НА ПРЕСАХ

Виконаний аналіз умов позиційного переносу циліндричної заготовки захватними органами грейферного перекладника. Установлено рівні впливу швидкості переміщення та маси заготовки на потрібну силу стискування захватних органів у технологіях автоматизованого штампування на кривошипних пресах.

Ключові слова: грейферний перекладник, заготовка, захватний орган, сила інерції, об'ємне штампування на пресі.

V.V. Kukhar, Ph.D., Professor, R.V. Suglobov, Senior Lecturer

SHEI «Priazovskyi State Technical University», Mariupol

A COUNT OF INERTIAL FORCE IN DESIGN OF HOLDING ORGANS OF SHIFTED RELOADERS FOR AUTOMATIC IMPRESSION DIE-FORGING BY PRESSES

Analyse of condition of position moving of cylindrical billet by holding organs of shifted reloader are execute. Levels of influence of velocity reloading and weight of billets on necessary force of pressing of holding organs were determinate for technologies of automatic impression die-forging by crank-shaft presses.

Keywords: shifted reloader, billet, holding organ, force of inertia, volumetric die-forging by presses.

А.И. Долматов, д.т.н., проф.

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

А.Я. Мовшович, д.т.н., проф.

Национальный технический университет «ХПИ»

Н.Д. Жолткевич, д.т.н., с.н.с.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ МАШИН

В статье рассмотрены пути и методы эффективного повышения эксплуатационных свойств изделий машиностроения за счет улучшения качества поверхностных слоев деталей, а также применяемого при обработке различными методами соответствующего оснащения и инструмента.

Ключевые слова: *поверхностный слой, поверхностное упрочнение, режущий инструмент, методы нанесения покрытий, покрытие, износостойкость.*

Формирование проблемы. Известно, что надежность работы машин непосредственно связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами.

От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства техники — 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, электроискровым легированием, пластическим поверхностным деформированием (ППД) и др.

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), карбонитрид-титана (TiCN). Такие покрытия хотя и повышают стойкость режущих инструментов, однако, позволяют решить задачу увеличения работоспособности частично, так как эффективны при обработке легированных конструкционных 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 обрабаты-

ваемый (сходящую стружку). В этом случае сопротивление пластическому сдвигу на участке пластического контакта снижается. Это приводит к уменьшению коэффициентов деформации и сил резания [1, 2].

Целью данной статьи является выбор наиболее оптимальных покрытий для режущих инструментов.

Основной материал исследований. На основе анализа результатов проведенных экспериментальных исследований наиболее эффективными покрытиями есть:

– 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 хромо-никелевых 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.

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 ($\alpha \cdot \text{Me} + \alpha \cdot \text{Me} \rightarrow \gamma \cdot \text{Me} + \gamma \cdot \text{Me}$).

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 экологически 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 сталей, 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 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 газо-термического 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.

Выводы

1. Наиболее целесообразно использовать вакуумную и детонационно-газовую технологию поверхностного упрочнения деталей и инструмента, а также технологию ППД (обкатывание и раскатывание шаровым и роликовым инструментом, алмазное выглаживание, ударная обработка специальным инструментом), электроискровое легирование или комбинацию вышеперечисленных покрытий.

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.

2. Выбор оптимального метода зависит непосредственно от уровня эксплуатационных конкретных изделий техники, применяемого оборудования и инструмента.

Литература

1. Мовшович, А.Я. Нанесение упрочняющих покрытий [Текст]: моногр. / А.Я. Мовшович, Н.К. Резниченко, Б.В. Горелик. — Харьков: УИПА, 2012. — 172 с.

2. Веризуб, М.В. Высокие технологии в машиностроении [Текст]: учеб. пособие / М.В. Веризуб, Е. Весткемпер, Ю.М. Внуков, А.И. Грабченко. — Харьков: ХГПУ, ХПИ, 1999. — 435 с.

© А.И. Долматов, О.Я. Мовшович, М.Д. Жолткевич

А.І. Долматов, д.т.н., проф.

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

О.Я. Мовшович, д.т.н., проф.

Національний технічний університет «ХПІ»

М.Д. Жолткевич, д.т.н., с.н.с.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ МАШИН

У статті розглянуті шляхи і методи ефективного підвищення експлуатаційних властивостей виробів машинобудування за рахунок покращення якості поверхневих шарів деталей, а також відповідного оснащення та інструменту, що використовується при обробці різними методами.

Ключові слова: *поверхневий шар, поверхневе зміцнення, різальний інструмент, методи нанесення покриттів, покриття, зносостійкість.*

A.I. Dolmatov, Doctor of Technical Sciences, Professor

National Aerospace University N.E. Zhukovsky «KHAI»

A.Ya. Movshovich, Doctor of Technical Sciences, Professor

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»

N.D. Zholtkevich, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

THE MAIN TRENDS TO IMPROVE RELIABILITY OF THE MACHINES

The article deals the ways and methods to effectively improve the performance properties of engineering products by improving the quality of the surface layers of parts, as well as used in the processing of the various methods of the corresponding equipment and instrument.

Keywords: *surface coating, surface strengthening, machining tool, coating methods, coating, wearability.*

В.А. Здор, д.т.н., с.н.с.

ПАО «Научно-производственное предприятие «Оснастка», г. Краматорск

Е.А. Фролов, д.т.н., проф., О.В. Бондарь, асп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫЕ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В статье приведены результаты исследований по разработке и внедрению универсально-сборной оснастки для сборно-сварочных работ трубопроводов сложной конфигурации для различных отраслей машиностроения и комплексной системы автоматизированной подготовки производства.

Ключевые слова: *оснастка, универсальные сборно-разборные приспособления, автоматизированная система технологической подготовки производства, сварка, сборка, модульность.*

Постановка проблемы. Производство трубопроводов представляет собой весьма сложный и важный этап в современном производстве. Это обусловлено необходимостью обеспечения высокой надежности функционирования гидрогазовых и топливных систем, постоянным увеличением номенклатуры трубопроводов, непрерывным изменением их конструкции, связанным с совершенствованием и сменой объектов производства. Особенно большое значение придается высокому качеству и взаимозаменяемости трубопроводов, что предлагает широкое использование приспособлений.

Загруженность любого инструментального производства не позволяет обеспечить выпуск необходимого количества специальной оснастки, особенно при значительном количестве номенклатуры изготавливаемых сварных изделий и частой смене объектов или модернизации изделий. Практика использования имеющихся на предприятиях машиностроительной отрасли комплектов универсально-сборных приспособлений (УСП) показала, что они плохо приспособлены для сборки под сварку трубопроводов особенно сложной конфигурации [1, 2].

Целью работы явилось создание универсально-сборной переналаживаемой оснастки для сварочно-сборных работ (УСРПС).

Основной материал статьи. При создании технологического оснащения было учтено следующие специфические особенности изготовления трубопроводов:

- большие габаритные размеры при малом весе;
- расположение элементов трубопровода под различными углами в пространстве;
- значительные сварочные напряжения.

Указанные причины привели к разработке комплекта УСРПС специально для сборки и контроля трубопроводов.

Разработке комплекта УСРПС предшествовал анализ специальных приспособлений и рабочей документации предприятию машиностроительной и авиационной отраслей промышленности Украины.

Комплекты УСРПС предназначены для сборки под сварку трубопроводов с габаритными размерами 1500×1000×1000 мм и диаметром собираемых труб от 4 до 80 мм. Гарантируемая точность сборки трубопроводов ±1 мм. Мощность комплекта — 20–30 одновременно собираемых компоновок.

Элементы выполнены из стали 40ХЛ методом точного литья по выплавляемым моделям, подвергнуты соответствующей термообработке и покрыты специальным защитным

покрытием поверхности от сварочных брызг. Это позволило увеличить срок службы элементов до 10–12 лет.

Компоновка приспособления, собранная из элементов УСРПС, представляет собой установленные на основании при помощи опор стойки из труб, на которых крепятся рабочие элементы-фиксаторы, призмы и др. Основание в зависимости от диаметра свариваемых труб собирается каркасным из труб или облегченных плит.

Задача разработки и внедрения комплексной автоматизированной системы технологической подготовки производства трубопроводов (АСТПП-Т) на предприятиях предъявляет к переналаживаемой оснастке новые требования. Концепция АСТПП-Т требует коренного пересмотра и расширения функциональных возможностей отдельных подсистем в плане их интеграции за счет применения единой математической модели трубопровода.

Отказ от сборки компоновки приспособления по трубопроводу-эталону, т. е. переход от предметного задания геометрии трубопровода к аналитическому в виде математической модели связан с нестабильностью эталонной информации, сложностью хранения и ведения эталонного хозяйства, а главное, с невозможностью использования эталона при внедрении системы автоматизированного проектирования приспособлений (САПР-Пр). Так как в этом случае создание компоновок осуществляется на принципиально новой основе в отличие от УСПС, собираемых по эталону, новая система должна быть координируемой и собираться по параметрам, выдаваемым ЭВМ, в виде кодов элементов и узлов приспособлений, а также линейных и угловых координат расположения их в рабочем пространстве приспособления.

Эффективное решение этой задачи дает представление компоновки приспособления в виде модульных реализаций, т. е. проектирование приспособлений по модульному принципу. Основой модульного проектирования является универсальная математическая модель типового функционального узла.

Таким образом, проектирование компоновки приспособления сводится к членению ее на отдельные функциональные конструктивные модули и определению размерных связей между ними. Это позволяет записать схему компоновки аналитически в виде таблицы.

Сложившаяся на предприятиях практика сборки сварочных приспособлений в большинстве случаев предполагает выбор компоновочного решения приспособления слесарем-сборщиком высокой квалификации. Чертеж или схема компоновки для последующего хранения, как правило, не делается. В лучшем случае делается фотография приспособления, которая не дает полного представления о конструкции.

Если после разборки приспособления возникает необходимость в его повторной сборке, то компоновка слесарем практически «разрабатывается» и собирается вновь. Выбор слесарем-сборщиком компоновочного решения зависит от субъективных факторов и не всегда оптимален.

Разработанная система переналаживаемых сборно-разборных приспособлений для сборки и контроля трубопроводов УСРПС в отличие от традиционных позволяет выбирать из альбома типовых конструктивных решений схему компоновки в виде типовых модулей и аналитически описать ее для последующего хранения. Причем в альбоме предлагается несколько конструктивных модулей одного функционального решения. Это связано с учетом наличия или отсутствия у слесаря-сборщика на момент сборки тех или иных элементов и узлов комплекта сборной переналаживаемой оснастки.

Табличный способ записи компоновки приспособления обуславливает следующие возможности: позволяет выбрать из альбома оптимальные компоновочные решения; позволяет иметь паспорт компоновки приспособления в виде таблицы; обеспечивает компактное хранение записи компоновки приспособления в виде таблицы; создает условия для сборки приспособления слесарем-сборщиком невысокого разряда.

Однако самое главное в использовании табличного способа записи компоновок приспособлений заключается в том, что он позволяет практически реализовать идею

автоматизированного проектирования сборочных приспособлений, так как выдача с ЭВМ чертежа или схемы компоновки приспособления связана с обработкой больших объемов графической информации, трудностями математического описания совокупности объемных элементов приспособления, решения задач определения видимости на проекциях чертежа и др.

При создании конструкции УСРПС были решены следующие научно-технические проблемы:

- 1) определены величины усилий, действующих на элементы конструкции компоновок;
- 2) исследованы зависимости напряженно-деформированного состояния элементов конструкции от их конструктивных параметров;
- 3) разработаны методики оптимального проектирования компоновок приспособлений;
- 4) разработана система автоматизированного проектирования схем компоновок приспособлений.

Выводы. Применение УСРПС на научно-производственном предприятии «Оснастка» (г. Краматорск) обеспечивало снижение объемов разработки и изготовления специальных приспособлений на 60–70 % и сокращение времени на оснащение сварочных и контрольных операций в 3–5 раз.

В настоящее время ведется постановка изготовления УСРПС комплектов на серийное производство.

Литература

1. Жолткевич, Н.Д. Основные направления развития переналаживаемой оснастки при ускоренной подготовке производства [Текст] / Н.Д. Жолткевич // *Материалы отраслевой научно-технической конференции.* – ЦНИТИ, Москва, 1993. – С 3–8.

2. Жолткевич, Н.Д. Основные тенденции развития высоких технологий в машиностроении [Текст] / Н.Д. Жолткевич, А.Я. Мовшиович, М.М. Буденный // *Вестник НТУ «ХПИ».* – 2001. – Вып. 11. – С. 3–12.

© В.А. Здор, Е.А. Фролов, О.В. Бондарь

В.О. Здор, д.т.н., с.н.с.

ПАТ «Науково-виробниче підприємство «Оснастка», м. Краматорськ

Є.А. Фролов, д.т.н., проф., О.В. Бондар, асп.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

УНІВЕРСАЛЬНО-ЗБІРНІ ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНІ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБОПРОВІДІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

У статті наведено результати досліджень із розробки та впровадження універсально-збірного оснащення для збірно-зварних робіт трубопроводів складної конфігурації для різних галузей машинобудування та комплексної системи автоматизованої підготовки виробництва.

Ключові слова: *оснащення, універсальні збірно-розбірні пристосування, автоматизована система технологічної підготовки виробництва, зварювання, складання, модульність.*

V.A. Zdor, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate
PubJSC «Research and Development enterprise «Osnastka», Kramatorsk

Ye.A. Frolov, Doctor of Technical Sciences, Professor, O.V. Bondar, Post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

UNIVERSAL PREFABRICATED RECONFIGURABLE DEVICES FOR MANUFACTURING PIPELINES COMPLEX CONFIGURATION

The article contains results of studies on the development and implementation of universal reconfigurable devices for assembly welding pipelines complex configuration for various branches of engineering and integrated automated preparation of production.

Keywords: machine-tool attachment, universal assembly and disassembly devices, generative planning system, welding, assembly, modularity.

УДК 621.98.044

Е.А. Фролов, д.т.н., проф., О.Г. Носенко, асп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

В. Вовк, д.т.н., проф.

Магдебургский университет Отто фон Герике, Германия

С.А. Григоренко

ПАО «Полтавский машиностроительный завод»

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ ОСОБО ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Предложена технология получения деталей из особо тонких материалов ($\leq 0,15$ мм) из неметаллических материалов (углепластик, стеклопластик, фольгированный материал) методом пневмоударной пробивки-вырубки с использованием комбинированных сред (жидкость, полиуретан, жидкость – полиуретан – лавсан). Предложенные схемы позволяют повысить качество деталей и стойкость штамповой оснастки.

Ключевые слова: штамповка, пробивка, вырубка, тонколистовые неметаллические материалы, пневмоударная штамповка, оснастка.

Введение. Получение деталей из особотонкого материала толщиной $\leq 0,15$ мм (углепластик, стеклопластик или фольгированный материал) в вырубных инструментальных штампах, вызывает значительные трудности. Для этого требуются практически беззазорные штампы, для изготовления которых необходимы большие материальные затраты. Стойкость таких штампов невелика, так как незначительный износ рабочих поверхностей инструмента ведет к браку изделия. Еще сложнее обстоит дело при вырезке деталей из алмазосодержащей фольги. Испытания штамповой оснастки в производственных условиях показали, что стойкость пары пуансон-матрица при вырезке, например, колец из такой фольги очень низкая: не более 10–15 деталей. Это объясняется тем, что в зазор между пуансоном и матрицей попадает фольга, а так как она содержит алмазный порошок,

то износ происходит очень быстро. Это приводит к резкому возрастанию себестоимости подобных деталей, что явно не удовлетворяет требованиям производства.

Постановка проблемы. Наиболее рациональный выход из этого затруднения — использование беспуансонных методов разделения листовых материалов, когда роль пуансона выполняет эластичная или жидкая среды [1]. Однако статическая вырезка деталей этими средами дала отрицательный результат, хотя стойкость такого штампа вполне удовлетворительна. В этом случае качество поверхности разделения не соответствует техническим требованиям чертежа. На рабочей кромке и посадочном диаметре появляются сколы, и такие детали непригодны к эксплуатации. Отрицательный результат получен и при использовании классической схемы высокоскоростной пробивки-вырубки, когда роль пуансона выполняет рабочая жидкость или полиуретан [2].

Импульсная волна, непосредственно воздействующая на материал заготовки, вызывает коробление детали вплоть до ее разрушения.

Целью исследования является разработка эффективной технологии получения тонколистовых деталей из углепластика и другого фольгированного материала методом беспуансонной пробивки-вырубки.

Основной материал статьи. Чтобы устранить вышеперечисленные недостатки, нами разработана и апробирована схема пневмоударной штамповки на усовершенствованном пневмоударном оборудовании модели ТА-1324 (рис. 1) с комбинацией двух передающих сред: жидкость–полиуретан.

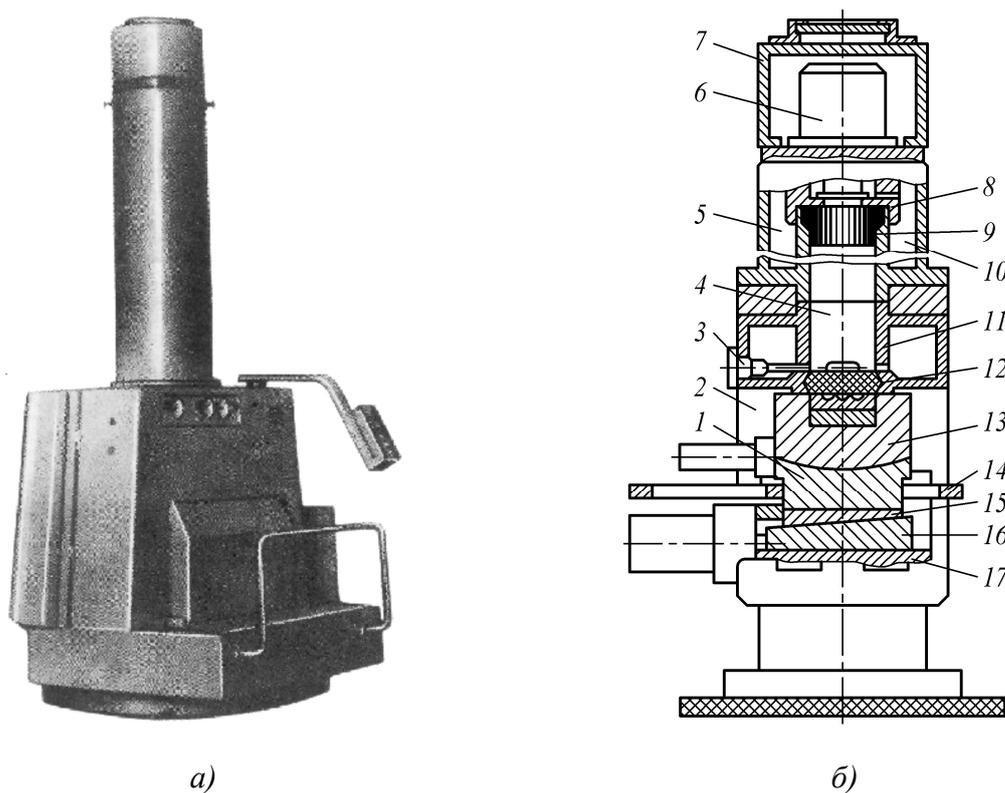


Рис. 1. Серийное пневмоударное оборудование штамповки полиуретаном ТА-1324 (а) и ударный блок машины ТА-1324 (б):

- 1 – технологический блок; 2 – щека; 3 – дозатор; 4 – рабочая камера; 5 – энергетический блок;
6 – механизм пуска; 7 – глушитель; 8 – цапга; 9 – боек; 10 – аккумулятор; 11 – ствол;
12 – эластичная среда (полиуретан); 13 – контейнер; 14 – стол; 15 – контрклин;
16 – клин; 17 – основание

Давление от жидкости передается полиуретану, которым заготовка прижимается к матрице. При такой схеме полиуретан выполняет двойную роль: гасит импульс давления,

осуществляет надежный прижим заготовки и вырезку качественных деталей из вышеперечисленных материалов.

Однако в случае алмазосодержащей фольги качество режущей кромки получается удовлетворительным, однако перед работой таких деталей требуется их правка в целях удаления небольшого (порядка 0,1...0,5 мм) дефектного слоя. Это происходит из-за того, что процесс вырезки происходит в такой последовательности: давление через жидкость передается полиуретану, который прижимает заготовку к зеркалу матрицы, а в зазоре, между матрицей и опорным кольцом, происходит небольшой прогиб заготовки; на режущей кромке создается концентрация напряжений, и под действием дальнейшего перемещения эластичной среды заготовка разрушается именно на кромке матрицы. Но и после разделения заготовки эластичная среда продолжает затекать в этот зазор. Коэффициент же трения между эластичной средой и заготовкой в несколько раз превосходит коэффициент трения между матрицей и заготовкой. Поэтому эластичная среда уже после вырезки детали втягивает материал в полость матрицы. А так как алмазосодержащая фольга очень хрупкая, то на режущей кромке она обламывается. И хотя эти перемещения небольшие (до 0,5 мм), все же требуется дополнительная операция по правке таких деталей.

Для устранения этого недостатка между заготовкой и эластичной средой мы размещаем пленку из искусственного материала типа лавсана. Фактически в этом случае используется новая схема, а именно, комбинация из трех передающих сред: жидкость – полиуретан – лавсан. Использование пленки уменьшает коэффициент трения, и горизонтального усилия уже недостаточно, чтобы растянуть материал заготовки. Детали, вырезанные по такой схеме (рис. 2), отвечают всем техническим требованиям чертежа. Вырезка происходит одновременно по всему контуру, и не требуется дополнительной правки этих деталей перед их работой.

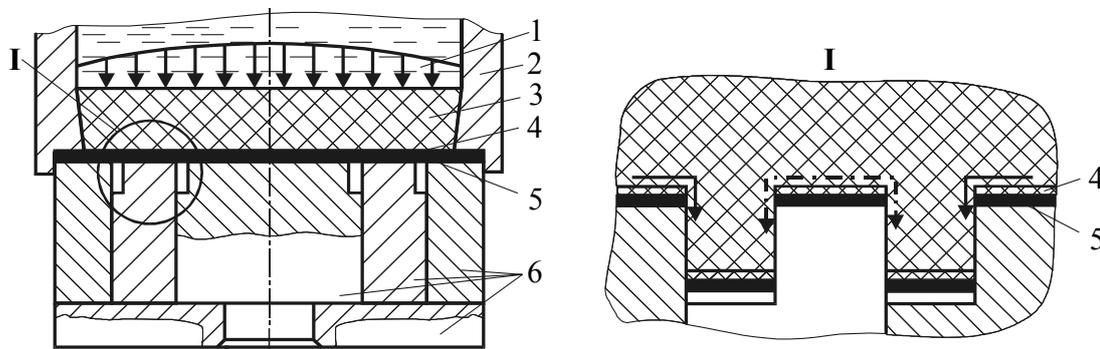


Рис. 2. Схема вырезки колец при комбинации трех передающих сред:

1 – рабочая жидкость; 2 – рабочая камера; 3 – полиуретан;
4 – лавсан; 5 – заготовка; 6 – матрица

Выводы

1. Опыт промышленной апробации предложенной схемы пневмоударной штамповки комбинированными средами показал, что стойкость штамповой оснастки увеличилась в несколько десятков раз по сравнению со стойкостью инструментальных штампов и составляет порядка 10^3 деталей до первой переточки пробивного или вырубного шаблонов.

2. В качестве оснастки для выполнения операций пневмоударной пробивки–вырубки не требуется сложной материалоемкой оснастки.

Литература

1. Ланской, Е.Н. Эффективность высоких технологий в массовом производстве [Текст] / Е.Н. Ланской // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 1. – С. 31–34.
2. Кривцов, В.С. Концепция создания технологических систем производства деталей летательных аппаратов с использованием импульсных методов обработки: дис. ... док. техн. наук / Кривцов Владимир Станиславович. – К., 1998. – 312 с.
3. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами [Текст]: моногр. / Е.А. Фролов, А.Я. Мовшович, И.В. Манаенков, А.Ф. Тарасов, Л.Л. Роганов. – Х.: УкрГАЗТ, – Краматорск: ДГМА, 2010. – 287 с.

© Е.А. Фролов, О.Г. Носенко, В. Вовк, С.А. Григоренко

Є.А. Фролов, д.т.н., проф., О.Г. Носенко, асп.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

В. Вовк, д.т.н., проф.

Магдебургський університет Отто фон Геріке, Німеччина

С.О. Григоренко

ПАТ «Полтавський машинобудівний завод»

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ШТАМПУВАННЯ ОСОБЛИВО ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РОЗДІЛЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ

Запропоновано технологію отримання деталей з особливо тонких матеріалів ($\leq 0,15$ мм) із неметалевих матеріалів (вуглепластик, склопластик, фольгований матеріал) методом пневмоударного пробивання-вирубки з використанням комбінованих середовищ (рідина, поліуретан, рідина – поліуретан – лавсан). Запропоновані схеми дозволяють підвищити якість деталей та стійкість штампового оснащення.

Ключові слова: штампування, пробивання, вирубка, тонколистові неметалеві матеріали, пневмоударне штампування, оснащення.

Ye.A. Frolov, Doctor of Technical Sciences, Professor, O.G. Nosenko, Post-graduate

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

V. Vovk, Doctor of Technical Sciences, Professor

Otto-von-Guericke University Magdeburg, Germany

S.A. Grigorenko

PJSC «Poltava Machine Building Plant»

METHODS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF STAMPING TECHNOLOGY ESPECIALLY SUBTLE DETAILS OF THE NON-METALLIC MATERIALS DURING DIVIDING OPERATIONS

It was proposed the technology of obtaining details of particularly thin materials (up to 0.15 mm) of non-metallic materials (carbon plastic, fiberglass, foil material) by pneumatic percussive punching-cutting with using a combination of media (liquid, polyurethane, liquid – polyurethane – lavsan). The proposed schemes allow increasing the quality of parts and durability of die tooling.

Keywords: die forming, punching, light-gage nonmetallic materials, pneumatic-mechanical forming, machine-tool attachment.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА

Приведен обзор конструкций инструмента для вытяжки деталей из листового материала, показаны его конструктивные преимущества и недостатки, показано влияние различных конструктивных параметров матрицы и пуансона на напряженно-деформированное состояние при вытяжке.

Ключевые слова: пуансон, матрица, заготовка, вытяжка.

Введение. Процессы листовой штамповки получили широкое применение в различных отраслях промышленности, благодаря высокой производительности и экономической эффективности. В автомобильной промышленности значительное количество деталей разнообразных форм изготавливается операцией вытяжки, для которой, особенно актуальной является задача разработки научных основ построения рациональных технологических процессов, дающих минимальные трудоемкость и себестоимость изготовления заданных деталей при наилучшем их качестве. Проектирование и отладка технологических процессов с операциями вытяжки часто связаны с большими трудностями. При вытяжке возможное формоизменение заготовки, как правило, ограничивается ее разрушением в том месте, где действуют наибольшие по величине растягивающие напряжения $\sigma_{p \max}$, поэтому при изучении операции вытяжки особое внимание уделяется выяснению факторов, влияющих на величину $\sigma_{p \max}$, и оценке степени этого влияния. Особое направление рационального построения или улучшения процесса вытяжки заключается в создании наиболее благоприятных условий деформирования металла с целью снижения растягивающих напряжений в опасном сечении [1, 2].

Обзор последних источников исследований и публикаций. Получение деталей вытяжкой без прижима имеет ряд преимуществ перед вытяжкой с прижимом — упрощение конструкции матрицы, уменьшение усилия вытяжки, снижение расходов на технологическую подготовку производства и наладку. Большой вклад в разработку и изучение данного вопроса внесли отечественные ученые Е.А. Попов [1], М.В. Сторожев [2], в работах которых приводятся методики определения напряженно-деформированного состояния, определение границ использования различных методов вытяжки, влияние различных факторов процесса на получение качественных деталей, В.П. Романовский [3], М.Е. Зубцов [4], где рассматриваются различные конструкции инструмента для интенсификации вытяжки.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В зависимости от способа штамповки (с прижимом или без прижима) стараются путем изменения конструктивных параметров матрицы и пуансона уменьшить или увеличить величину меридиональных растягивающих напряжений. В первом случае для предотвращения разрушения заготовки в опасном сечении, во втором случае для обеспечения устойчивости фланца.

Постановка задачи. Расширить возможности бесприжимной листовой штамповки возможно путем критического анализа существующих конструкций штампов для вытяжки и формы заготовок, формирования на основе этого общих рекомендаций и подходов к проектированию штамповой оснастки и технологических переходов вытяжки.

Основной материал и результаты. Для того чтобы можно было работать при большом (выгодном) радиусе закругления матрицы (большие радиусы закругления дают возможность уменьшить коэффициенты вытяжки и сократить число операций), не опасаясь образования складок, применяют штампы с дополнительным радиусным (тороидальным) прижимом, который во время работы прижимает заготовку и по закругленной части матрицы [4] (рис. 1).

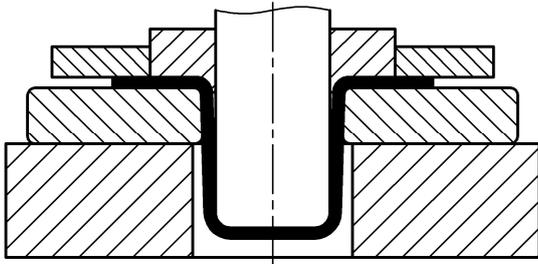


Рис. 1. Конструкция штампа с дополнительным радиусным прижимом

Подобный способ вытяжки уменьшает растяжение материала в опасном сечении (у дна) изделия, увеличивает степень деформации при вытяжке (уменьшает коэффициенты вытяжки), устраняет складкообразование и несколько уменьшает максимальное усилие вытяжки, вследствие чего стойкость штампа повышается. Недостатком этого способа является трудность изготовления радиусного прижима, что несколько ограничивает его применение.

При вытяжке цилиндрических деталей без прижима и без утонения стенок из относительно толстого материала (при $(s/D) \cdot 100 > 2,0$) на первой операции рабочая часть матрицы выполняется либо по сферической поверхности (с радиусом закругления r_m на рис. 2, а), либо по конической, переходящей через закругление r_m в цилиндрическую часть (рис. 2, б). Угол наклона входной части матрицы с одной стороны к вертикали составляет обычно 30° (дополнительный угол к горизонтали составляет 60°). На последующих операциях при работе без прижима (при $(s/d_{n-1}) \cdot 100 > 1,5$) рабочая часть матрицы выполняется по сферической поверхности (с радиусом r_{nm} рис. 2, в). Цилиндрическая часть матрицы для сравнительно небольших размеров деталей ($d < 50$ мм) изготавливается высотой $a = 6 \dots 15$ мм; выемка $b = (2 \dots 10) \cdot s$; просвет t — не менее $1,5 \dots 2$ мм [5].

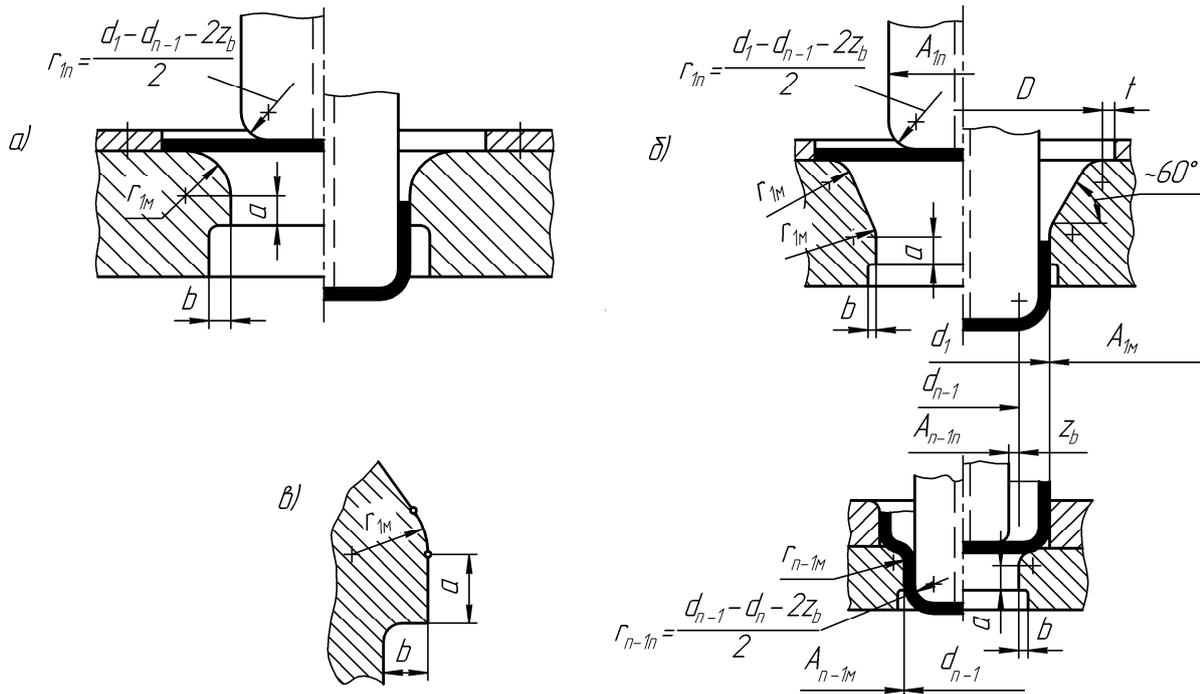


Рис. 2. Рабочие части штампа

Применение конической матрицы для штамповки без прижима позволяет увеличить площадь соприкосновения заготовки с поверхностью матрицы во время деформации, тем самым увеличить силы трения и соответственно растягивающие меридиональные напряжения, что обеспечивает вытяжку без складкообразования.

В последнее время на первых операциях вытяжки без прижима вместо конического захода стали применять матрицы, у которых рабочая поверхность выполнена по форме эвольвенты, на которой расположены кольцевые канавки в виде ступенек (рис. 3) [3]. Такая форма рабочей полости матрицы позволяет достигнуть более высокой степени деформации

за одну операцию. Ступенчатая форма профиля способствует при вытяжке без прижима лучшему удержанию смазки на поверхности штампуемой детали [3], что несколько уменьшает контактное трение, а, следовательно, и несколько повышает стойкость матрицы.

С целью устранения утолщения металла по высоте и увеличения глубины вытяжки на первой операции применяют штампы с конусным складкодержателем и конструкцией матрицы показанной на рис. 4, [4].

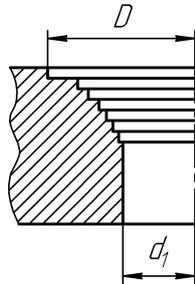


Рис. 3. Конструкция матрицы для первого перехода

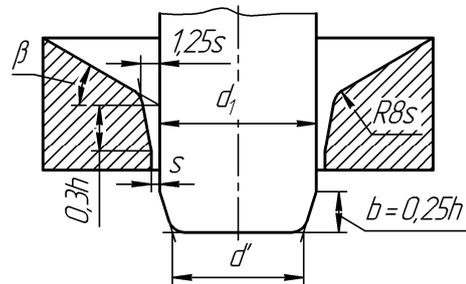


Рис. 4. Конструкция матрицы при вытяжке детали с большим фланцем

Интенсификация процесса вытяжки в этом случае объясняется двумя причинами: 1) конусный складкодержатель, осуществляя формовку заготовки, позволяет за одну операцию произвести двухпереходную вытяжку (конусная чашка-стакан); 2) применение конусного складкодержателя уменьшает угол охвата вытяжной кромки матрицы заготовкой, что, в свою очередь приводит к снижению напряжений. Зазор между пуансоном и матрицей в нижней части матрицы позволяет получить толщину стенки у верха вытянутого стакана – заготовки, равную толщине исходной заготовки. Выравнивание толщины в этом случае происходит в период, когда усилие вытяжки значительно меньше максимального.

При вытяжке деталей с широким фланцем во избежание чрезмерного возрастания давления прижима необходимо уменьшать контактную площадь прижима, что достигается применением буртика на матрице (рис. 5, слева) или выточки на прижиме (рис. 5, справа). Высота буртика или выемки $c = (0,2 \dots 0,5) \cdot s$ [4].

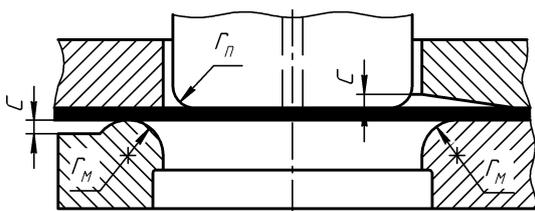


Рис. 5. Конструкция прижима при вытяжке детали с большим фланцем

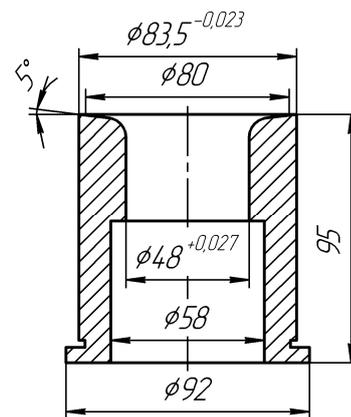


Рис. 6. Матрица с конусным торцом

Для повышения качества поверхности деталей и обеспечения высокой стойкости матриц при вытяжке осесимметричных деталей применяется конструкция вытяжной матрицы с конусным торцом $\alpha = 5^\circ$ и плоским прижимом рис. 6, [6].

Перспективным направлением в обработке металлов давлением является создание дополнительных напряжений в процессе деформирования. Вытяжка с дополнительным нагружением позволяет разгрузить опасное с точки зрения разрушения сечение. Для этого к кромке заготовки прикладывается сжимающая нагрузка, действующая в радиальном

направлении и заталкивающая заготовку в отверстие матрицы, в результате чего приложенное к пуансону усилие вытяжки уменьшается. Для дополнительного нагружения используют разнообразные устройства.

В устройстве, показанном на рис. 7, а, радиальный подпор создается при сжатии эластичного (например, полиуретанового) кольца 6 усилием P , приложенным к прижимному кольцу 5. Высота кольца 6 при этом уменьшается и происходит перемещение его материала в направлении отверстия матрицы. Кромка заготовки дополнительно нагружается, а пуансон 4 втягивает заготовку 1 в отверстие матрицы 2.

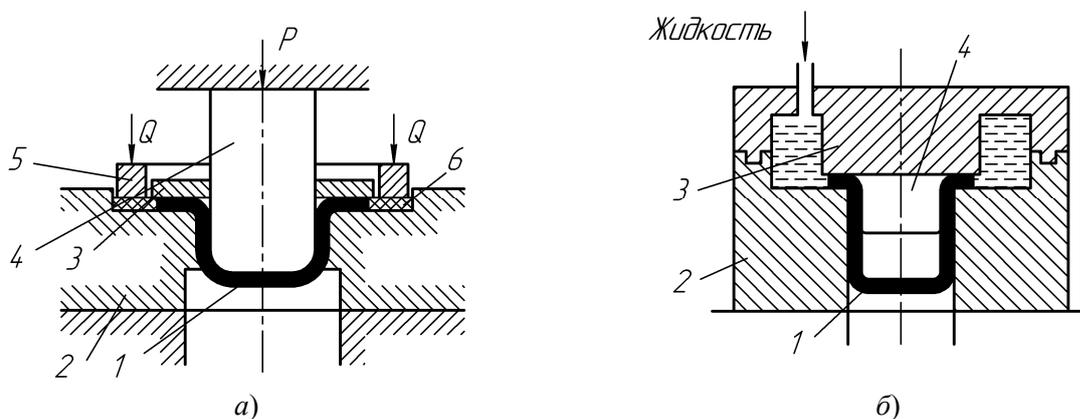


Рис. 7. Устройство для вытяжки с дополнительным нагружением в радиальном направлении:
а) с помощью эластичного элемента; б) жидкостью высокого давления

На рис. 7, б жидкость, оказывая давление на торцевую поверхность заготовки, выдавливает последнюю в зазор между пуансоном и матрицей, в результате чего образуется деталь типа стакана. При такой схеме нагружения радиальные растягивающие напряжения; вызывающие разрушение заготовки, отсутствуют, вследствие чего могут быть получены детали с отношением высоты к диаметру, равным 7...10. Строго говоря, этот процесс уже не является вытяжкой и более правильно назвать его прессованием.

Выводы. Из изложенного выше следует, что изменением геометрических параметров рабочих частей вытяжных штампов и приложением дополнительного воздействия можно добиться значительного влияния на напряженно-деформированное состояние различных по конфигурации деталей, улучшить качество вытяжки и повысить стойкость штампов. Разработка технологических процессов должна базироваться на расчете действительных напряжений с учетом важнейших технологических факторов — смазка, геометрия вытяжных штампов и т. п. Для операций вытяжки без прижима следует увеличивать меридиональные напряжения путем увеличения сил трения на контактных поверхностях, что достигается за счет формы и геометрии матрицы.

Литература

1. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст] / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.
3. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
4. Зубцов, М.Е. Стойкость штампов [Текст] / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
5. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка [Текст] / Под общ. ред. Л.И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.
6. Королев, В.И. О влиянии геометрических параметров инструмента на способность к глубокой вытяжке тонколистового молибдена и его сплавов [Текст] / В.И. Королев, А.И. Галахов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 4. – С. 17–18.

7. Калюжний, О.В. Визначення максимального зусилля деформування та потовщення фланця при витягуванні з диференційованим радіальним підпором фланця [Текст] / О.В. Калюжний // *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 38–44.*

8. Ершов, В.И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки [Текст] / В.И. Ершов, В.И. Глазков, М.Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.

© Р.Г. Аргат

Р.Г. Аргат, ст. викл.

Кременчуцкий национальный университет им. Михаила Остроградского

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИТЯЖКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ З МЕТОЮ УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ

Наведено огляд конструкції інструменту для витягування деталей з листового матеріалу, показані його конструктивні переваги і недоліки, показано вплив різних конструктивних параметрів матриці і пуансона на напружено-деформований стан при витягуванні.

Ключові слова: пуансон, матриця, заготівля, витяжка.

R.G. Argat, Senior Lecturer

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

STRUCTURAL ANALYSIS TOOL FOR EXTRACT CYLINDRICAL PARTS IN ORDER TO IMPROVE THEIR DESIGN FOR INTENSIFICATION OF THE PROCESS

The review of design tool to extract parts from sheet material, showing its design advantages and disadvantages, showing the effect of various design parameters of the die and punch on the stress-strain state of the draw.

Keywords: punch, die, billet, extract.

УДК 621.7.044

Т.В. Гайкова, ст. преп., Р.Г. Пузырь, к.т.н., доц.

Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКЛАДКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ НИЗКИХ КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Приведены результаты теоретических исследований, направленные на исследование вытяжки коробчатых деталей за один переход и выявлены основные конструктивные и технологические параметры процесса, влияющие на складкообразование во фланцевой части заготовки, определены зоны возможного возникновения складок на начальном этапе деформирования.

Ключевые слова: вытяжка, заготовка, деформация, напряжения, перемещения.

Введение. Применение деталей типа тонколистовых коробок нашло широкое распространение во всех отраслях промышленности, включая машиностроение, автомобилестроение, авиастроение, приборостроение и т. д. (поддоны металлорежущих станков, топливные баки, крышки люков, корпуса приборов, электрические контакты). Поэтому

и размеры таких деталей имеют широкий диапазон — от нескольких миллиметров в длину до нескольких метров и толщину стенки от десятых долей до десятка миллиметров. Вытяжка коробчатых деталей из листовых заготовок является наиболее эффективным и экономичным способом получения выше перечисленных деталей [1], но для повышения ее эффективности необходимо уточнить условия возникновения складок во фланце заготовки и выявить технологические параметры штамповки, позволяющие свести складкообразование к минимуму.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Вопросу исследования поведения коробчатого полуфабриката во время деформации посвящено большое количество публикаций [2–6]. Так в работах [2–4] излагаются основы определения напряженно-деформированного состояния элементов заготовки при вытяжке коробок, освещаются вопросы влияния упрочнения, анизотропии, геометрии заготовки и инструмента на возникновение опасных зон с локализацией деформаций. В работах [5, 6] изложен новый метод расчета формы заготовки для вытяжки с целью оптимизации влияния геометрических размеров заготовки на поле напряжений и деформаций по контуру.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Для борьбы со складкообразованием при вытяжке коробчатых деталей применяют прижимы и перетяжные пороги [2–4]. Но в приведенных работах не в полной мере изложены теоретические и экспериментальные данные о влиянии различных параметров вытяжки на складкообразование, что не дает возможности управлять образованием складок и фестонов, изменяя входные параметры технологического процесса, прогнозировать их появление.

Постановка задачи. Целью данного исследования является установление закономерностей появления складок, путем решения задачи деформирования прямоугольной пластины методом разделения переменных, что даст возможность прогнозировать их появление, форму и количество, а также выявить технологические приемы для устранения или уменьшения данного явления.

Основной материал и результаты. Для получения формальных зависимостей будем пользоваться методикой, изложенной в работе [7].

В качестве граничных условий примем, что края пластинки могут свободно смещаться в плоскости пластинки и что в связи с этим опорные реакции на краях должны быть нормальны к пластинке. Расположив координатные оси x и y в срединной плоскости пластинки, ось же z направив перпендикулярно к этой плоскости, рассмотрим элемент, вырезанный из пластинки, как показано на рис. 1 двумя парами плоскостей, параллельных плоскостям xz и yz .

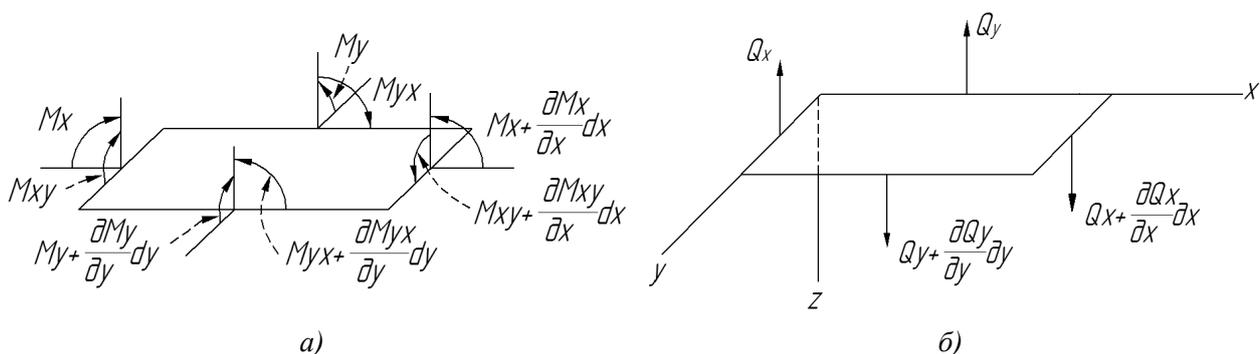


Рис. 1. Усилия, действующие на элемент пластинки при деформации:
а – моменты; б – перерезывающие силы

Так как пуансон действует на часть заготовки, то следует рассмотреть действие нагрузки, распределенной по верхней поверхности пластинки. Интенсивность этой нагрузки обозначим через q , так что нагрузка, действующая на элемент поверхности, будет равна $q dx dy$ (рис. 2).

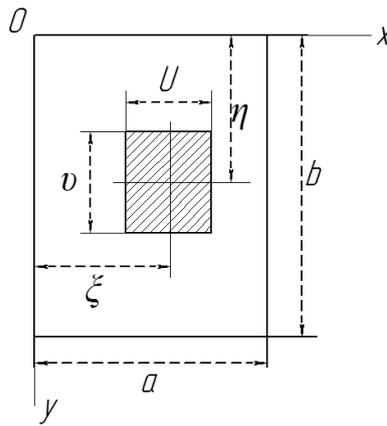


Рис. 2. Расчетная схема равномерно нагруженной пластинки

Проектируя все приложенные к элементу силы на ось z и взяв моменты от всех действующих на элемент сил относительно оси x и y , а также исключив из этих уравнений перерезывающие силы Q_x и Q_y в работе [7] было получено следующее уравнение равновесия

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{yx}}{\partial x \partial y} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} = -q. \quad (1)$$

Для того чтобы представить это уравнение как функцию прогибов w пластинки, представим моменты следующим образом

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \quad M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad (2)$$

где D – жесткость пластинки определяемая уравнением $D = Eh^3/[12(1 - \nu^2)]$; E – модуль упругости материала; ν – коэффициент Пуассона; h – толщина пластины.

$$M_{xy} = -M_{yx} = D(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (3)$$

Подставляя эти выражения в уравнение (1), найдем

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D}. \quad (4)$$

Задача об деформировании пластинки поперечной нагрузкой q сводится к интегрированию уравнения (4). Если для какого-либо частного случая решение этого уравнения найдено и оно удовлетворяет условиям на краях пластинки, то изгибающий и крутящий моменты могут быть вычислены из уравнений (2) и (3), а затем соответствующие им нормальные и касательные напряжения.

Для решения уравнения (4) представим функцию нагрузки $f(x, y)$ в виде двойного тригонометрического ряда

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (5)$$

где $a_{mn} = \frac{4P}{abuv} \int_{\xi-u/2}^{\xi+u/2} \int_{\eta-u/2}^{\eta+u/2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy$ [7], отсюда

$$a_{mn} = \frac{16P}{\pi^2 m n u v} \sin \frac{m\pi \xi}{a} \sin \frac{n\pi \eta}{b} \sin \frac{m\pi u}{2a} \sin \frac{n\pi v}{2b}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (5) в (4) и учитывая (6) получим окончательно

$$w = \frac{16P}{\pi^4 abuvD} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b} \sin \frac{m\pi u}{2a} \sin \frac{n\pi v}{2b}}{(m^2/a^2 + n^2/b^2)} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (7)$$

где $m = 1, 3, 5, \dots$ и $n = 1, 3, 5, \dots$

Выводы. С помощью полученной зависимости можно прогнозировать возникновение прогибов и возможного складкообразования в зависимости от усилия деформирования, длины и ширины заготовки, размеров пуансона, толщины пластины в любой точке на свободных от нагружения поверхностях заготовки. При переходе в пластическую область картина прогибов и напряженно-деформируемого состояния существенно не изменится, что дает возможность приближенно судить о возможности получения коробчатых деталей с наименьшим фестоно и складкообразованием.

Литература

1. Афонькин, М.Г. Производство заготовок в машиностроении [Текст] / М.Г. Афонькин, М.В. Магницкая. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 256 с.
2. Аверкиев, Ю.А. Технология холодной штамповки [Текст] / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
3. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст] / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
4. Шофман, Л.А. Элементы теории холодной штамповки [Текст] / Л.А. Шофман. – М.: Оборонгиз, 1952. – 335 с.
5. Стеблюк, В.І. Визначення параметрів напружено-деформованого стану при витягуванні коробчастих деталей із заготовок, розрахованих методом потенціалу [Текст]: зб. наук. пр. / В.І. Стеблюк, М.В. Павлюк, О.В. Холявік // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», – 2012. – № 46 (952). – С. 98–101.
6. Стеблюк, В.І. Побудова контуру заготовки на основі математичної моделі процесу витягування порожнистих виробів коробчастої форми [Текст]: сб. науч. тр. / В.І. Стеблюк, О.В. Холявік // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 63–66.
7. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

© Т.В. Гайкова, Р.Г. Пузырь

Т.В. Гайкова, ст. викл., Р.Г. Пузырь, к.т.н., доц.

Кременчучський національний університет ім. Михайла Остроградського

ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДКОУТВОРЕННЯ ПРИ ВИТЯГУВАННІ НИЗЬКИХ КОРОБЧАСТИХ ДЕТАЛЕЙ

Наведено результати теоретичних досліджень, спрямовані на дослідження витягування коробчастих деталей за один перехід і виявлено основні конструктивні й технологічні параметри процесу, що впливають на складкоутворення у фланцевій частині заготовки, визначені зони можливого виникнення складок на початковому етапі деформування.

Ключові слова: витягування, заготовка, деформація, напруження, переміщення.

T.V. Gaikova, Senior Lecturer, R.G. Puzyr, Ph.D., Associate Professor

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

PREDICTION FOLDING THE DRAW BOX-SHAPED LOW BLANKS

Theoretical studies aimed at the study of drawing box-like parts in a single transition, and identified the main design and process parameters that affect the folding of the flange portion of the blank defined zone of possible occurrence of wrinkles at an early stage of deformation.

Keywords: extraction, blank, strain, stress, displacement.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

Приведены теоретические исследования по усовершенствованию методики определения крутящего момента профилировочных машин при изготовлении ободьев колес методом радиально-ротационного профилирования, основанные на определении нижней границы усилия профилирования.

Ключевые слова: обод колеса, усилие, крутящий момент, профилирование.

Введение. Ободья колес транспортных средств, сельскохозяйственной техники, прицепов, тракторов изготавливаются в Украине на ОАО «Кременчугский колесный завод» и в условиях жесткой конкуренции с производителями Италии, Германии, Турции, Китая, России не всегда удовлетворяют запросам заказчика и не выдерживают ее. Поэтому снижение себестоимости колеса, основную часть которой составляет материал, из которого оно изготовлено, с улучшением эксплуатационных характеристик позволит улучшить положение на рынке и укрепить позиции отечественного производителя. Себестоимость изделия состоит из таких слагаемых как затраты на материалы, на изготовление, хранение, перевозку и сбыт и уменьшение одного из слагаемых обеспечит снижение себестоимости в целом [1]. Правильный расчет энергосиловых параметров профилировочных машин (усилий, крутящих моментов, мощности) позволит на стадии проектирования выбирать имеющееся оборудование оптимальной мощности, тем самым снизить технологическую себестоимость изготовления обода, путем экономии энергоресурсов.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Методика расчета крутящих моментов машин для радиально-ротационного профилирования в работе [2] основывается на расчете усилия деформирования с учетом контакта заготовки с верхним и нижним профилировочным роликом и сводится к произведению усилия на плечо действия сил. Зависимость для расчета крутящего момента имеет вид

$$M_{кр} = 0,125 \left(\frac{\pi \alpha_B}{90^\circ} \right)^2 R_B^2 m t_{min} \sigma_i, \quad (1)$$

где α_B – угол охвата ролика заготовкой; R_B – радиус внутреннего ролика; m – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации; t_{min} – толщина заготовки; σ_i – интенсивность напряжений.

Зависимость для расчета потребного крутящего момента в работе [3] основывается на учете изменения толщины заготовки в процессе деформирования и имеет вид

$$M_{кр} = kRR' \left[\left(\int q_i \varphi d\varphi \right) + \frac{q_i^+ h_3^+ - q_i^- h_3^-}{2R'} \right], \quad (2)$$

где k – коэффициент трения качения; R – радиус профилировочного ролика; R' – деформированный радиус вала;

$$R' = R \left[\frac{(1 + 2c \cdot q_i)}{(h^+ - h^-)} \right];$$

c – коэффициент жесткости (для стали $c = 0,04175 \text{ м} \cdot \text{Н}^{-1}$); q^+ , q^- , h_3^+ , h_3^- – толщины и давления на элемент заготовки на входе и выходе из очага деформации, т. е. за изменение радиу-

са заготовки при внедрении ролика в последнюю на величину подачи; φ – угол захвата заготовки роликом $\arccos \varphi = 1 - (\Delta h/d)$; Δh – обжатие заготовки; d – диаметр ролика.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Обе зависимости позволяют с достаточной степенью точности вычислить крутящие моменты при профилировании и могут использоваться для предварительных расчетов при выборе оборудования. Для проверочного расчета крутящих моментов, на наш взгляд, необходимо учитывать локальность приложения нагрузки при получении ободьев колес.

Постановка задачи. Данное исследование направлено на уточнение ранее полученных методик расчета крутящих моментов профилировочных машин и получения аналитических зависимостей, пригодных для инженерных расчетов.

Заготовку обода колеса рассматривали как тонкую оболочку средней длины. Для анализа напряженно-деформированного состояния использовали положения и гипотезы технической теории тонких оболочек и полубезмоментной теории В.З. Власова [4].

Основной материал и результаты. Находим напряжение, которое вызывает пластическую деформацию заготовки при действии поверхностной нагрузки [5]. Давление деформирующего инструмента на цилиндрическую поверхность заготовки, учитывая локальность приложения нагрузки:

$$\text{при } -\varphi \leq \varphi \leq \varphi_0, \quad q = q_{\max} (\cos \varphi - \cos \varphi_0),$$

$$\text{при } \varphi_0 \leq \varphi \leq (2\pi - \varphi_0), \quad q = 0.$$

Разложим поверхностную нагрузку в ряд по φ :

$$q = q_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} \bar{q}_k \cos k\varphi. \quad (3)$$

Интегрируя правую и левую части равенства от 0 до 2π , найдем q_0 :

$$\int_{-\varphi_0}^{+\varphi_0} q_{\max} (\cos \varphi - \cos \varphi_0) d\varphi = q_0 2\pi,$$

$$q_0 = \frac{q_{\max}}{2\pi} [2 \sin \varphi_0 - 2\varphi_0 \cos \varphi_0].$$

Для определения коэффициента q_k произвольного члена ряда умножим правую и левую части равенства (2) на $\cos k\varphi$ и проинтегрируем от 0 до 2π :

$$\int_{-\varphi_0}^{+\varphi_0} q_{\max} (\cos \varphi - \cos \varphi_0) \cos k\varphi d\varphi = \int_0^{2\pi} \bar{q}_k \cos^2 k\varphi d\varphi,$$

$$\bar{q}_k = \frac{2q_{\max}}{\pi} w_k,$$

где при $k \neq 1$ $w_k = \frac{\sin[(k+1)\varphi_0]}{2(k+1)} + \frac{\sin[(k-1)\varphi_0]}{2(k-1)} - \frac{\sin k\varphi_0 \cos k\varphi_0}{k}$; при $k = 1$ $w_k = \frac{\varphi_0}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\varphi_0$.

Определим q_{\max} , которое необходимо для создания локальной пластической деформации заготовки. Для этого используем уравнения равновесия тонкой цилиндрической оболочки [6]

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - \left(\sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2\tau \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\delta \sigma_y}{R} \right) h = 0, \quad (4)$$

где M_x , M_y , H – изгибающие и крутящий моменты; σ_x , σ_y – нормальные напряжения, действующие в направлении OX и OY ; τ – касательное напряжение, действующее в плоскости XOY ; w – прогиб оболочки в направлении радиуса; $\delta \sigma_y$ – приращение нормальных напряжений; R , h – радиус и толщина стенки заготовки.

Принимая для w выражение

$$w = A \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} \quad (5)$$

и вводя функцию напряжений

$$\Phi = B \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} \quad (6)$$

в работе [5] было получено выражение для расчета напряжений σ_y , вызывающих пластическую деформацию заготовки

$$\sigma_y = \frac{2}{3} \frac{\pi^2 E_c h R}{L^2}. \quad (7)$$

где R – радиус заготовки; L – длина заготовки; h – толщина заготовки; E_c – секущий модуль соответствующий применяемому материалу.

Тогда усилие, соответствующее распределенной нагрузке

$$P = q \frac{\pi R}{2} = \frac{\pi^2 E_c h^2 R^2}{4L^2} [2 \sin \varphi_0 - 2\varphi_0 \cos \varphi_0] + \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{2}{3} \frac{\pi^2 E_c h^2 R^2}{L^2} w_k \cos k\varphi. \quad (8)$$

Первое слагаемое мало по сравнению со вторым в выражении (8) и его можно не учитывать, тогда формула для расчета крутящего момента с учетом плеча действия сил

$A = R_b \sin \frac{\varphi}{2}$ будет иметь вид

$$M_k = \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{2}{3} \frac{\pi^2 E_c h^2 R^2}{L^2} w_k \cos k\varphi R_b \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (9)$$

Потребный крутящий момент для осуществления процесса с учетом преодоления сил трения в подшипниках профилировочного ролика составил в соответствии с рекомендациями [7]

$$M_{кр.потр} = M_k + P(f + \mu_c d_{ш}), \quad (10)$$

где $d_{ш}$ – диаметр шейки профилировочного ролика; μ_c – коэффициент трения скольжения в опорах роликов профилировочной машины; f – коэффициент трения качения роликов по заготовке.

Таким образом, методика определения крутящего момента состоит в следующем:

1. Определяем угол охвата ролика заготовкой: $\arccos \varphi = 1 - (\Delta h/D)$, где Δh – обжатие заготовки (определяется как отношение подачи силового вала на оборот обечайки к диаметру заготовки); D – диаметр ролика.

2. Вычисляем коэффициент w_k .

3. Все данные подставляем в формулу (10) и вычисляем потребный крутящий момент.

4. Сравниваем полученное значение момента с паспортными данными профилировочной машины, должно выполняться неравенство $M_{кр.потр} \leq M_{пасп.}$

Отличие полученной зависимости (10) от предложенных ранее (1) и (2) состоит в том, что крутящий момент зависит от квадрата длины контакта заготовки с инструментом, что соответствует физической сущности явлений, происходящих в очаге деформации. И чем больше длина контакта, тем меньше потребный крутящий момент. Это подтверждается экспериментальными исследованиями.

Выводы. Таким образом, проведенные теоретические исследования позволили установить зависимость крутящего момента профилировочной машины от конструктивных параметров инструмента, геометрии заготовки и технологических параметров радиально-

ротационного профилирования (подачи силового вала), что позволило уточнить полученные ранее исследования и упростить методику его определения.

Литература

1. Економіка та організація виробництва [Текст]: підручник / За ред. В.Г. Герасимчука, А.Е. Розенплентнера. – К.: Знання, 2007. – 678 с.
2. Потекушин, Н.В. Исследование процесса радиального профилирования [Текст] / Н.В. Потекушин. // Автомобильная промышленность. – 1976. – № 4. – С. 31–35.
3. Мосъпан, Д.В. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес [Текст] / Д.В. Мосъпан, В.В. Драгобецкий, Р.Г. Пузырь // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 6 (53), част. 2 – С. 64–66.
4. Власов, В.З. Избранные труды [Текст] / В.З. Власов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – Т. 1. – 528 с.
5. Пузырь, Р.Г. Определение поверхностной нагрузки, вызывающей пластическую деформацию цилиндрической заготовки [Текст] / Р.Г. Пузырь // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 99–105.
6. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
7. Мошнин, Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах: Технология и оборудование [Текст] / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.

© Р.Г. Пузырь

Р.Г. Пузырь, к.т.н., доц.

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ КРУТНОГО МОМЕНТУ ПРИ ПРОФІЛЮВАННІ ОБОДІВ КОЛІС

Наведено теоретичні дослідження з удосконалення методики визначення крутного моменту профілювальних машин при виготовленні ободів коліс методом радіально-ротацийного профілювання, засновані на визначенні нижньої межі зусилля профілювання.

Ключові слова: обід колеса, зусилля, крутний момент, профілювання.

R.G. Puzyr, Ph.D., Associate Professor

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

IMPROVEMENT OF METHODS FOR DETERMINING THE TWISTING MOMENT PROFILING WHEEL RIM

Theoretical studies on the improvement of methods for determining the twisting moment machines in the manufacture of wheel rims by radial rotary profiling, based on the definition of the lower boundary of the efforts of profiling.

Keywords: rim, force, twisting moment, profiling.

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ БАГАТОСТУПІНЧАСТИХ СВЕРДЛОВИННИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ ОБРОБІТКУ ПОВЕРХНІ

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 понад 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 «Полтаванaftогаз» 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 %.

Змащування 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].

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.

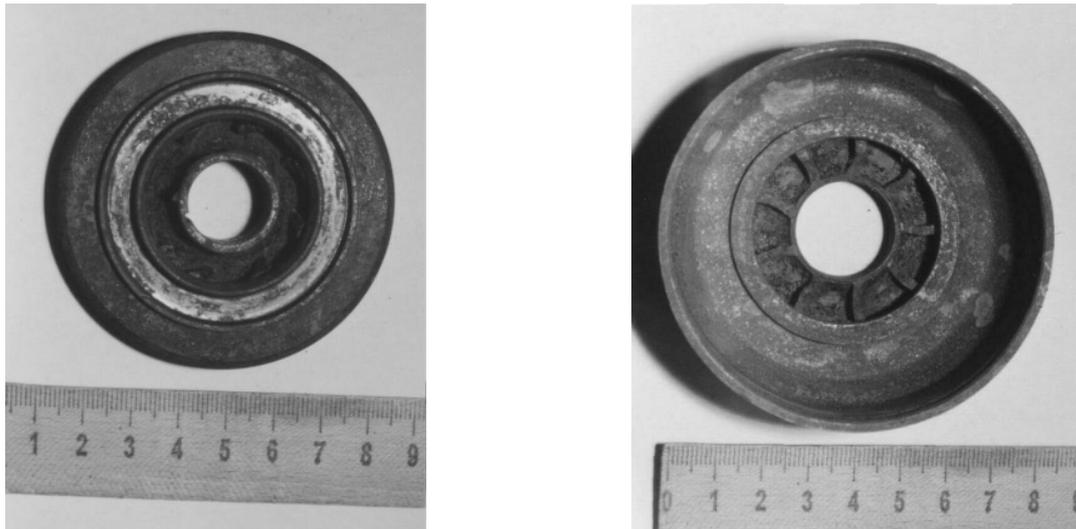


Рис. 1. Пошкодження робочого колеса і струмененаправляючого апарату відцентрових електронасосів

Виділення невирішених 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.

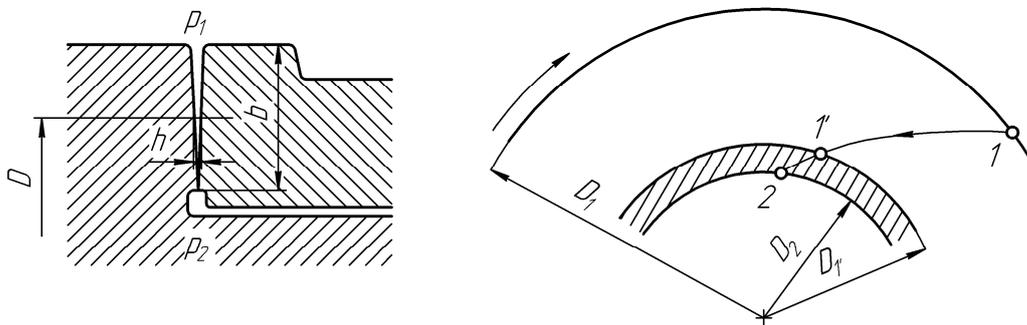


Рис. 2. Бічний розріз ущільнення

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, см³/хв:

$$q = \frac{\pi D h^3 p}{12 \mu b}, \quad (1)$$

де D – середній діаметр кільця, мм; h – середня висота зазору, мм; μ – динамічна в'язкість, кГ·сек/м²; b – ширина ковзкої поверхні кільця, мм; p – перепад тиску, кГ/см².

Приведене рівняння дає лише наближене теоретичне уявлення про можливий характер витоку 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 витоком 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 витоку 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 витоку 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 випробувальних 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:

$$f = \frac{F_{\text{тр}}}{\pi \cdot D \cdot b \cdot p_k}, \quad (2)$$

де $F_{\text{тр}}$ – 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:

$$F_{\text{тр}} = F_p \cdot p_c / n - G, \quad (3)$$

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:

$$V_{\text{спр}} = c \cdot \frac{S \cdot p \cdot d}{HV}, \quad (4)$$

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.

Знаючи, що $S = \pi D_{\text{сер}}$ отримаємо співвідношення:

$$S_{\text{сер}} = 12 \frac{q \cdot \mu \cdot b}{p \cdot Rz^3}, \quad (5)$$

де Rz – шорсткість поверхні, яка забезпечує мінімальний зазор в парі тертя h (формула (1)), та підставивши $D_{\text{сер}}$ у рівняння (5) отримаємо:

$$V_{\text{спр}} = \frac{c \cdot d}{HV} \cdot 12 \frac{q \cdot \mu \cdot b}{Rz^3}. \quad (6)$$

Позначимо $c \cdot d \cdot q \cdot \mu \cdot b = \varphi$ тоді вираз (6) прийме вигляд:

$$V_{\text{спр}} = 12 \frac{\varphi}{HV \cdot Rz^3}. \quad (7)$$

В свою чергу відомо, що $Rz = S^2 / (8r^2)$ [7], де S – подача, а r – радіус заокруглення різця при вершині, то інтенсивність спрацювання при торцевому терті буде залежати тільки від технологічних факторів, обумовлених властивостями матеріалу та його обробіткою, підставивши значення Rz у формулу (7), одержимо:

$$V_{\text{спр}} = \frac{6144 \cdot \varphi \cdot r^6}{HV \cdot S^6}. \quad (8)$$

З урахуванням великої кількості змінних, що входять до функції φ , то об'єм спрацювання при торцевому терті від технологічних факторів, в загальному вигляді можна записати виразом:

$$V_{\text{спр}} = f(HV, r, S). \quad (9)$$

Для математичного моделювання процесу зношування від технологічних факторів використано поліном другого порядку.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n + a_{n+1}x_1^2 + \dots + a_{2n}x_n^2 + a_{2n+1}x_1x_2 + \dots + a_mx_{n-1}x_n. \quad (10)$$

Кількість дослідів при плануванні експерименту визначалася за формулою:

$$N = 2n - p + 2n + 1 \quad (11)$$

з кількістю факторів плану $n = 3$ та генератором плану $p = 0$, звідси $N = 15$, 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:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3. \quad (12)$$

Значення факторів та рівні їх варіювання приведені в табл. 1.

Таблиця 1. Значення факторів та рівні їх варіювання

| Фактори | | Твердість матеріалу, МПа | Радіус заокруглення вершини різця, мкм | 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 занесені в табл. 2. Одержані результати опрацьовані на ПЕОМ з використанням прикладних та спеціально розроблених програм.

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 | 2,185 | 1,252 |
| 1 | 0,81 | 1,963 | 1,122 |
| 0 | 1,09 | 1,09 | 1,09 |
| -1 | 0,37 | 0,481 | 2,002 |
| -1,215 | 0,085 | 0,385 | 2,321 |

Визначено коефіцієнти регресії та одержано модель процесу у вигляді поліному другої степені:

$$y = 1,087 + 0,22x_1 + 0,741x_2 - 0,44x_3 - 0,50x_1^2 + 0,132x_2^2 + 0,472x_3^2 + 0,105x_1 \cdot x_2 + 0,66x_1 \cdot x_3 - 0,39x_2 \cdot x_3. \quad (13)$$

Перевірка адекватності моделі проведена на основі критерію Фішера.

Квадрат різниці відхилень $S_R = 1,342711$, при числі ступенів свободи $\gamma = 5$.

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 $\gamma = 3$.

Дисперсія коефіцієнтів $S^2 = 16,275/(3 \cdot 30) = 0,18083$. 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.

Замінивши значення x_i на реальні величини одержано розрахункову формулу в реальній системі координат:

– для твердості поверхні тертя, м/хв

$$x_1 = \frac{HV - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{HV - (5470 + 3530)/2}{(5470 - 3530)/2};$$

– для радіуса заокруглення вершини різця, мм

$$x_2 = \frac{r - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{r - (0,1 + 0,078)/2}{(0,1 - 0,078)/2};$$

– для подачі, мм/об

$$x_3 = \frac{S - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{S - (0,5 + 0,39)/2}{(0,5 - 0,39)/2}$$

Після проведених спрощень, одержано остаточну математичну модель:

$$I = 77,26 - 0,0016 \cdot HV - 1162,65 \cdot r - 25,26 \cdot S - 5 \cdot 10^{-7} \cdot HV^2 + 1090,91 \cdot r^2 + 156,04 \cdot S^2 + 0,11 \cdot HV \cdot r - 0,011 \cdot HV \cdot S - 646 \cdot r \cdot S. \quad (14)$$

Одержана залежність математично проаналізована на мінімальне значення величини зношування в залежності від технологічних факторів при виготовленні ущільнення.

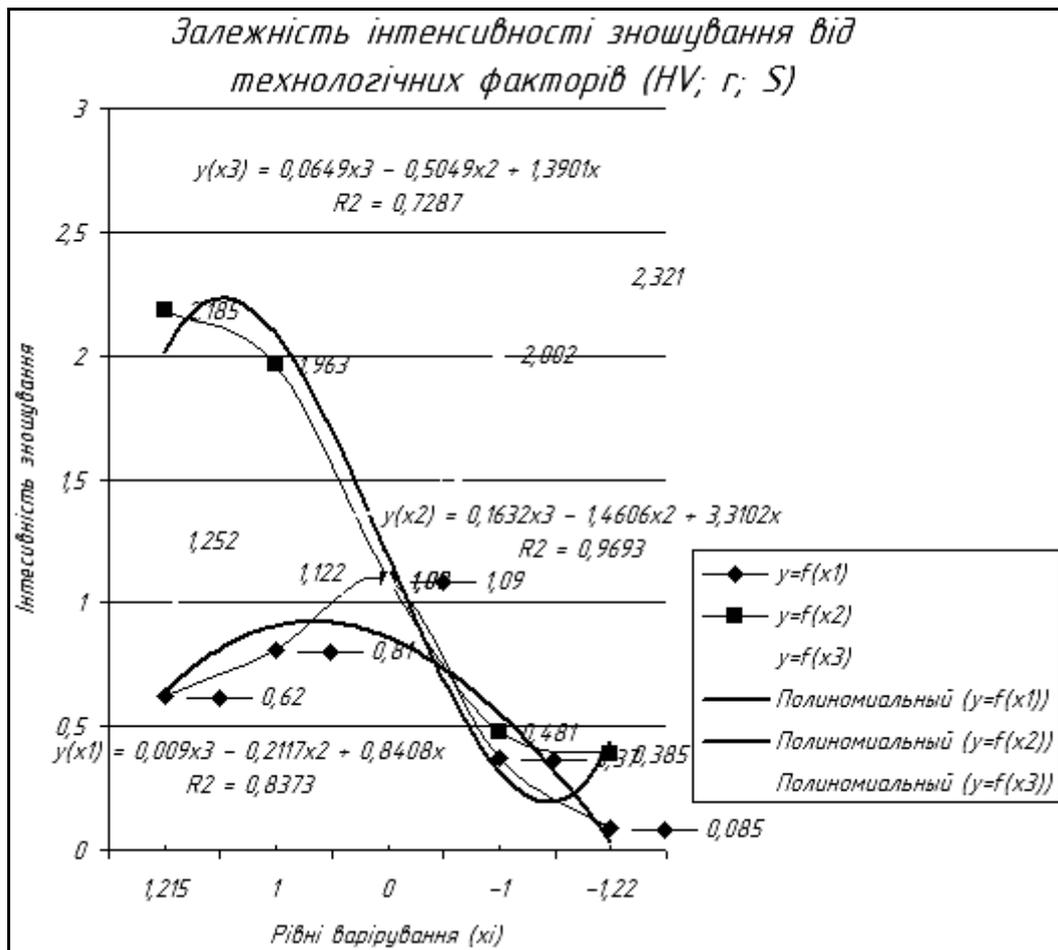


Рис. 3. Графіки основних залежностей при одній змінній при фіксації інших факторів на нульовому рівні

Встановлено що мінімальне зношування (I_{\min}) дорівнює $I = 0,567$ мг/год, при $Ra = 2,88$ мкм, яке можна прирівняти до $Ra = 3,2$ мкм, що відповідає стандартній величині.

Висновки

1. Найбільш слабким місцем у електровідцентрових насосах є ущільнення між ступеннями, яке також сприймає зусилля від стовпа прокачуваної рідини.
2. При підвищенні температури взаємодії поверхні з абразивом різко зростає інтенсивність спрацьовування і коефіцієнт тертя [5].
3. Для оцінки об'єму спрацьовування 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 $Ra = 3,2$ мкм, при якій інтенсивність спрацьовування мінімальна та становить $I = 0,567$ мг/год.

Література

1. Калашников, А.В. Методика визначення ресурсів роботи багатоступінчатих свердловинних відцентрових насосів [Текст] / А.В. Калашников, І.А. Калашнікова // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2006. – Вип. 2/1(20). – С. 79–82.

2. Калашников, А.В. Основные закономерности абразивного изнашивания газотермического покрытия [Текст] / А.В. Калашников, Д.Г. Тищенко // *Механизация строительства*. – 1997. – Вып. № 12. – С. 26–29.

3. Калашников, А.В. Анализ абразивного износа и методы повышения ресурса работы деталей растворонасосов [Текст] / А.В. Калашников, В.М. Корж // *Автоматическая сварка*. – 1998. – Вып. № 6 – С. 27–30.

4. *Нефтепромысловое оборудование [Текст]: справ. / Под ред. Е.И. Бухаленко*. – М.: Недра, 1990. – 559 с.

5. Проников, А.С. *Надежность машин [Текст] / А.С. Проников*. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

6. Адлер, Ю.П. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Макаров, Ю.В. Грановский*. – М.: Наука, 1976. – 276 с.

7. Дроздов, Ю.Н. *Трение и износ в экспериментальных условиях [Текст]: справ. / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков*. – М.: Машиностроение, 1986. – 543 с.

8. Икрамов, У.А. *Расчетные методы оценки абразивного износа [Текст] / У.А. Икрамов*. – М.: Машиностроение, 1987. – 287 с.

© I.A. Калашникова, А.В. Калашников

И.А. Калашникова, ассист., А.В. Калашников, к.т.н., доц.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОТЫ
МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ СКВАЖИННЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
НАСОСОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТИ**

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.

I.A. Kalashnikova, assistant, A.V. Kalashnikov, Ph.D., Associate Professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

**IMPROVING LIFE DURATION
OF THE MULTISTAGE CENTRIFUGAL
BOREHOLE PUMPS BY TECHNOLOGICAL METHODS
OF SURFACE TREATMENT**

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.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СТРУКТУРЫ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния эффективности механической обработки щеточным инструментом на свойства восстановительных газопламенных покрытий. Показано, что применение технологии газопламенного напыления интегрированного со щеточной обработкой обеспечивает возможность повышения качества покрытий, напыленных по традиционной технологии.

Ключевые слова: интегрированная технология, газопламенное покрытие, механическая обработка, щеточный инструмент, пористость, микроструктура, микротвердость.

Введение. Одним из перспективных способов восстановления и упрочнения деталей машин является нанесение газотермических покрытий, и, в первую очередь покрытий, нанесенных газопламенным способом, к преимуществам которого следует отнести простоту и дешевизну применяемого оборудования. Специалисты фирмы «Metco» считают газопламенное напыление перспективным методом упрочнения и восстановления деталей, который позволяет продлить срок их службы в 2...20 раз (в зависимости от назначения детали) [1].

Однако качественные параметры газопламенных покрытий не всегда отвечают повышенным требованиям, предъявляемым к эксплуатационным характеристикам деталей машин, работающих в условиях интенсивных нагрузок. Широкому применению газопламенного напыления покрытий препятствует низкая адгезионно-когезионная прочность напыленных покрытий и их высокая пористость.

Исследования газопламенного напыления направлены на рациональное активирование процесса нанесения покрытий путем интегрирования его с другими технологиями. Интегрирование нескольких операций в одну комплексную, выполняемую на специальной установке или машине, нередко позволяет устранить недостатки, присущие традиционным технологиям нанесения восстановительных покрытий. Совмещение производственных операций может осуществляться одновременно во времени и пространстве. На основании выше сказанного поставлена задача разработки способа нанесения покрытий, позволяющего при минимальных дополнительных затратах обеспечить повышение прочности сцепления напыленных покрытий и снижение его пористости. Проведенный анализ методов повышения качества напыленных покрытий позволяет определить следующие тенденции разработки интегрированного способа газопламенного напыления:

- снижение себестоимости при высоком качестве нанесенных покрытий;
- совмещение с технологиями, не вносящими существенных изменений в процесс напыления.

Таким видом упрочнения может стать способ формирования износостойкой поверхности детали, в основе которого принято совмещение газопламенного напыления с механической обработкой металлической вращающейся щеткой. Предлагается в процессе газопламенного порошкового напыления производить механическую обработку специальной металлической щеткой формирующихся слоев покрытия для удаления частиц с низкой когезионной прочностью, окислов и пылевидных частиц. Щеточная обработка как один из наиболее технологичных способов механического воздействия [2] применяется также для подготовки поверхности детали перед напылением для очистки от загрязнений и создания

необходимой шероховатости, активации поверхности основы [3]. Такая интегрированная технология позволяет повысить адгезионную и когезионную прочность покрытия, благодаря послойной релаксации напряжений за счет микропластической деформации наносимых слоев [4], а также активации поверхности основы непосредственно перед напылением. Данное предположение согласуется с литературными данными — взаимодействие материалов в твердой фазе активируется не только температурой, но и давлением [3, 4, 5]. При этом для существенного ускорения взаимодействия материалов при высоких температурах требуется весьма низкие давления, инициирующие направленное движение структурных дефектов [5].

Целью исследований является изучение возможности применения механической обработки щеточным инструментом поверхности детали под нанесение газопламенного покрытия и газопламенного покрытия в процессе формирования для повышения его качества.

Основной материал. Задача упрочнения деталей с помощью интегрирования двух прогрессивных технологических процессов весьма сложна вследствие различия их характера. Поэтому, даже частичное решение этой задачи на основе анализа и исследования основных закономерностей формирования свойств напыленных поверхностей, позволит эффективно управлять качеством упрочненных деталей.

На основании серии предварительно проведенных экспериментов, определены оптимальные значения параметров щеточной обработки (скорость вращения щетки 2100 об/мин; диаметр 0,8 мм и длина игл 40 мм при плотности расположения игл — 32 шт/см²), обеспечившие увеличение прочности сцепления покрытия с основой с 18...20 МПа при традиционном способе напыления до 26,5...28 МПа — при интегрированном напылении, причем с незначительными изменениями технологии нанесения покрытия. Установлено, что применение щеточной обработки при газопламенном напылении позволяет в среднем на 22 % увеличить прочность сцепления [6].

В процессе газопламенного напыления покрытие образуется из отдельных расплавленных или близких к этому состоянию частиц, которые с высокой скоростью (40...50 м·с⁻¹) соударяются и наслаиваются на поверхность основы (причем в процессе напыления температура основы повысилась от комнатной — 20 °С до 150 °С). Покрытие представляет собой слоистую структуру образованную деформированными плоскими частицами. При движении напыляемых частиц в высокотемпературной газовой струе их поверхность окисляется. В результате каждая частица покрывается пленкой окислов, которая остается на границах частиц в покрытии и препятствует их сплавлению. При первом соприкосновении частиц напыляемого материала с основой в поверхностном слое возникает резкий градиент температур, обуславливающий большую скорость кристаллизации (C_k) формирующегося покрытия и явление переохлаждения, ведущее к образованию большого количества центров кристаллизации.

На рис. 1, а в структуре покрытия из ПГ-10Н-0, напыленного газопламенным способом по традиционной технологии, видны многочисленные пустоты (поры), особенно на границе покрытия с основой и недеформированные частицы напыленного материала. Количественный микроанализ показал, что поры имеют округлую форму размером от 10 до 40 мкм, остаточная пористость покрытия составляет 16...18 %. Сцепление покрытия с основным металлом недостаточное, что обусловлено достаточно высокой пористостью слоя вблизи основы. При анализе покрытия, нанесенного с применением щеточной обработки на различных режимах, микроструктура основы металла не изменяется. Поверхность раздела «покрытие – металлическая основа» характеризуется отсутствием скопления пор (рис. 1, б).

Щеточная обработка, согласно данным исследований, очищает поверхность от загрязнений и создает развернутый микропрофиль с требуемой шероховатостью, разрушает окисную пленку, образующуюся на поверхности основного металла. Появившиеся при этом мелкие частицы окислов играют роль дополнительных центров кристаллизации, в результате чего формирующийся переходной слой имеет мелкозернистое полиэдрическое

строение, что обусловлено сверхбыстрой кристаллизацией, которая приводит к образованию большого количества краевых дефектов у зерен — вакансий и дислокаций. Полученная шероховатость поверхности $Ra\ 10\dots 12\ \mu\text{м}$ при применении щеточной обработки обеспечивает увеличение площади контакта основы с напыляемым покрытием и, как следствие, повышение адгезии поверхности основы и покрытия за счет роста механического взаимодействия.

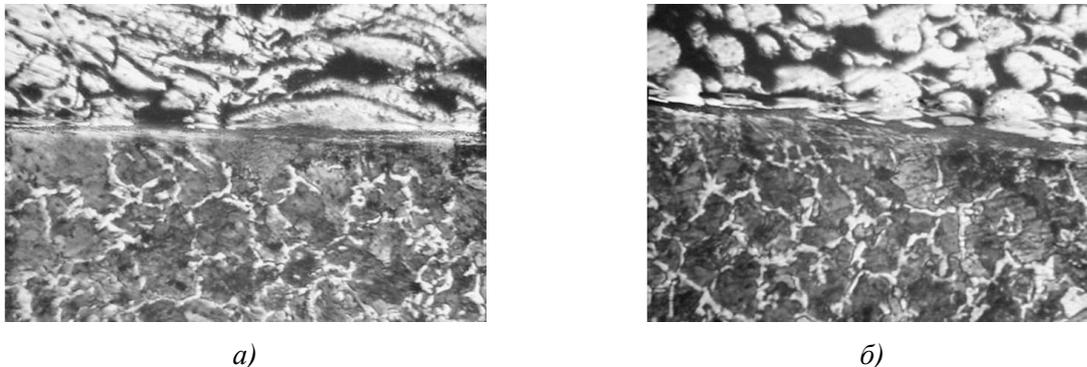


Рис. 1. Структура напыленных покрытий из сплава ПГ-10Н-01 на стали 45 ($\times 130$) без щеточной обработки (а) и со щеточной обработкой (б) при подготовке поверхности ($n_1 = 150\ \text{об/мин}$) и в процессе напыления ($n_2 = 2100\ \text{об/мин}$) при $N = 3\ \text{мм}$, $d_{\text{ш}} = 0,8\ \text{мм}$, $l_{\text{ш}} = 40\ \text{мм}$

Определение твердости переходного слоя $H = 50\text{--}330\text{--}367$ показало, что она выше, чем у никеля — $H = 50\text{--}200\text{--}224$, и может быть объяснено образованием большого количества дислокаций при бурно протекающем процессе кристаллизации, т. е. возникновением напряжений II рода. Причем при увеличении оборотов вращения щетки количество центров кристаллизации ($\text{Ч}_{\text{ц}}$) возрастает.

Образцы, напыленные по интегрированной технологии (рис. 1, б), отличаются более мелкозернистым строением. Структура таких покрытий представлена более протяженными ламелями и более упорядочена. Условия кристаллизации последующих слоев покрытия значительно отличаются от условий кристаллизации переходного слоя: практически отсутствует переохладение, уменьшается температурный градиент.

Поэтому следовало ожидать образование крупнозернистой структуры в покрытии за счет уменьшения скорости кристаллизации. Применение же щеточной обработки в процессе формирования напыляемых слоев покрытия обеспечивает увеличение количества центров кристаллизации за счет разрушения окисных пленок на границах частиц в слоях покрытия и нарушающих целостность структуры покрытия, поэтому зерна в покрытии получаются более мелкие. Металлографические исследования показали, как и предполагалось, в результате микропластического воздействия щеточной обработки, плотность напыленных покрытий заметно повысилась, остаточная пористость составила $8\dots 10\ \%$, причем поры принимают вытянутую форму и уменьшаются до размера $5\dots 15\ \mu\text{м}$, т. е. можно сказать происходит так называемое «залечивание» пор.

В целом микроструктура напыленного покрытия представляет собой гетерогенную многофазную систему, основу которой составляют вытянутые зерна никеля и зерна твердого раствора на основе никеля, имеющие вид более темных однородных участков (рис. 2 а, б). В структуре выявлены твердые составляющие, такие как тонкодисперсные карбидные и карбоборидные эвтектики, имеющие вид более светлых гладких участков микротвердостью $6800\dots 8510\ \text{МПа}$, а микротвердость эвтектики розеточного типа составляет до $5000\dots 5570\ \text{МПа}$. В металлической основе достаточно равномерно распределены мелкие карбиды хрома и бора (серые круглые — рис. 2, а, по морфологии идентифицированы как $\text{Me}_3(\text{CB})$), а также мелкие частицы оксидов, что подтверждено микрорентгено-

спектральным анализом, замером микротвердости отдельных фаз в покрытии — 11 000...13 500 МПа, и согласуется с литературными данными.

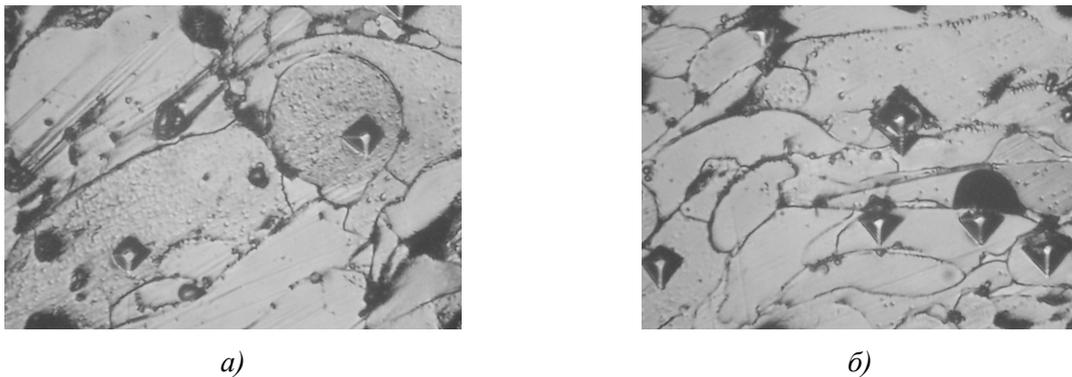


Рис. 2. Микроструктура покрытия, нанесенных газопламенным напылением, совмещенным со щеточной обработкой ($\times 260$)

Таким образом, микроструктура напыленного слоя представляет собой достаточно мягкую с повышенной вязкостью матрицу, в которую вкраплены твердые и износостойкие карбиды, обеспечивающие повышенную прочность и износостойкость напыленного покрытия в условиях граничного трения и трения в условиях смазки. Разрушение окисных пленок на отдельных частицах, в процессе формирования покрытия металлической щеткой обеспечивает сплавление металлических частиц и их соединение под действием сил Ван-дер-Ваальса.

Твердость покрытия оценивали микротвердостью на шлифах. Проводили послойное измерение микротвердости на ПМТ-3 при нагрузке 100 г. В результате анализа данных эксперимента (рис. 3) наблюдается рост микротвердости (на 10...15 %) при применении щеточной обработки, более равномерное распределение её по толщине покрытия, колебания значений по толщине не превышает 10 %. Эксплуатационные свойства восстановленных деталей определяются характером изменения твердости в ЗТВ и по глубине детали. Наблюдается скачок в твердости покрытий, напыленных по традиционной технологии (рис. 3, кривая 1), что может привести к появлению усталостных трещин и дефектов, снижающих в целом прочность детали. Высокая твердость ЗТВ обусловлена охлаждением и частичным диффузионным проникновением легирующих элементов (Cr и Ni) в поверхность детали. Действие механического фактора щеточной обработки (рис. 3, кривая 2) обеспечивает более плавное снижение микротвердости от покрытия к основному металлу. Твердость покрытия обеспечивается наличием твердых фаз — карбидов хрома, боридов никеля. Наблюдаемое повышение твердости поверхностного слоя обеспечивается за счет уплотнения слоев и уменьшения количества пор при послойной обработке щеткой слоев покрытия.

Несущую способность покрытия определяли методом вдавливания алмазной пирамиды твердомера ПМТ-3 с углом при вершине 136° при заданной нагрузке. Считалось, что слой покрытия имеет достаточную несущую способность, если после снятия нагрузки с индикатора на краях четырехугольной лунки не обнаруживалось трещин, характерных для разрушенного покрытия. Замер критической толщины напыленного слоя на исследуемых образцах показал, что она находится в пределах 28...36 мкм, позволяющая исключить возможность продавливания абразивом поверхностного слоя деталей при трении.

Выводы. Металлографические исследования показали, что структурные особенности напыленных газопламенных покрытий, вызваны влиянием микропластической деформации как результата механической обработки специальной металлической щеткой.

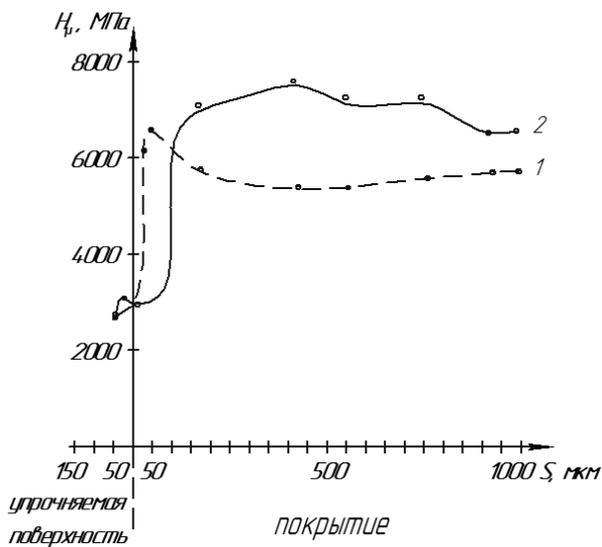


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине напыленного покрытия:

1 – по традиционной технологии; 2 – по интегрированной технологии; (согласно стандарта ISO 14577)

В результате механического воздействия «ламель» имеют более протяженный характер, количество пор в покрытии снижено с 18 до 10 %.

В результате проведенных исследований выдвинуто предположение, что увеличение твердости напыленного поверхностного слоя (на 18...20 %), снижение микротвердости подповерхностных слоев и увеличение твердости в более глубоких слоях в процессе интегрированного газопламенного напыления происходит за счет образования большого количества дислокаций при бурно протекающем процессе кристаллизации. Появившиеся при разрушении окисных пленок в покрытии мелкие частицы окислов играют роль дополнительных центров кристаллизации.

Литература

1. Харламов, Ю.А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин [Текст] / Ю.А. Харламов // Тяжелое машиностроение. – 2000. – № 2. – С. 3–10.
2. Кершенбаум, В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения [Текст] / В.Я. Кершенбаум. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Лузан, С.А. Совершенствование метода газопламенного нанесения покрытий [Текст] / С.А. Лузан // VII Международная конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов»: сб. докладов. – Х.: ННЦ «ХФТИ», ИПЦ «Контраст», 2006. – С. 182–183.
4. Русев, Г.М. Технология восстановления и упрочнения наружных и внутренних поверхностей плазменным напылением [Текст] / Г.М. Русев, В.В. Овсянников, С.М. Киселев, Н.Ф. Галюк // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 61–62.
5. Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий [Текст] / В.А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
6. Дерябкина, Е.С. Распределение случайной величины прочности сцепления двух технологий газопламенного напыления [Текст] / Е.С. Дерябкина // Машинобудування. – Харків: УПА. – 2011. – № 7. – С. 126–136.

© Е.С. Дерябкина

Є.С. Дерябкіна, к.т.н., доц.

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ І СТРУКТУРИ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ ПІСЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Представлені результати експериментальних досліджень впливу ефективності механічної обробки щітковим інструментом на властивості відновлювальних газополумєневих покриттів. Показано, що використання технології газополумєневого напылення інтегрованого з щітковою обробкою забезпечує можливість підвищення якості покриттів, які напылені по традиційній технології.

Ключові слова: інтегрована технологія, газополумєневе покриття, механічна обробка, щітковий інструмент, пористість, мікроструктура, мікротвердість.

Ye.S. Deryabkina, Ph.D., Associate Professor

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov

FEATURES OF THE FORMATION AND STRUCTURE SPRAYED COATING AFTER MACHINING

The results of experimental studies of the influence of machining efficiency of the brush tool on the properties of reconstruction of gas-flame coatings. It is shown that the use of flame-spraying technology integrated with brush processing provides the possibility of increasing the quality of coatings deposited by conventional techniques.

Keywords: *integrated technology, gas-flame coating, machining, tool brush, porosity, microstructure, microhardness.*

УДК 621.822

І.Я. Новосад, к.т.н., доц.

Тернопільський національний економічний університет

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕННЯ ГВИНТОВИХ СЕКЦІЙ ГНУЧКИХ КОНВЕЄРІВ

Встановлено закономірності зміни складової сили різання P_y та шорсткість обробленої поверхні залежно від частоти обертання заготовки, подачі та глибини різання в процесі оброблення секцій РО ГГК із Ст 3 і сталі 08кп.

Ключові слова: *гнучкий гвинтовий конвеєр, робочий орган, проточування, секція, технологія.*

Вступ. Машинобудування має першочергове значення для технічного переозброєння всього народного господарства країни. Тому сучасний стан його розвитку вимагає пошуку нових шляхів покращення експлуатаційних та технологічних параметрів деталей машин, які б дали змогу покращити якість продукції, зменшити собівартість її виготовлення та ремонту. У машинобудуванні важливе місце посідає задача розроблення прогресивних технологічних процесів (ТП) виготовлення транспортних засобів, прогресивного технологічного оснащення, різального та вимірювального інструментів і відпрацювання на технологічність конструкцій гнучких гвинтових конвеєрів (ГГК) і особливо їх робочих органів (РО) і гнучких рукавів. Незважаючи на значну кількість наукових праць, які присвячені технології виготовлення гнучких гвинтових конвеєрів, рівень технологічного забезпечення залишається недостатньо високим, а наукова база для його створення не завжди відповідає сучасним вимогам за матеріало- та енергомісткістю та іншими параметрами.

Актуальним є створення технологічного забезпечення для виготовлення нових конструкцій РО ГГК, довговічність та ресурс роботи яких підвищується за рахунок зменшення інтенсивності зношування елементів в контактних зонах. Тому, тема роботи є актуальною і має важливе значення.

Огляд останніх джерел і публікацій. Досліджено характерні конструктивні особливості ГГК, технічні вимоги, норми точності, проаналізовано технологічні процеси їх виготовлення. Основними технічними вимогами до конструкцій ГГК є забезпечення належних умов експлуатації, точності виготовлення за 8–10 квалітетами, шорсткості $Ra = 0,8 \dots 1,25$ мкм. Дослідженням технологічних процесів виготовлення гвинтових заготовок займались Б.М. Гевко, М.І. Пилипець, Гевко І.Б. [1–4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз існуючих конструкцій і технологічних процесів виготовлення секційних ГГК висвітлює ряд недоліків в процесі їх формоутворення: низьку продуктивність, якість, недосконалість технологічних засобів виготовлення й контролю. Окрім того, питання розроблення прогресивних ТП виготовлення секційних робочих органів ГГК, проектування технологічного оснащення, вибору режимів різання, різальних і вимірювальних інструментів на даний час досліджені недостатньо.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення впливу режимів різання на якість оброблення гвинтових секцій гнучких конвеєрів.

Основний матеріал і результати. З метою підвищення ресурсу роботи ГГК із секційними робочими органами їх необхідно профілювати за зовнішнім діаметром [3]. При цьому необхідно визначити силу різання для обточування зовнішнього діаметра секції шнека із Ст 3 та сталі 08кп діаметром 100 мм і довжиною секції 120 мм з поздовжнім радіусом профілювання 320 мм.

Для проведення експериментальних досліджень виготовлено секції гнучкого гвинтового конвеєра і їх обточування здійснено на токарному верстаті 16К20, а заміри здійснено за допомогою профілографа-профілометра. На рис. 1 наведено графічну залежність шорсткості оброблення секцій шнека для Ст 3 і сталі 08кп по довжині деталі для встановлених режимів різання.

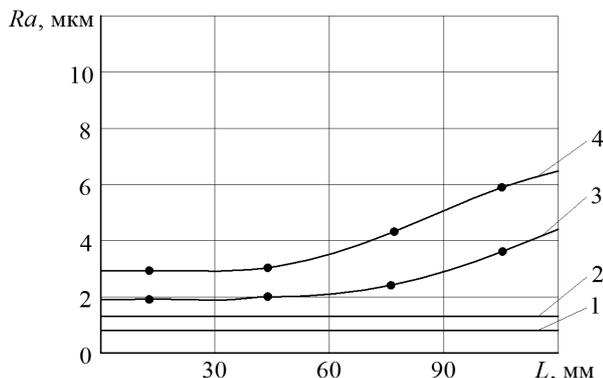


Рис. 1. Залежність шорсткості оброблення секцій шнека для Ст 3 – 2, 4 і сталі 08кп – 1, 3 по довжині деталі для режимів різання: $S = 0,4$ мм/об; $V = 141$ м/хв; $t = 0,5$ мм; (1, 2 – розрахункові значення; 3, 4 – експериментальні дані)

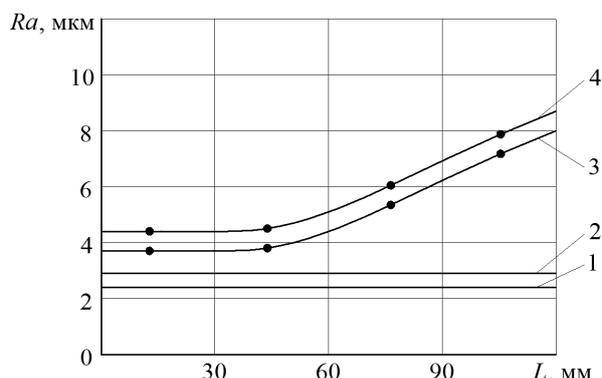


Рис. 2. Залежність шорсткості оброблення секцій шнека для Ст 3 – 2, 4 і сталі 08кп – 1, 3 по довжині деталі для режимів різання: $S = 0,175$ мм/об; $V = 141$ м/хв; $t = 0,5$ мм (1, 2 – розрахункові значення; 3, 4 – експериментальні дані)

Як видно із рис. 1 і рис. 2, із збільшенням величини подачі різця для постійної швидкості різання $V = 141$ м/хв і глибини $t = 0,5$ мм, шорсткість збільшується. Різниця між розрахунковими та експериментальними результатами в цих двох випадках складає 2–6 мкм, що є допустимим згідно технологічних вимог.

В результаті експериментальних досліджень проведено також комплекс досліджень із визначення величини складової сили різання проточування секцій гнучкого гвинтового конвеєра $\varnothing 100$ мм бочкоподібної форми з радіусом 320 мм вздовж секції, матеріал сталь 08кп і Ст 3 і порівняння цих значень з теоретичними. При цьому досліджено зміну радіальної складової сили різання від зміни подачі, яка змінювалася в межах 0,1–0,6 мм/об, а також, з або для постійною глибиною різання $t = 0,5$ мм і швидкістю різання 62,8 мм/об. (рис. 3). Вплив зміни глибини різання на зміну складової різання в межах 0,1–0,8 мм/об з постійною швидкістю різання $V = 62,8$ мм/хв і подачею $S = 0,2$ мм/об зображено на рис. 4.

Досліджено також залежність радіальної складової сили різання від швидкості різання, яка змінювалася в межах 0,2–0,6 м/с з подачею $S = 0,2$ мм/об і швидкості різання $V = 62,8$ м/хв (рис. 3).

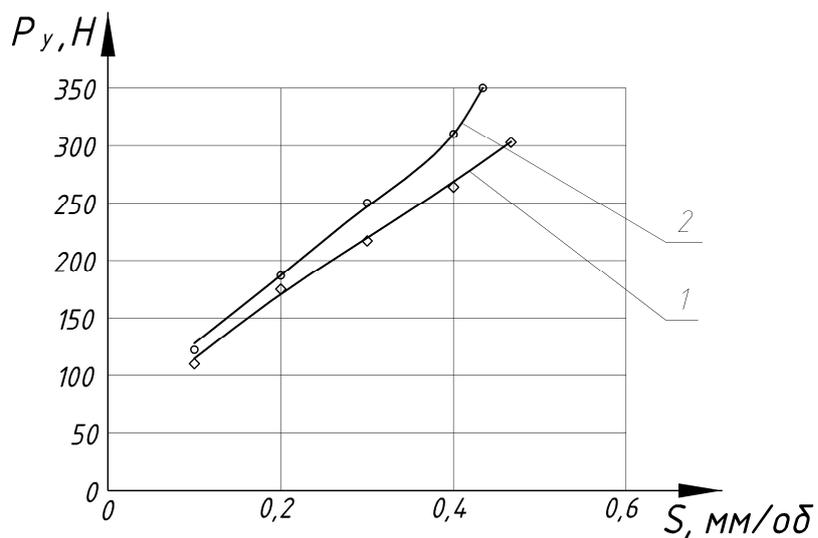


Рис. 3. Графік зміни радіальної складової сили різання P_y від зміни подачі S для постійних глибини різання $t = 0,5$ мм, швидкості різання $V = 62,8$ м/хв (1, 2 – відповідно розрахункова і експериментальна криві)

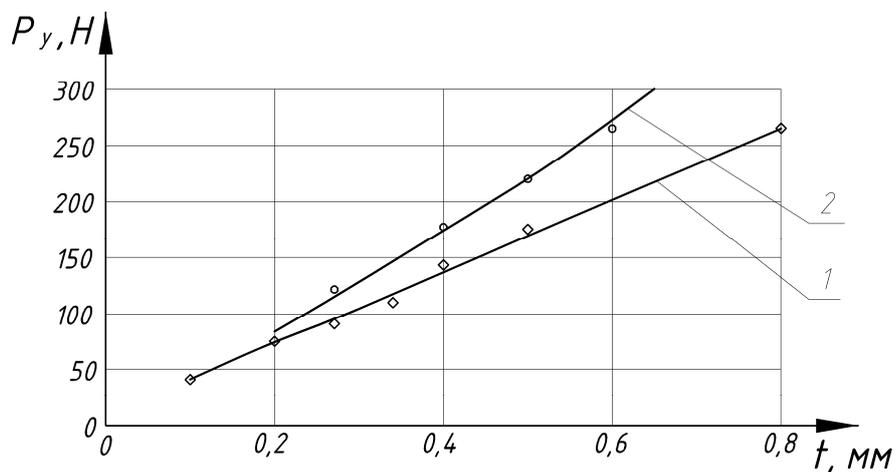


Рис. 4. Графік зміни радіальної складової сили різання P_y від зміни глибини різання t для постійних швидкості різання $V = 62,8$ м/хв і подачі $S = 0,2$ мм/об (1, 2 – відповідно розрахункова і експериментальна криві)

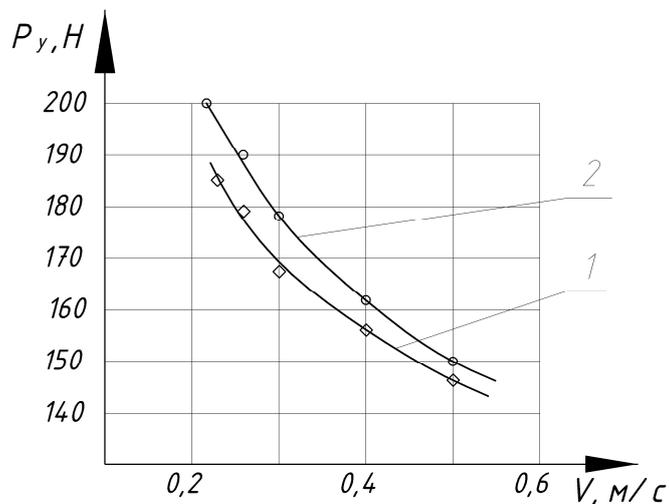


Рис. 5. Графік зміни радіальної складової сили різання P_y від зміни швидкості різання V для постійних подачі $S = 0,2$ мм/об, швидкості різання $V = 62,8$ м/хв (1, 2 – відповідно розрахункова і експериментальна криві)

Як видно з графіків, радіальна складова сили різання збільшується із збільшенням величини подачі та глибини різання.

Розрахункові значення складової сили різання, наведено на цих графіках аналіз яких підтвердив різницю їх складових у 20–60 Н порівняно з експериментальними, що є допустимим.

Висновки. В результаті аналізу проведених досліджень встановлено, що профілювання секцій РО ГГК по зовнішньому діаметру доцільно здійснювати на спеціальних оправах у два етапи: перший — чорнове оброблення самих ГГЗ із заданим кроком і навитих в щільний пакет на токарному верстаті 16К20Ф3 із наступними режимами різання: $V = 60\text{--}70$ м/хв; $t = 2,5\text{--}3$ мм; $S = 0,25\text{--}0,4$ мм/об. Другий етап — чистове профілювання секцій РО ГГК на спеціальній оправі з режимами різання: $V = 80\text{--}100$ м/хв; $t = 0,8\text{--}1,5$ мм; $S = 0,15\text{--}0,25$ мм/об та шорсткістю $Ra = 1,25\text{--}6,3$ мкм.

Література

1. Гевко, Б.М. Исследование процесса проточки шнеков [Текст] / Б.М. Гевко, М.И. Пилипец // *Технология и организация производства*, 1985. – № 3. – С. 18–19.
2. Пилипец, М.И. Технологія виготовлення гвинтових деталей різних типорозмірів [Текст] / М.И. Пилипец, І.Б. Гевко, Р.В. Комар // *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей, ЛДТУ*. – Вип. 7. – Луцьк, 2000. – С. 120–127.
3. Гевко, Б.М. До питання профілювання секційних робочих органів гвинтових подаючих механізмів [Текст] / Б.М. Гевко, Р.Я. Лецуц // *Наукові нотатки: міжвуз. збірник (за напрямком інженерна механіка) Луцького ДТУ*. – № 12. – Луцьк, 2003. – С. 32–39.
4. Гевко, І.Б. Особливості технології виготовлення секцій гнучких гвинтових конвеєрів [Текст] / І.Б. Гевко, І.Я. Новосад // *Міжвузівський збірник за напрямком «Інженерна механіка»*. – Вип. 18. – Луцьк, 2006. – С. 11–16.

© І.Я. Новосад

И.Я. Новосад, к.т.н., доц.

Тернопольский национальный экономический университет

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАНИЯ ВИНТОВЫХ СЕКЦИЙ ГИБКИХ КОНВЕЙЕРОВ

Установлено закономерности изменения составной силы резания P_y и шероховатость обработанной поверхности в зависимости от частоты вращения заготовки, подачи и глубины резания, в процессе обработки секций РО ГГК из Ст 3 и стали 08кп.

Ключевые слова: гибкий винтовой конвейер, рабочий орган, протачивание, секция, технология.

I.Y. Novosad, Ph.D., Associate Professor

Ternopil National Economic University

INFLUENCE OF CUTTING MODES UPON PROCESSING QUALITY FOR SCREW SECTIONS OF FLEXIBLE CONVEYERS

There were established the rules for shift of constituent cutting power P_y , bristling of processed surface due to the frequency of subject rotating, shipment and depth of cutting during the sections WB FSC processing St 3 and steel 08.

Keywords: flexible screw conveyor, working body, drilling, section, technology.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ОСАДКЕ ВЫПУКЛЫМИ ПЛИТАМИ С ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ НАГРУЗКИ

Выполнено конечно-элементное моделирование профилирования относительно высоких заготовок осадкой выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки. Получены графики зависимостей показателей формоизменения профилированной заготовки от степени обжатия при фиксированном эксцентриситете нагрузки и различных величинах отношения радиуса выпуклости плит к диаметру заготовки.

Ключевые слова: высокая заготовка, профилирование, осадка, выпуклые плиты, эксцентриситет, формоизменение.

Введение. Предварительное профилирование заготовок перед объемной штамповкой является эффективным способом сокращения потерь материала с облоем, снижения затрат на последующую механическую обработку поковок, повышения стойкости штампового инструмента. Наиболее актуальными вопросы профилирования заготовок остаются для процессов горячей объемной штамповки, в которых штампы, подвергаясь интенсивному ударно-абразивному износу, воздействию высоких температур и давлений, работают в весьма неблагоприятных условиях [1]. Подготовка формы заготовки позволяет перераспределить силовые нагрузки по переходам, улучшить заполнение ручьев, снизить контактные давления, обеспечив лучшее напряженно-деформированное состояние инструмента. Введение предварительного профилирования позволяет в 1,4...2 раза повысить стойкость окончательных ручьев [1]. К профилированию заготовок предъявляют требования экономической целесообразности и быстрой перестройки на новую структуру технологического процесса, что затрудняет использование дополнительного специализированного профилирующего оборудования.

Наибольшую перспективу представляет развитие способов профилирования на основном штамповочном оборудовании, причем на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) использование подготовительно-заготовительных переходов является особо сложным из-за постоянства величины рабочего хода главного исполнительного механизма. В настоящее время разработан ряд бесштамповых технологий подготовки заготовок под объемную штамповку [2], в частности, основанных на процессах осадки выпуклыми плитами. Данные технологии успешно применены при производстве при производстве поковок пластин, пластин с отростками и со сложной формой поперечного сечения [3].

Анализ последних исследований и публикаций. Осадка выпуклыми продолговатыми плитами достаточно изучена как с точки зрения развития формоизменения [4], так и с точки зрения изменений напряженно-деформированного состояния [5]. Технологии, включающие осадку выпуклыми плитами, успешно использованы в промышленности [3], однако номенклатура изделий, под которые данный способ профилирования оптимально подходит, не является распространенной. Для расширения технологических возможностей заготовительных операций, выполняемых на КГШП, предложено рассмотреть процесс осадки выпуклыми продолговатыми плитами с эксцентриситетом их внедрения в торец цилиндрической заготовки. В работах [6, 7] начато исследование процесса осадки заготовок выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки. В частности изучено развитие напряженно-деформированного состояния [6] и формоизменения [7] при осадке заготовок с отношением высоты (H_0) к диаметру (D_0) $H_0/D_0 = 1,0$ плитами с радиусом выпуклости $R = 30$ мм, 50 мм, 75 мм, 112,5 мм, т. е. с отношением $R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5$ и 2,25.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Заготовки с отношением $H_0/D_0 > 1,0$ называют относительно высокими [8] из-за особенностей напряженно-деформированного состояния (уменьшение влияния условий контактного трения на напряженно-деформированное состояние заготовки). Предварительно полученные данные свидетельствуют о том, что осадка выпуклыми плитами заготовок с отношением $H_0/D_0 > 1,5$ с эксцентриситетом осей заготовки и инструмента сопровождается продольным изгибом. Данное явление целесообразно положить в основу технологических решений по производству поковок с изогнутой осью, однако закономерности формоизменения относительно высоких заготовок при профилировании осадкой выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки до настоящего времени не изучены. Для ориентации подготовительной операции на последующее окончательное формоизменение заготовки необходимо комплексное исследование закономерностей формоизменения при принятом способе получения фасонной заготовки.

Постановка цели и задач исследования. Целью работы является выявление закономерностей формоизменения заготовок с отношением $H_0/D_0 = 2,0$ при осадке выпуклыми продолговатыми плитами с эксцентриситетом внедрения данных плит в торец заготовки.

Для достижения указанной цели исследований необходимо выполнить моделирование процесса осадки относительно высоких заготовок в пакете конечно-элементного анализа, выделить основные показатели формоизменения и установить их зависимость от степени осадки и отношения радиуса выпуклых плит к диаметру заготовки (R/D_0). Изучение формоизменения целесообразно провести при обоснованной в работах [6, 7] максимальной величине эксцентриситета $e = 0,25D_0$.

Основной материал и результаты. Исследование проводили с использованием пакета для конечно-элементного анализа Deform 3D. Объектом моделирования был процесс осадки цилиндрической заготовки с диаметром $D_0 = 50$ мм и высотой $H_0 = 100$ мм (отношение $H_0/D_0 = 2,0$). Материал заготовки — сталь 45, при этом модель упрочнения материала для широкого диапазона температурно-скоростных условий, также как и граничные условия, приняты в виде, рекомендованном пакетом для моделирования. Температурные условия принимали изотермическими. Температура деформации 1100 °С, что соответствует первому переходу штамповки-профилирования. Заданное количество конечных элементов составляло 10 000 шт., однако, после генерации сетки, количество элементов было принято 8 242 шт. Коэффициент контактного трения при деформации, согласно рекомендациям источника [9], принимаем $f = 0,3$. Результаты моделирования в широком диапазоне отношений радиуса осадочных плит R к диаметру заготовки D_0 предполагается, в перспективе, проверить экспериментально путём осадки на испытательной машине, поэтому скорость деформирования принимали $v = 1$ мм/с.

Моделировали процесс осадки до относительных степеней обжатия $\varepsilon = (\Delta h/H_0) \times 100 = 70$ %, где $\Delta h = (H_0 - H)$ – величина хода инструмента (абсолютное обжатие), мм. Значение эксцентриситета при осадке,

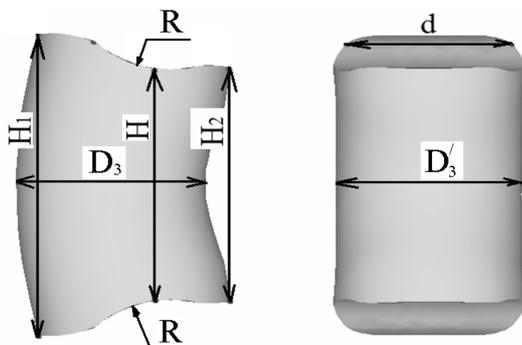


Рис. 1. Твердотельная модель заготовки после осадки

т. е. несовпадение оси заготовка и вертикальной оси осадочных плит, принимали $e = 12,5$ мм. Для исследования формоизменения заготовок предложена схема контролирования конечных размеров профилированной заготовки. Отношения конечных геометрических размеров заготовки являются безразмерными показателями, характеризующими развитие неравномерности деформации в продольном, поперечном и высотном направлениях. За основные показатели приняты отношения (рис. 1): H_1/H_0 ; H_2/H_0 ; H_1/H_2 ; D_3/D_0 ; D_3/D'_3 ; d/D_3 , где H_1 и H_2 – высота краевых

участков полуфабриката после осадки, D_3 и D'_3 – диаметральные размеры полуфабриката в центральной зоне по длине и ширине после осадки, d – ширина приторцевой зоны.

Исследование формоизменения проводили в диапазоне степеней обжатий ε от 20 до 70 %. Для определения влияния величины радиуса R выпуклости осадочных плит на параметры формоизменения принимали значения $R = 30; 50; 75$ и $112,5$ мм, т. е. относительный радиус составлял $R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5$ и $2,25$.

Результаты моделирования изменения принятых макропоказателей в процессе осадки выпуклыми плитами с различным отношением R/D_0 и эксцентриситетом нагрузки $e = 10,5$ мм представлены на рис. 2.

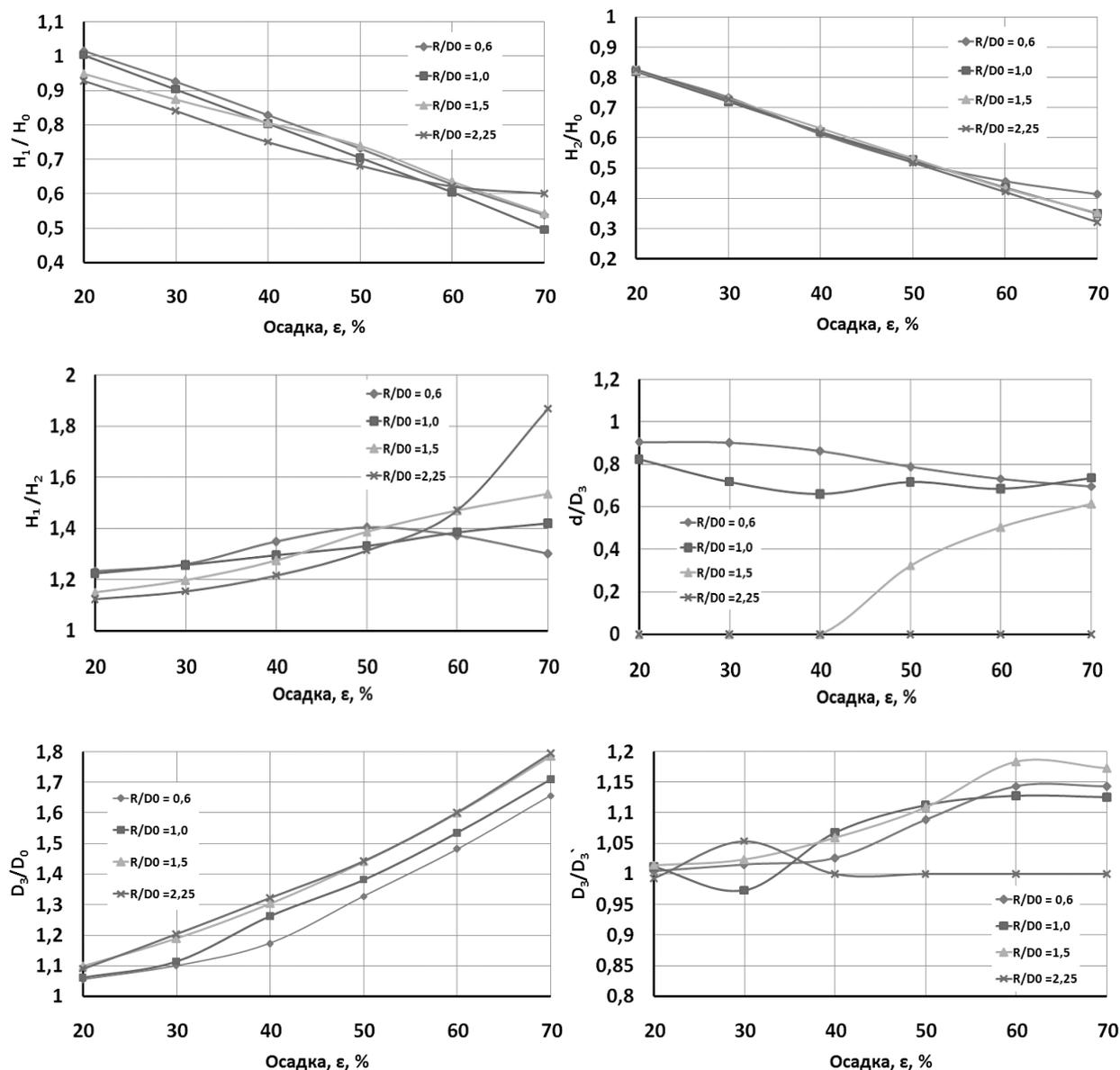


Рис. 2. Зависимости макропоказателей формоизменения при осадке заготовок

График зависимости $H_1/H_0 = f(R/D_0; \varepsilon)$ при $e = 12,5$ мм показывает, что при значениях от $R/D_0 = 0,6$ до $R/D_0 = 2,25$ происходит пропорциональное уменьшение высоты краевого участка противоположного направлению смещения эксцентриситета нагрузки, однако при значениях $R/D_0 > 2,25$ и степени деформации $\varepsilon > 60$ % значение параметра H_1 возрастает за счёт полного обтекания металла поверхности рабочего инструмента. В тоже время значение показателя $H_2/H_0 = f(R/D_0; \varepsilon)$ с ростом степени обжатия уменьшается, а влияние параметра R/D_0 проявляется незначительно.

Для обеспечения стабильности формоизменения было предложено ограничивать высоту выпуклости профиля плиты h_p (рис. 3). При такой конструкции инструмента продольно изогнутая заготовка со стороны максимальной высоты упирается в плоскость осадочной плиты, на которой крепиться профиль выпуклой вставки, что исключает выкалывание заготовки из зоны деформации (см. рис. 3).

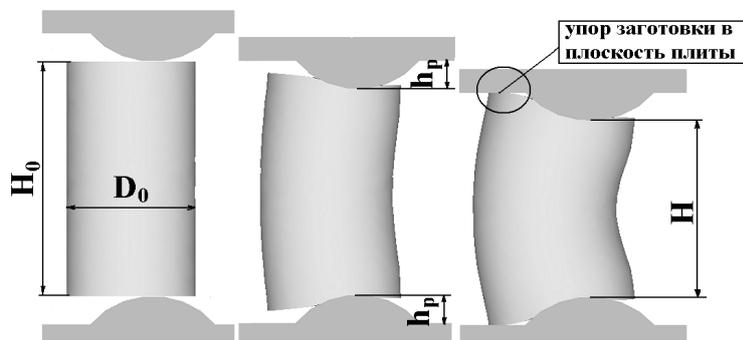


Рис. 3. Процесс осадки с искусственным упором

Выводы. На основе использования метода конечных элементов изучены основные закономерности формоизменения при осадке с эксцентриситетом внедрения выпуклых продолговатых плит в торцы заготовок с отношением $H_0/D_0 = 2,0$. Выявлено, наличие эксцентриситета внедрения выпуклых плит в торцы относительно высоких заготовок приводит к их продольному изгибу. Показано, что изменение радиуса выпуклости профиля осадочных плит оказывает существенное влияние на показатели формоизменения. Для повышения стабильности формоизменения при осадке относительно высоких заготовок предложено ограничивать высоту профиля выпуклых плит.

Литература

1. Довнар, С.А. Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объёмной штамповки [Текст] / С.А. Довнар. – М.: Машиностроение, 1975. – 254 с.
2. 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. – 2010. – № 5. – С. 19–23.
3. Совершенствование технологии штамповки на КГШП поковок для деталей поглощающих аппаратов [Текст] / 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.
4. Кухарь, В.В. Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитами [Текст] / В.В. Кухарь, С.А. Короткий, В.А. Бурко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2008. – № 5. – С. 204–208.
5. Кухарь, В.В. Влияние радиусности выпуклых продолговатых осадочных плит на деформированное состояние и степень использования запаса пластичности при кузнечной осадке [Текст] / В.В. Кухарь // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск, 2012. – № 1 (30). – С. 105–111.
6. Кухарь, В.В. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки [Текст] / 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 [Текст] / В.В. Кухарь, Б.С. Каргин, Р.С. Николенко // Вісник національного технічного університету «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. – № 46 (952). – С. 71–76.
8. 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.
9. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением [Текст]: справ. / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

© В.В. Кухарь, Р.С. Николенко

В.В. Кухар, к.т.н., проф., Р.С. Ніколенко, магістр, інженер
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОЗМІНИ ВІДНОСНО ВИСОКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ОСАДЖУВАННІ ОПУКЛИМИ ПЛИТАМИ З ЕКСЦЕНТРИСИТЕТОМ НАВАНТАЖЕННЯ

Виконано скінчено-елементне моделювання профілювання відносно високих заготовок осаджуванням випуклими плитами з ексцентриситетом навантаження. Отримані графіки залежностей показників формозміни профільованої заготовки від ступеня обтищення при фіксованому ексцентриситеті навантаження та різних величинах відношення радіуса опуклості плит до діаметра заготовки.

Ключові слова: висока заготовка, профілювання, осаджування, опуклі плити, ексцентриситет, формозміна.

V.V. Kukhar, Ph.D., Professor, R.S. Nikolenko, M.Sc., Engineer
SHEI «Priazovskyi State Technical University», Mariupol

SIMULATION OF THE FORM CHANGING OF RELATIVITY HIGH WORKPIECES DURING UPSETTING BY CONVEX PLATES WITH ECCENTRICITY OF THE LOAD

Finite element simulation of profiling of upsetting of relativity high billets by convex plates with eccentricity of the load was executed. Graphics of depending of form-changing indexes of profiled work-piece from degree of upsetting with fixed eccentricity of the load and different relations of radius of convexity plates to diameter of the work-piece were obtained.

Keywords: high billet, profiling, upsetting, convex plates, eccentricity, form-changing.

УДК 621.979

Ю.П. Бородий, ассист., В.А. Маковей, к.т.н., доц.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО СЛОЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ

В материалах статьи приведены результаты экспериментальных исследований влияния различных комбинированных методов поверхностного упрочнения рабочих элементов штампов для разделительных операций. Определены наиболее оптимальные режимы их обработки на основе поверхностного пластического деформирования шариком и электроискровым легированием различных материалов режущих кромок оснастки.

Ключевые слова: штамп, поверхностное упрочнение, комбинированное упрочнение, электроискровое легирование, поверхностное пластическое деформирование (ППД).

Актуальность проблемы. В современных условиях рыночной экономики повышается спрос на конкурентоспособную промышленную продукцию, современные технически совершенные изделия. Это требует систематического и быстрого их внедрения в производство, повышения производительности и качества изделий.

Одним из основных путей повышения производительности труда в металлообрабатывающей промышленности является применение холодной листовой и объемной штамповки — наиболее прогрессивных методов обработки металлов давлением.

Экономическая целесообразность применения холодной штамповки тесно связана со стоимостью штампов, приходящейся на единицу изделия, величина которой в основном обусловлена их стойкостью. Высокая стойкость штампов — главное условие рентабельности работы штамповочных цехов. От нее в значительной степени зависят качество и себестоимость штампованных изделий. Первоначальные затраты на штамповочный инструмент составляют около 15...25 % от общей себестоимости продукции. Нужно также учитывать тенденцию к удорожанию инструментальных и штамповых сталей.

Достижение высокой прочности и износостойкости поверхности рабочих деталей штампов в большой степени зависит от исходных свойств поверхностных слоев, сформированных при их изготовлении с помощью упрочняющих технологий — термической, химико-термической, электроискровой, лазерной и др.

Значительный интерес для практики представляет метод электроискрового легирования (ЭИЛ) [1]. Основные преимущества метода заключаются в возможности переноса на обрабатываемую поверхность материалов высокой твердости (твердых сплавов), в высокой прочности сцепления упрочненного слоя с основанием, нанесении покрытия без заметной деформации деталей.

Постановка задачи исследований. Значительные преимущества имеют технологии комбинированного упрочнения режущих элементов штампов с сочетанием электрофизических, механических, химико-термических, термических и других методов [2]. С помощью комбинированного упрочнения появляется возможность создания многослойных износостойких покрытий на поверхности деформирующего инструмента. При этом удастся в значительной мере преодолеть недостатки каждого отдельного метода упрочнения и управлять свойствами покрытия.

Целью работы явилось проведение экспериментальных исследований особенностей формирования поверхностного износостойкого слоя рабочих элементов штампов с использованием комбинированных методов поверхностного упрочнения (ЭИЛ и ППД).

Основной материал и результаты. В работе предлагаются для исследования следующие комбинированные методы поверхностного упрочнения:

- 1). Электрофизические методы и поверхностное пластическое деформирование:
 - ППД + ЭИЛ твердосплавным электродом + ППД;
 - ППД + ЭИЛ + ППД + ЭИЛ медью;
 - многократное нанесение покрытия ЭИЛ + ППД + ЭИЛ + ППД (до 4 проходов).
- 2). Сочетание различных видов электроискрового легирования:
 - ЭИЛ графитовым электродом, следующее ЭИЛ твердосплавным электродом, ЭИЛ графитовым электродом и ЭИЛ медным электродом;
 - нанесение покрытия в несколько слоев путем проведения ЭИЛ различными режимами;
 - периодическая обработка ЭИЛ в процессе износа режущих кромок при работе штампа.

При этом проводилось сравнение стойкости режущих кромок с покрытием нитридом хрома. В ходе выполнения работы были проведены исследования основных технологических параметров процесса ЭИЛ с вибрацией электрода, от которых зависит его эффективность, а также влияние на стойкость комбинированных покрытий. При этом установлены следующие оптимальные их значения:

- удельное время обработки составляет 1–2 минуты на один квадратный сантиметр упрочняемой поверхности;
- ток в импульсе разряда составляет 45...55 А;
- глубина упрочненного слоя составляет около 0,2 мм.

На рис. 1 приведена зависимость микротвердости от удельного времени ЭИЛ с вибрацией электрода на глубине 50 мкм от поверхности. На рис. 2 приведено распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя на стали У7 (удельное время ЭИЛ 2 мин/см²).

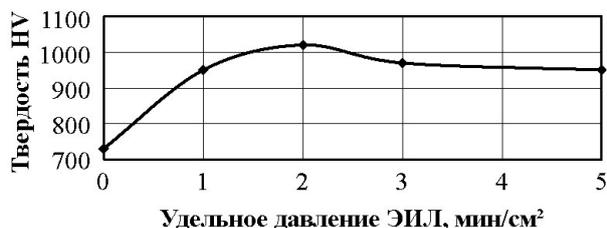


Рис. 1. Зависимость микротвердости от удельного времени ЭИЛ (глубина 50 мкм)

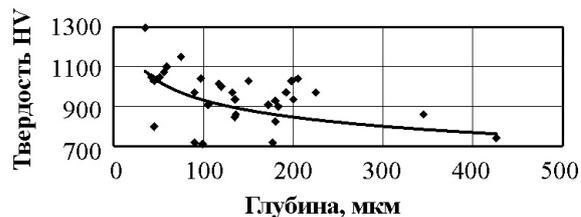


Рис. 2. Измерение микротвердости стали У7 (удельное время ЭИЛ 2 мин/см²)

Другой составляющей комбинированного упрочнения является процесс поверхностного пластического деформирования. В ходе исследований упрочненного слоя при ППД путем обкатки роликом или шариком было установлено, что его толщина составляет 0,2...0,24 мм. При этом экспериментально подтверждено, что оптимальное количество переходов составляет 3...5.

Упрочнение поверхности отожженной стали ШХ15 различными способами, в том числе комбинированными, и исследования микротвердости упрочненного слоя позволили сравнить их эффективность. Так, ППД (прессование на 0,3 мм по диаметру) дает повышение микротвердости с HV 194...206 до HV 250...280; ЭИЛ — до HV 700...750, а лучший результат удается получить при комбинированных методах упрочнения — сочетание ППД и ЭИЛ (повышение микротвердости до HV 800...830), а также ППД с ЭИЛ и последующим ППД (повышение микротвердости до HV 900...920).

Для оценки достоверности результатов в работе рассмотрены следующие способы ППД кольцевого образца: прессованием образца с внешним диаметром, большим диаметра матрицы, и изменяющимся в экспериментах (больше диаметра матрицы на 0,3 мм и 0,6 мм) и обкатка шариком диаметром 10 мм за 3...4 перехода с переменным усилием на шарике.

Первый способ дает возможность моделировать разный уровень остаточных напряжений на поверхности. Второй способ имеет практическое применение, и позволяет многократно пластично деформировать рабочую поверхность до и после ЭИЛ твердосплавным электродом на универсальном оборудовании. При этом для исследований были использованы стали разных классов: ШХ15, У7 и стали 45 (в отожженном и закаленном состояниях).

Пластическое деформирование прессованием приводит к увеличению твердости вблизи поверхности в случае прессования образца диаметром 39,3 мм — в 1,25 раза, а в случае прессования образца диаметром 39,6 мм — в 1,38 раза (рис. 3).

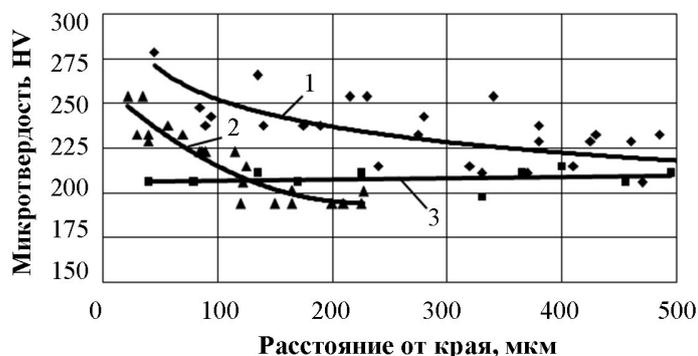


Рис. 3. Влияние поверхностного пластического деформирования прессованием на твердость стали ШХ15 отожженной (HV 198...211):

1 – прессование заготовки диаметром 39,6 мм; 2 – прессование заготовки диаметром 39,3 мм; 3 – образец без обработки

В дальнейшем проводили ЭИЛ образца диаметром 39,3 мм, прессование, а затем ЭИЛ, что увеличивает твердость на расстоянии от края 30...50 мкм до значений HV 500...520 (рис. 4).

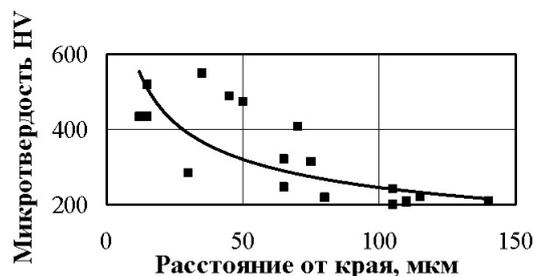


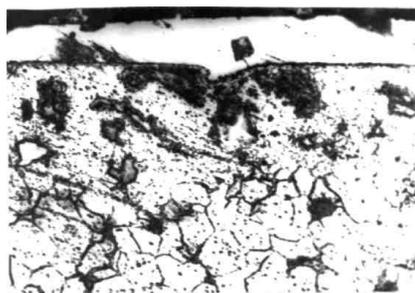
Рис. 4. Влияние комбинированной обработки (ППД прессованием, ЭИЛ и последующее ППД) на твердость отожженной стали ШХ15 (HV 194...206)

Электроискровое легирование цилиндрических поверхностей проводилось при использовании мягкого режима (сила тока в импульсе разряда — 35...40 А).

При многократном повторном легировании по технологии: предыдущее ППД обкатыванием шариком – ЭИЛ твердым сплавом – ППД обкаткой шариком – ЭИЛ твердым сплавом – ППД обкатыванием шариком возникают закаленные участки из слоевой структуры из закаленных и несколько раз перезакаленных объемов, в которых повышенный состав карбидов вольфрама и линз (рис. 5).



а) $\times 1000$



б) $\times 500$

Рис. 5. Структурные изменения поверхностного слоя при ЭИЛ твердым сплавом высокоуглеродистой стали (а) и малоуглеродистой стали (б)

При пластическом деформировании поверхностного слоя происходит деформирование, измельчение и образование вторичных структур, которые состоят из перенесенных карбидов и основного материала. Обкатка шариком, а затем ЭИЛ дает возможность проведения повторного ЭИЛ, увеличивает толщину упрочненного слоя и его плотность. В случае высокоуглеродистых сталей многократное ЭИЛ и обкатку шариком проводят до закалки.

Предварительно были проведены исследования поверхностного пластического деформирования цилиндрических образцов диаметром 40 мм из стали 45 (HV 414...420) обкаткой шариком. При этом исследовали влияние величины усилия, приложенного к шариком, и количество переходов на твердость, которую измеряли микротвердомером ПМТ-3. Результаты исследований подобные данным, полученным при прессовании образцов из отожженной стали ШХ15. Установлено увеличение твердости в 1,25...1,5 раза после обкатки за 4 перехода с различным усилием. Увеличение количества переходов до 8 не приводит к увеличению твердости на поверхности.

Влияние комбинированной обработки (ППД шариком за 4 перехода, механизированное электроискровое легирование в мягком режиме (сила тока в импульсе разряда — 35...40 А), ППД шариком за 4 перехода) изучали на цилиндрических образцах диаметром 40 мм из стали 45 (HV 414...420). Установлено увеличение твердости в 2...2,5 раза (рис. 6).

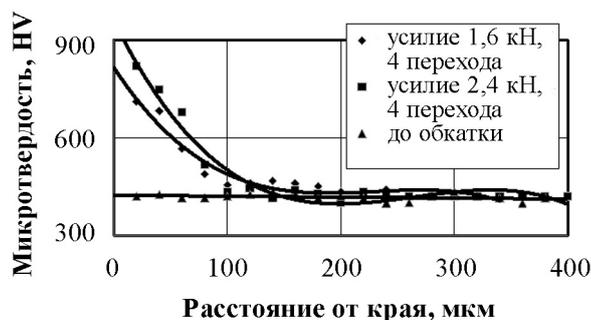


Рис. 6. Влияние комбинированной обработки (ППД + ЭИЛ + ППД) на микротвердость закаленной стали 45 (HV 414...420)

Выводы

1. Исследования подтвердили возможность создания новых физико-механических свойств поверхности.
2. Существует возможность увеличивать поверхностную твердость режущих кромок и изменять структуру поверхностного слоя насыщением азотом, внесением легирующих элементов и образованием аморфных включений, а тем самым повысить износостойкость рабочих элементов разделительных штампов.

Литература

1. Маковей, В.А. Влияние электроискрового легирования на износ режущих элементов штампов [Текст] / В.А. Маковей, Ю.П. Бородий // КШП. ОМД. – 2011. – № 9. – С. 30–33.
2. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст]: справ. / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

© Ю.П. Бородий, В.А. Маковей

Ю.П. Бородий, асист., В.О. Маковей, к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗНОСОСТІЙКОГО ШАРУ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛЮВАЛЬНИХ ШТАМПІВ

У матеріалах статті наведені результати експериментальних досліджень впливу різних комбінованих методів поверхневого зміцнення робочих елементів штамів для розділювальних операцій. Визначено найбільш оптимальні режими їх обробки на основі поверхневого пластичного деформування кулькою та електроіскровим легуванням різних матеріалів різальних кромок оснащення.

Ключові слова: штамп, поверхневе зміцнення, комбіноване зміцнення, електроіскрове легування, поверхневе пластичне деформування (ППД).

Yu.P. Borodiy, Assistant, V.A. Makovey, Ph.D., Associate Professor

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FORMATION OF THE HARDWEARING SURFACE LAYER OF WORK ITEMS SEPARATION STAMPS

The materials of the article present the results of experimental studies of the combined effect of different methods of surface hardening of work items stamps for separation operations. Identified the most optimal modes of processing based on their surface plastic deformation by the ball and the electrospark doping of different materials cutting edge equipment.

Keywords: stamp, surface hardening, combined hardening, electrospark doping, surface plastic deformation.

А.А. Симонова, к.т.н., доц.

Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

Э. Филиппи, д.т.н., проф., Ф. Дюкобю, к.т.н., ассистент

Университет Монса (Бельгия)

Н.В. Вerezуб, д.т.н., проф., Ю.Н. Корытко, к.т.н., доц.

Национальный технический университет «ХПИ»

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Приведены результаты обрабатываемости низкоуглеродистых сталей с объемной субмикроструктурной структурой в процессе механической обработки в сравнении с их крупнокристаллическими аналогами.

Ключевые слова: субмикроструктурные материалы, низкоуглеродистые стали, механическая обработка.

Введение. Низкоуглеродистые конструкционные стали в настоящее время широко применяют в строительстве, при низкой стоимости они обладают хорошей пластичностью, вязкостью и достаточно высоким уровнем прочностных свойств. В тоже время разработка и создание сложных инженерных конструкций требует повышение прочности конструкционных материалов при одновременном сохранении пластичности.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Повышение прочностных характеристик низкопрочных материалов может быть достигнуто за счет уменьшения размеров зерна (зернограничное упрочнение) и формирование субструктуры (субструктурное упрочнение). Эффективным способом улучшения прочности являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Экспериментальные работы по ИПД сталей [1–4] показали реальную возможность создания новых высокопрочных материалов на основе недорогих углеродистых и низколегированных сталей.

Прочность низкоуглеродистых малолегированных сталей с субмикроструктурной структурой (СМК) при комнатной температуре в 2...2,5 раза выше, чем серийно выпускаемых, при сохранении удовлетворительной пластичности и высокой вязкости [3]. Такие стали сочетают высокие прочностные свойства и высокие показатели пластичности и ударной вязкости при отрицательных температурах.

Нано- и субмикроструктурные структуры, формирующиеся при ИПД, обладают значительной дефектностью структуры и при нагреве до 0,3–0,4 $T_{пл}$ обычно переходят в низкопрочное крупнокристаллическое состояние [5].

В работе [6] проанализировано влияние процесса резания, сопровождаемого высокими термическими нагрузками, на интенсивность роста зерна исходной СМК структуры чистых металлов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Значительную часть изделий из сталей получают методами лезвийной обработки, поэтому изучение влияния СМК структуры на обрабатываемость при резании и в свою очередь условий процесса на структуру исходной заготовки является актуальной проблемой.

Постановка задачи. В данной работе ставится задача изучить влияние параметров лезвийной обработки на изменение механических свойств стали Ст3 и характеристики процесса резания.

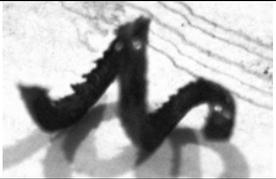
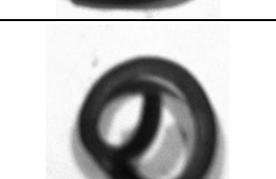
Основной материал и результаты. Сталь Ст3 (Fe – 0,22 C) в исходном крупнокристаллическом состоянии – прокат – диаметр 20,4 мм, длина 100,2 мм. Получение субмикроструктурного состояния осуществлялось методом всестороннейковки,

включающей в себя этапы осадки и протяжки [5]. Размеры заготовки после ИПД диаметр 14,6 мм, длина 177 мм.

Для исследования влияния механической обработки использовались различные режимы резания: $V = 30\text{--}130$ м/мин, $S = 0,2\div 0,5$ мм/об. Использовалась постоянная глубина резания $t = 0,5$ мм. Процесс резания осуществлялся без охлаждения. Составляющие силы резания измерялись с помощью динамометра Kistler 9257B и усилителя Kistler 5017B. Качество поверхностного слоя после обработки исследовалось с помощью профилометра Diavite DH-6. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор 10 г.

Для качественной оценки деформационных процессов исследовали изменение формы и вида стружки в зависимости от параметров лезвийной обработки. Различие между формой и видом стружки, полученной при токарной обработке КК и СМК стали, представлено в табл. 1. Вид стружки определен по стандарту ISO 3685-1977 [7].

Таблица 1. Форма и вид стружки при обработке точением СМК и КК стали

| | | | | | |
|-----------------|---------------|---|---|---|--|
| Скорость, м/мин | 30 |  |  | | |
| | 80 |  |  |  |  |
| | 130 |  |  | | |
| | | КК | СМК | КК | СМК |
| | 0,5 | | 0,2 | | |
| | Подача, мм/об | | | | |

Анализ стружки, полученной в процессе точения, показал, что при обработке исходной крупнокристаллической стали, при малых скоростях, формируется суставчатая короткая стружка. С увеличением скорости изменение формы стружки практически не происходит. Уменьшение подачи до $S = 0,2$ мм/об приводит к переходу от суставчатой короткой к суставчатой длинной стружке.

При рассмотрении стружки субмикроструктурной стали (после всесторонней ковки) при малых скоростях и подачах установлено, что формируется короткая суставчатая стружка, короче, чем для КК стали. Уменьшение длины стружки в сравнении с крупнокристаллической сталью связано, вероятно, с некоторым снижением пластичности стали, полученной методом ИПД.

С увеличением скорости резания стружка меняет форму от короткой суставчатой до суставчатой длинной.

Уменьшение подачи приводит к переходу от суставчатой длинной к сливной стружке.

По мере дальнейшего увеличения скорости теоретически суставчатая длинная стружка должна переходить в сливную, однако наблюдается переход в суставчатую короткую и даже элементную с ярко выраженными зубуринами. Такое явление присуще

жаропрочным сталям и сплавам, а также титановым сплавам. Физическая причина данного явления до настоящего времени полностью не выяснена [8]. Дальнейшее металлографическое исследование корней стружки, возможно, даст объяснение установленному явлению.

Механические свойства обрабатываемого материала весьма сложно и противоречиво влияют на составляющие силы резания. С одной стороны, повышение прочности и твердости обрабатываемого материала увеличивает угол сдвига, что уменьшает коэффициент усадки стружки и величину относительного сдвига. В результате этого уменьшаются работы деформации и стружкообразования и, как следствие, составляющие силы резания. С другой стороны, с повышением прочности и твердости напряжения на условной плоскости сдвига возрастают, что увеличивает работы деформации, стружкообразования и составляющие силы резания. В зависимости от того, что является преобладающим, силы резания при увеличении прочности и твердости обрабатываемого материала могут и возрастать и уменьшаться.

На рис. 1 представлены результаты измерения составляющих силы резания.

Экспериментальные данные показывают, что главная составляющая силы резания P_z при обработке СМК стали выше, чем при обработке КК стали с низкой скоростью $V = 30$ м/мин. Увеличение значений P_z связано с увеличением твердости и прочности СМК стали. Также мы видим увеличение значений радиальной P_y и осевой P_x составляющих силы резания.

После увеличения скорости резания до 80 м/мин наблюдается резкое снижение значений всех составляющих сил резания как для СМК так и для КК стали.

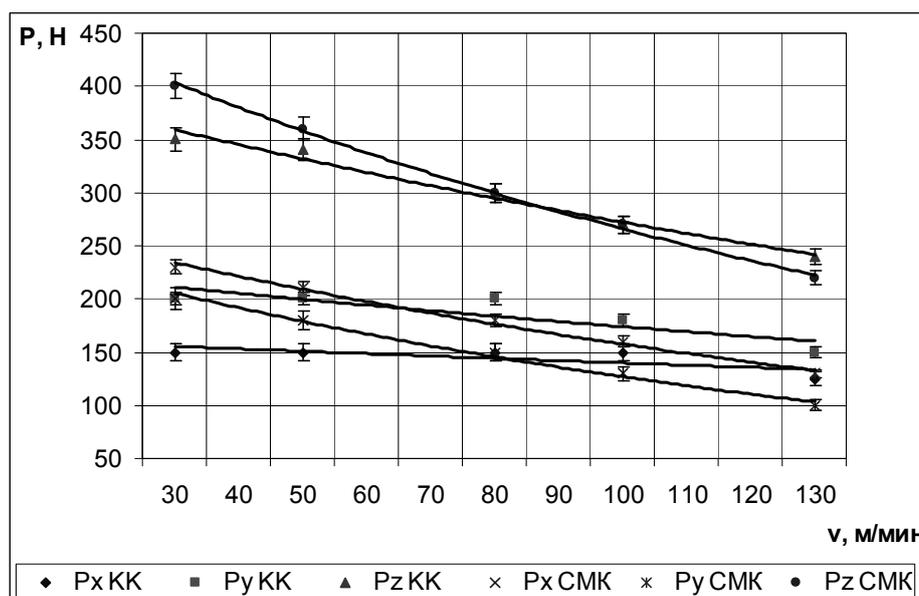
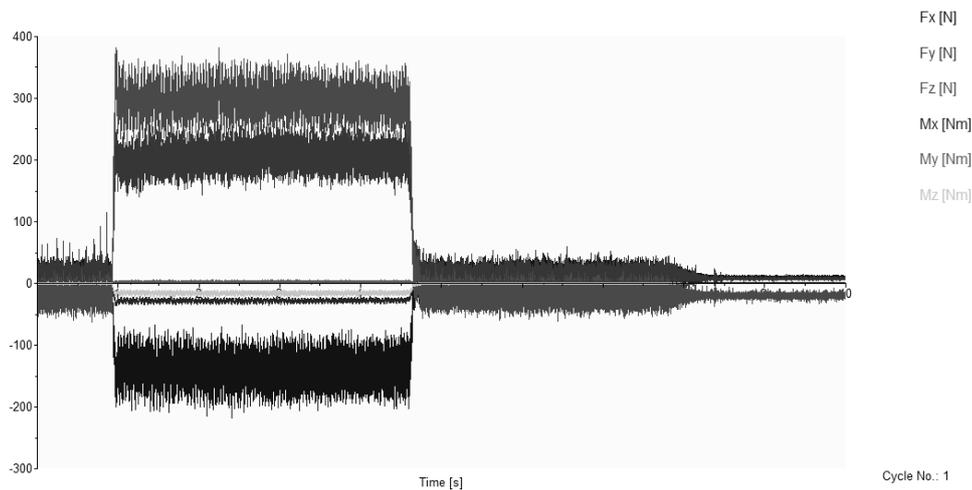


Рис. 1. Зависимость составляющих силы резания от скорости резания ($S = 0,2$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

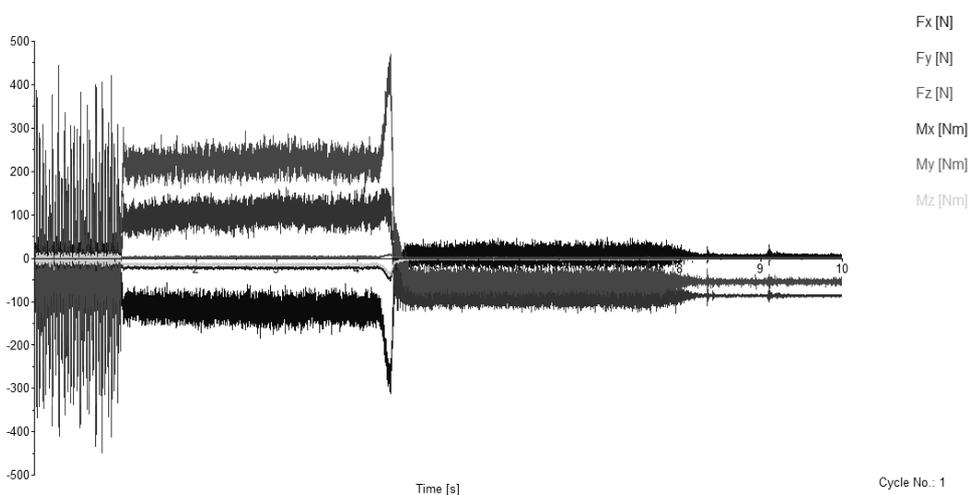
В связи с тем, что скорость 80 м/мин является «переломной» для зависимости изменения составляющих силы резания от скорости резания, то для нее приведены осциллограммы, полученные на динамометрическом стенде (рис. 2).

Изучения влияния подачи на процесс обработки производили, изменяя величину подачи до 0,5 мм/мин. Результаты показано на рис. 3.

Диаграммы показывают, что увеличение подачи увеличиваются значения составляющих сил резания по сравнению с обработкой при подаче $S = 0,2$ мм/об. Однако тенденция уменьшения силовых характеристик при обработке с высокими скоростями резания СМК стали, относительно КК стали сохраняется.



a)



б)

Рис. 2. Осциллограммы составляющих силы резания:
 а) СМК сталь, б) КК сталь ($V = 80$ м/мин; $S = 0,2$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

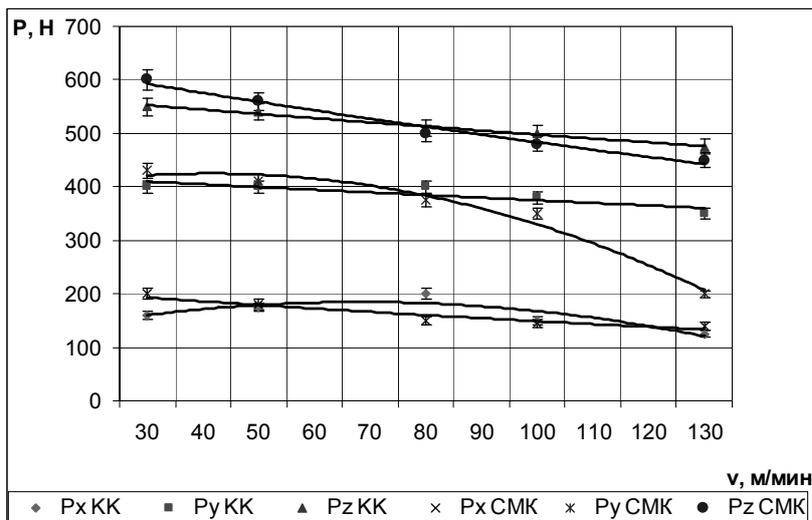
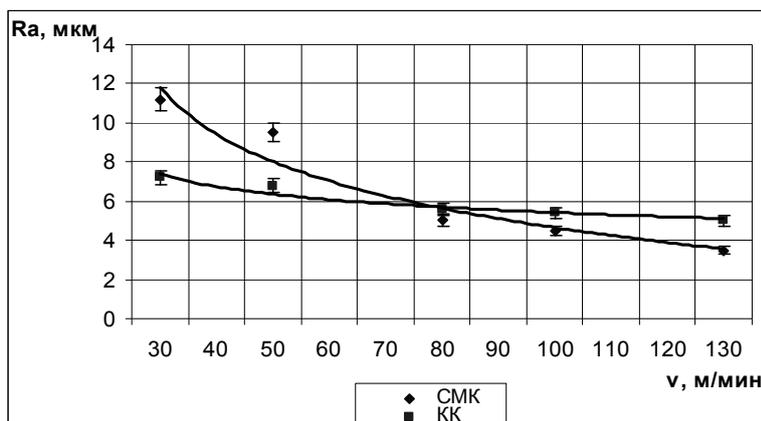


Рис. 3. Зависимость составляющих силы резания от скорости резания
 ($S = 0,5$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

Одной из важнейших и стандартных характеристик качества поверхности детали после механической обработки является шероховатость.

Результаты измерения шероховатости поверхности после обработки приведены на рис. 4.



а)

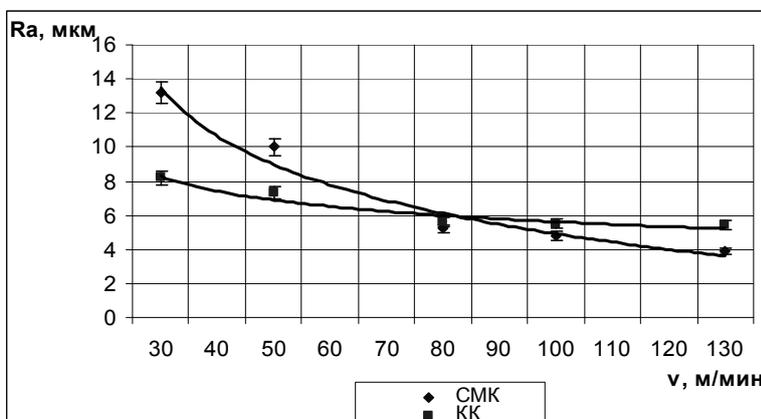


Рис. 4. Зависимость изменения шероховатости поверхности от скорости резания ($t = 0,5$ мм):
а) $S = 0,2$ мм/об; б) $S = 0,5$ мм/об

При обработке СМК стали параметр шероховатости ниже, чем при обработке КК образца. С повышением прочности и твердости и снижением пластичности материала объем пластической деформации уменьшается, и это приводит к уменьшению высоты неровностей. Представленное, на рис. 4, различие в величине параметра Ra указывает на физико-механические изменения, имеющиеся в стали после ИПД.

По мере увеличения скорости резания высота неровностей непрерывно уменьшается. Это связано с уменьшением объема пластической деформации и среднего коэффициента трения.

Микротвердость — это важнейший экспериментальный фактор, позволяющий определить зависимость роста зерна СМК металлов от температуры и времени ее воздействия, так как величина микротвердости зависит от величины размера зерна структуры.

Экспериментально установлено, что микротвердость исходного крупнокристаллического материала составляет 924 МПа; микротвердость стали, полученной методом всестороннейковки, существенно выше и достигает 1120 МПа, что характерно для СМК и НК материалов, полученных ИПД [6].

Процесс механической обработки приводит к изменению микротвердости поверхностного слоя металла.

Анализ полученных результатов показал, что при низких значениях скорости резания ($V = 30$ м/мин) величина микротвердости у образца с СМК структурой снижается

до 1100 МПа; при увеличении скорости до 130 м/мин микротвердость существенно изменяется — ее значение составляет 998 МПа (см. рис. 5).

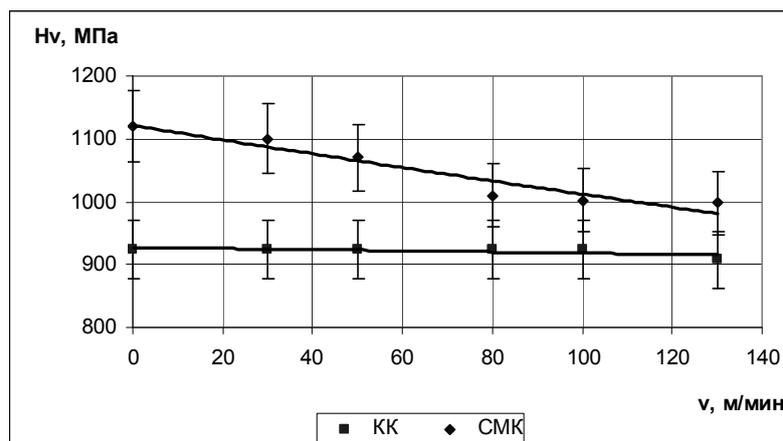


Рис. 5. Зависимость изменения микротвердости от скорости резания ($S = 0,5$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

В образце с крупнокристаллической структурой при обработке на указанных режимах величина микротвердости осталась практически постоянной.

Снижение микротвердости может быть объяснено процессом рекристаллизации в субмикрокристаллическом образце, вызванном повышением температуры в зоне резания вследствие увеличения скорости резания в связи с тем, что металл, подвергнутый ИПД, имеет нестабильную зеренную структуру.

Сравнивая полученные результаты с результатами, полученными для чистых металлов [9], наблюдается более низкая динамика изменения в параметрах обрабатываемости СМК стали при увеличении скорости резания при механической обработке, что может быть объяснено наличием элементов, стабилизирующих систему.

Выводы. Представленные экспериментальные результаты косвенно показывают, что тепловые и деформационные процессы сопровождающие процесс резания активизируют начало рекристаллизации и роста исходного зерна в образцах с субмикрокристаллической структурой, полученной ИПД. Кроме того, состояние структуры и физико-механические свойства СМК стали приводят к изменению обрабатываемости и сопровождающих процесс резания тепловых и силовых параметров обработки. Поэтому является необходимым дальнейшее изучение особенностей механики процесса лезвийной обработки СМК металлов, полученных ИПД.

Литература

1. Астафурова, Е.Г. Влияние высокотемпературного отжига на микроструктуру и механические свойства ферритно-перлитной стали 10Г2ФТ, подвергнутой равноканальному угловому прессованию [Текст] / Е.Г. Астафурова, Г.Г. Захарова, Е.В. Найденкин и др. // ФММ. – 2011. – Т. 111, № 1. – С. 64–73.
2. Салищев, Г.А. Структура и механические свойства нержавеющей сталей, подвергнутых интенсивной пластической деформации [Текст] / Г.А. Салищев, Р.Г. Зарипова, А.А. Закирова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2006. – № 2 (608) – С. 27–34.
3. Воронова, Л.М. Низкотемпературная рекристаллизация субмикрокристаллической структуры армко-железа и стали 30Г2Р [Текст] / Л.М. Воронова, М.В. Дегтярев, Т.И. Чащухина // ФММ. – 2004. – Т. 98, № 1. – С. 93–102.
4. Son, Y.I. Ultrafine grained ferrite-martensite dual phase steels fabricated via equal channel angular pressing: Microstructure and tensile properties [Text] / Y.I. Son, Y.K. Lee, K.T. Park and other // Acta Mater. – 2005. – V. 53. – P. 3125–3134.

5. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
6. Symonova, A.A. Surface grain coarsening and surface during machining of ultra-grained titanium [Text] / A.A. Symonova, O.N. Verezub, A.A. Sycheva and other // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2012. – V. 48. – P. 378–389.
7. Мазур, М.П. Основи теорії різання матеріалів [Текст]: підруч. / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок та ін. – Львів: Новий Світ, 2000, 2010. – 422 с.
8. Яцерицин, П.И. Теория резания [Текст] / П.И. Яцерицин, Е.Э. Фельдштеин, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.
9. Грабченко, А.И. Резание металлов с объемной нано- и субмикроструктурной структурой [Текст]: моногр. / А.И. Грабченко, Дж. Каптай, А.А. Симонова и др. – Х.: Точка, 2012. – 217 с.

© А.А. Симонова, Э. Филиппи, Ф. Дюкобю, Н.В. Вerezub, Ю.Н. Корытко

А.А. Симонова, к.т.н., доц.

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського

Е. Філіппі, д.т.н., проф., Ф. Дюкобю, к.т.н., асистент

Університет Монсу (Бельгія)

М.В. Вerezub, д.т.н., проф., Ю.М. Корытко, к.т.н., доц.

Національний технічний університет «ХПІ»

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНИХ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Приведено результати оброблюваності низьковуглецевих сталей з об'ємною субмікроструктурною в процесі механічної обробки у порівнянні із їх крупнокристалічними аналогами.

Ключові слова: субмікроструктурні матеріали, низьковуглецеві сталі, механічна обробка.

A.A. Symonova, Ph.D., Associate Professor

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

E. Filippi, Doctor of Technical Sciences, Professor, F. Ducobu, Ph.D., Assistant

University of Mons (Belgium)

N.V. Verezub, Doctor of Technical Sciences, Professor, Y.N. Korytko, Ph.D., Associate Professor

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»

CONTROL OF THE CUTTING PROCESS OF ULTRA-FINE-GRAINED LOW-CARBON STEEL

The results of the machinability of low-carbon steel with the volume ultra-fine-grained structure during machining in comparison with their counterparts coarse-grained are adduced.

Keywords: ultra-fine-grained materials, low-carbon steel, machining.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ ГНУЧКИХ ТРУБЧАСТИХ СКРЕБКОВИХ КОНВЕЄРІВ ДВОВИМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Досліджено залежність частоти власних коливань канату від швидкості пересування сипкого середовища, його амплітуди, фізико-механічних властивостей матеріалу у трубчастих скребкових конвеєрах і умови існування резонансних коливань за дії періодичного збурення на систему. Виведено залежність резонансних коливань, а значить і максимальних динамічних зусиль у канаті від кінематичних, геометричних та фізико-механічних параметрів і стійкість процесу.

Ключові слова: канат, коливання, амплітуда, швидкість.

Вступ. Для гнучких привідних елементів (канатів) конвеєрів потрібно ще на стадії проектування визначити спектр власних частот, вибирати параметри та режими експлуатації таким чином, щоб уникнути резонансні явища у них, а значить, забезпечити довготривалу їх експлуатацію. Дослідити це можна тільки на основі побудови та аналізу розв'язків математичних моделей, які адекватні динамічному процесу.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Для випадку коливальних систем (привідних канатів транспортерів у тому числі) це, в першу чергу, комбінаційні резонанси, залежність частоти коливань від амплітуди, відсутність принципу суперпозиції, втрата стійкості займалося багато науковців Андронов І.В. [1] Бабаков І.М [2], Боголюбов Н.Н. [3], Блэкьер О. [4], Гробов В.А [5], Доценко П.Д. [6], Кузьо І.В., Сокіл Б.І. [7] тощо.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Побудова аналітичних розв'язків нелінійних математичних моделей коливань гнучких елементів привідних елементів конвеєрних канатів, які враховують постійну складову швидкості їх руху та аналіз на їх основі впливу кінематичних, фізико-механічних, геометричних параметрів на динамічний процес є предметом розгляду статті. Вона базується на: а) принципі одночастотності коливань у нелінійних системах із багатьма ступенями вільності та розподіленими параметрами [3, 8]; б) хвильовій теорії руху [9, 10, 11], яка адаптована для поздовжньо-рухомих систем [12–13]; в) поширенні основної ідеї методу Ван-дер-Поля [14] на розглядувані класи динамічних систем.

Постановка завдання. Дослідити амплітуду коливань частоти вимушуючої сили при проходженні головного резонансу за різних швидкостей руху канату.

Основний матеріал і результати. Набагато складнішим і одночасно більш важливішим з огляду на практичну сторону є дослідження резонансного випадку канату. Резонансні коливання можуть виникати на частотах кратних $2V/l$ або $\pi V/2l$ їх дробовим частинам. Із математичної сторони всі викладки, які стосуються резонансу зумовленого збуренням крайових умов (резонанс на частоті $2V/l$ або кратній чи дробовій її частині) ідентичні резонансу на іншій частоті (зумовленій нерівномірним розподілом маси сипкого середовища між скребками та використанням змінних Ейлера). Тому нижче зупинимось на більш важливому, на наш погляд, першому випадку, а для другого — наведемо тільки остаточні розрахункові залежності.

Зважаючи на вказане вище, розглянемо випадок

$$\Omega^2 = \left(\frac{p}{q} \frac{2V}{l} \right)^2 + \mu\Delta \quad \text{або} \quad \Omega^2 = \left(\frac{p}{q} \frac{\pi V}{2l} \right)^2 + \mu\Delta \quad (1)$$

де $\mu\Delta$ – відхилення квадрата власної частоти від частоти зовнішнього збурення.

Таким чином, поставлена задача звелась до інтегрування рівняння за неоднорідних крайових умов. Для цього подамо їх у більш загальному вигляді

$$\begin{aligned} u_i(x_i, t)|_{x_i=0} &= \mu g_{i0} \left(u(x_i, t), \frac{\partial u(x_i, t)}{\partial x_i}, \frac{\partial u(x_i, t)}{\partial t} \right) \Big|_{x_i=0} ; \\ u_i(x_i, t)|_{x_i=L} &= \mu g_{iL} \left(u(x_i, t), \frac{\partial u(x_i, t)}{\partial x_i}, \frac{\partial u(x_i, t)}{\partial t} \right) \Big|_{x_i=L} . \end{aligned} \quad (2)$$

Для цього, перш за все, задачі із неоднорідними крайовими умовами замінами змінних

$$u_i(x_i, t) = v_i(x_i, t) + \mu w_i(x_i, t) \quad (3)$$

зведемо до більш простих — задач із однорідними крайовими умовами. Дійсно, якщо функції $w_i(x_i, t)$ та $v_i(x_i, t)$ є розв'язками диференціальних рівнянь

$$\frac{\partial^2 w_i(x_i, t)}{\partial x_i^2} = 0, \quad (4)$$

та

$$\frac{\partial^2 v_i(x_i, t)}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 v_i(x_i, t)}{\partial t \partial x_i} - \left(\frac{EA}{m_0} - V^2 \right) \frac{\partial^2 v_i(x_i, t)}{\partial x_i^2} = \mu F_i \left(v_i(x_i, t), \frac{\partial v_i(x_i, t)}{\partial t}, \frac{\partial^2 v_i(x_i, t)}{\partial x_i^2}, \vartheta \right), \quad (5)$$

і задовольняють відповідно крайові умови

$$\begin{aligned} w_i(x_i, t)|_{x_i=0} &= \mu g_{i0} \left(v(x_i, t), \frac{\partial v(x_i, t)}{\partial x_i}, \frac{\partial v(x_i, t)}{\partial t} \right) \Big|_{x_i=0} ; \\ w_i(x_i, t)|_{x_i=L} &= \mu g_{iL} \left(v(x_i, t), \frac{\partial v(x_i, t)}{\partial x_i}, \frac{\partial v(x_i, t)}{\partial t} \right) \Big|_{x_i=L} \end{aligned} \quad (6)$$

та

$$v(x, t)|_{x=0} = 0; \quad v(x, t)|_{x=L} = 0, \quad (7)$$

то отримані таким способом функції $u_i(x_i, t)$ будуть у першому наближенні задовольняти поставленій задачі із неоднорідними крайовими умовами.

Поширити основну ідею методу Ван-дер-Поля на досліджувані класи задач значною мірою полегшує принцип одночастотності коливань нелінійних систем. Із його урахуванням перше одночастотне наближення розв'язку рівняння (5) за крайових умов (6) будемо шукати у вигляді

$$v(x, t) = a(t) [\cos(Kx_i + \Omega t + \varphi(t)) - \cos(Hx_i - \Omega t - \varphi(t))], \quad (8)$$

де a , φ – сталі, K , H – хвильові числа прямої і відбитої хвиль, Ω – власна частота процесу.

Таким чином у резонансному випадку, як і у нерезонансному, розв'язком задачі вважатимемо залежність (8) у котрій амплітуда та фаза коливань є функціями часу. Проте, у резонансному випадку визначальним параметром динамічного процесу є різниця фаз власних та вимушених коливань: $\phi = \psi - \vartheta$. Якщо формально ввести цей параметр у залежність (8), то у резонансному випадку розв'язок буде представлятись у вигляді

$$u(x, t) = a(t) (\cos(Kx + \phi + \vartheta) + \vartheta(t)) - \cos(Hx - \phi - \vartheta)). \quad (9)$$

До того ж, на відміну від розглянутого нерезонансного випадку, у резонансному величини da/dt та $d\varphi/dt$, є функціями, що залежать не лише від амплітуди a , але і від різниці фаз ϕ ($\psi = \phi - \vartheta$). Таким чином, базою для визначення основних амплітудно-частотних характеристик резонансного динамічного процесу є диференціальні рівняння

$$\frac{da}{dt} = \mu\Lambda(a, \phi); \quad \frac{d\phi}{dt} = \Omega - \frac{p}{q} \frac{2V}{l} + \mu\Xi(a, \phi), \quad (10)$$

де $\Lambda(a, \phi)$, $\Xi(a, \phi)$ – невідомі функції, які необхідно знайти таким чином, щоб залежність (9), із урахуванням (10), задовольняла вихідну задачу із розгляданим ступенем точності.

З урахуванням наведеного, шляхом диференціювання (9) по змінних t, x , отримуємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} &= a \frac{d\phi}{dt} [-\sin(Kx + \phi + \vartheta) - \sin(Hx - \phi - \vartheta)] + \frac{da}{dt} [\cos(Kx + \phi + \vartheta) - \\ &- \cos(Hx - \phi - \vartheta)] - a \frac{p}{q} \frac{2V}{l} [-\sin(Kx + \phi + \vartheta) + \sin(Hx - \phi - \vartheta)]; \\ \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} &= \frac{d^2 a}{dt^2} [\cos(Kx + \phi + \vartheta) - \cos(Hx - \phi - \vartheta)] - 2 \frac{da}{dt} \left(\frac{p}{q} \frac{2V}{l} + \frac{d\phi}{dt} \right) \times \\ &\times [\sin(Kx + \phi + \vartheta) + \sin(Hx - \phi - \vartheta)] - a \frac{d^2 \phi}{dt^2} [\sin(Kx + \phi + \vartheta) + \\ &+ \sin(Hx - \phi - \vartheta)] - a \left(\frac{p}{q} \frac{2V}{l} + \frac{d\phi}{dt} \right)^2 [\cos(Kx + \phi + \vartheta) - \cos(Hx - \phi - \vartheta)]; \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} &= \frac{da}{dt} [-K \sin(Kx + \phi + \vartheta) + H \sin(Hx - \phi - \vartheta)] - \\ &- a \left(\frac{p}{q} \frac{2V}{l} + \frac{d\phi}{dt} \right) [K \cos(Kx + \phi + \vartheta) + H \cos(Kx + \phi + \vartheta)]; \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= a [-K^2 \cos(Kx + \phi + \vartheta) + H^2 \cos(Hx - \phi - \vartheta)] \end{aligned} \quad (11)$$

Подібним чином як і для нерезонансного випадку, із (5), враховуючи (11), для першого наближення маємо систему лінійних неоднорідних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих функцій da/dt та $d\phi/dt$

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} \{ &-2\Omega \sin(Kx + \phi + \vartheta) - 2\Omega \sin(Kx + \phi + \vartheta) - 2VK \sin(Kx + \phi + \vartheta) + \\ &+ 2VH \sin(Hx - \phi - \vartheta) \} + a \left(\frac{d\phi}{dt} + \frac{p}{q} \frac{2V}{l} - \Omega \right) \left\{ -2\Omega \cos(Kx + \phi + \vartheta) + 2 \frac{p}{q} \frac{2V}{l} \times \right. \\ &\times \cos(Kx + \phi + \vartheta) - 2VK \cos(Kx + \phi + \vartheta) - 2VH \cos(Kx + \phi + \vartheta) \left. \right\} = \varepsilon \bar{f}(a, x, \phi + \vartheta, \bar{\vartheta}). \end{aligned} \quad (12)$$

Після нескладних перетворень із них знаходимо

$$\begin{aligned} \cos(\phi + \vartheta) &\left\{ \frac{da}{dt} [(-2\Omega - 2VK) \sin Kx + (-2\Omega + 2VH) \sin Hx] + \right. \\ &+ a \left(\frac{d\phi}{dt} + \frac{p}{q} \frac{2V}{l} - \Omega \right) [(-2\Omega - 2VH) \cos Kx + (2\Omega - 2VH) \cos Hx] \left. \right\} + \\ &+ \sin(\phi + \vartheta) \left\{ a \left(\frac{d\phi}{dt} + \frac{p}{q} \frac{2V}{l} - \Omega \right) [(2\Omega + 2VK) \sin Kx + (2\Omega - 2VH) \sin Hx] + \right. \\ &+ \frac{d\phi}{dt} [(-2\Omega - 2VK) \cos Kx - (-2\Omega + 2VH) \cos Hx] \left. \right\} = \varepsilon \bar{f}(a, x, \phi + \vartheta, \bar{\vartheta}). \end{aligned} \quad (13)$$

Співвідношення за повільнозмінними величинами, визначаємо зв'язок між амплітудою та різницею фаз у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \frac{\mu}{4\pi L[(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]} \times \left(\int_0^L \Psi(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \phi + \theta, \bar{\vartheta}) \cos(\phi + \theta) d\theta d\bar{\vartheta} + \right. \\ &+ \left. \Theta(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \phi + \theta, \bar{\vartheta}) (\sin(\phi + \theta) d\theta d\bar{\vartheta}) \right) dx; \\ \frac{d\phi}{dt} &= \Omega - \frac{p}{q} \frac{2V}{l} - \frac{\mu}{4\pi La[(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]} \times \left(\int_0^L \Psi(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \phi + \theta, \bar{\vartheta}) \times \right. \\ &\times \left. \sin(\phi + \theta) d\theta d\bar{\vartheta} - \Theta(x) \int_0^L \Psi(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \phi + \theta, \bar{\vartheta}) \cos(\phi + \theta) d\theta d\bar{\vartheta} \right) dx. \end{aligned} \quad (14)$$

У наведених вище залежностях функції $\Psi(x)$ та $\Theta(x)$ мають вигляд аналогічний, як і для нерезонансного випадку. Це дозволяє у першому наближенні резонансні коливання канату транспортера, яка переміщає сипке середовище, описати залежністю (8), в котрій параметри $a(t)$ та $\phi(t)$ визначаються залежностями (14).

Подібним чином, як було наголошено вище, визначаються співвідношення, які описують резонансні коливання у випадку, коли власна частота коливань Ω близька до $\pi V/2l$ чи між ними існує зв'язок вигляду $q\Omega \approx p(\pi V/2l)$:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \frac{\mu}{4\pi L[(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]} \times \left(\int_0^L \Psi(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \theta, \phi + \bar{\vartheta}) \cos(\phi + \theta) d\theta d\bar{\vartheta} + \right. \\ &+ \left. \Theta(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \vartheta, \bar{\phi} + \bar{\vartheta}) \sin(\phi + \theta) d\theta d\bar{\vartheta} \right) dx; \\ \frac{d\bar{\phi}}{dt} &= \Omega - \frac{p}{q} \frac{\pi V}{2l} - \frac{\mu}{4\pi La[(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]} \times \left(\int_0^L \left(\Psi(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \vartheta, \bar{\phi} + \bar{\vartheta}) \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \sin(\bar{\phi} + \bar{\vartheta}) d\vartheta d\bar{\vartheta} - \Theta(x) \int_0^L \left(\Psi(x) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(a, x, \vartheta, \bar{\phi} + \bar{\vartheta}) \cos(\bar{\phi} + \bar{\vartheta}) d\vartheta d\bar{\vartheta} \right) dx. \right. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким чином, у другому резонансному випадку коливання канату описуються залежністю $u(x, t) = a(t) (\cos(Kx + \bar{\phi} + \bar{\vartheta}) + \vartheta(t) - \cos(Hx - \bar{\phi} - \bar{\vartheta}))$ в якій параметри a та $\bar{\phi}$ визначаються залежністю (15) ($\psi = \bar{\phi} + \bar{\vartheta}$). Наведені вище загальні результати дозволяють для описати амплітудно-частотну характеристику поздовжніх коливань віток у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \frac{\mu}{2[(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]} \{-k_1 \Omega (2\Omega + V(H - X))a + \alpha_1 \cos \phi + \alpha_2 \sin \phi\}; \\ \frac{d\phi}{dt} &= \Omega - \frac{p}{q} \frac{2V}{l} + \frac{\mu}{[(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]a} \{\alpha_3 a^3 + \alpha_4 \cos \phi + \alpha_5 \sin \phi\}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{де } \alpha_1 = \pi \left[-\left(\frac{DV}{2l^2}\right)^2 \int_0^L x \Psi(x) dx + \left(\frac{D}{2l}\right)^2 \frac{V}{l} \int_0^L \Theta(x) dx \right], \quad \alpha_2 = \pi \left[\left(\frac{DV}{2l^2}\right)^2 \frac{V}{l} \int_0^L x \Theta(x) dx + \left(\frac{D}{2l}\right)^2 \frac{V}{l} \int_0^L \Psi(x) dx \right],$$

$$\alpha_3 = \frac{EA \{ \Omega(K^4 + 4K^2H^2 + H^4) + V(K^5 + 2K^3H^2 - 2K^2H^3 - H^5) \}}{4m_0 a k \pi},$$

$$\alpha_4 = \pi \left[\left(\frac{DV}{2l^2} \right)^2 \int_0^L x \Theta(x) dx - \left(\frac{D}{2l} \right)^2 \frac{V}{l} \int_0^L \Psi(x) dx \right], \quad \alpha_5 = -\pi \left[\left(\frac{DV}{2l^2} \right)^2 \frac{V}{l} \int_0^L x \Psi(x) dx + \left(\frac{D}{2l} \right)^2 \frac{V}{l} \int_0^L \Theta(x) dx \right].$$

На базі отриманих співвідношень нижче представлені резонансні криві (рис. 1) та закони зміни амплітуди при переході через головний резонанс (рис. 2).

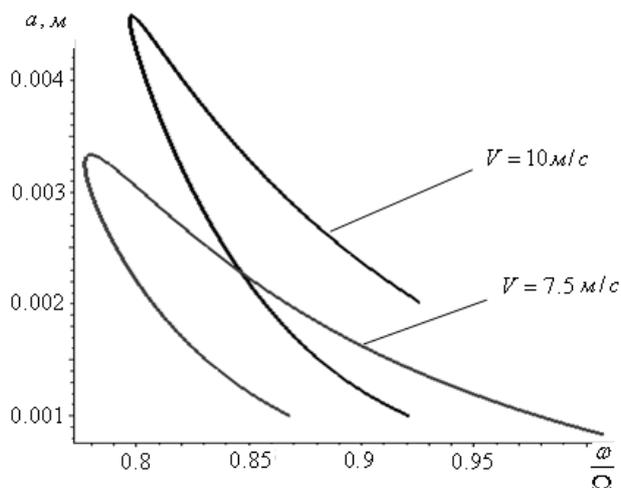


Рис. 1. Резонансні амплітуди за різних значень швидкості руху системи

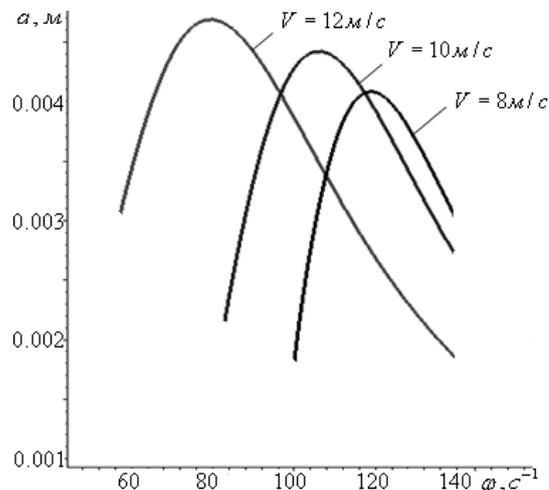


Рис. 2. Залежність амплітуди коливань від частоти вимушуючої сили при проходженні головного резонансу за різних швидкостей руху канату

Висновки. Резонансне значення амплітуди залежить як від геометричних розмірів канату, так і швидкості її поздовжнього руху. Величина резонансного значення амплітуди коливань канату у 3–4 рази більша за амплітуду нерезонансних коливань, а значить — максимальні динамічні напруження у вказаному випадку перевищують динамічні напруження усталеного процесу.

Література

1. Андронов, И.В. Неквазилинейная асимптотика задач о колебаниях балок и пластин на нелинейном упругом основании [Текст] / И.В. Андронов, Н.С. Буланова // Доп. НАН України. – К., 1995. – № 9. – С. 28–30.
2. Бабаков, И.М. Теория колебаний [Текст] / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1965. – 560 с.
3. Боголюбов, Н.Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний [Текст] / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 501 с.
4. Блэкьер, О. Анализ нелинейных систем [Текст] / О. Блэкьер. – М.: Наука, 1969. – 275 с.
5. Гробов, В.А. Асимптотические методы расчета изгибных колебаний валов турбомашин [Текст] / В.А. Гробов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 165 с.
6. Доценко, П.Д. О колебаниях и устойчивости прямолинейного трубопровода [Текст] / П.Д. Доценко // Прикладная механика. – 1971. – Вып. 3. – С. 85–91.
7. Кузьо, І.В. Вплив поздовжнього руху на поперечні коливання нелінійних пружних систем [Текст] / І.В. Кузьо, Б.І. Сокіл // Вибрації в техніці та технологіях. – 2000. – № 2 (14). – С. 44–46.
8. Митропольский, Ю.А. Асимптотические решения уравнений в частных производных / Ю.А. Митропольский, Б.И. Мосеенков. – К.: Вища школа, 1976. – 589 с.
9. Митропольский, Ю.А. О построении асимптотического решения возмущенного уравнения Клейна-Гордона [Текст] / Митропольский Ю.А. // Укр. мат. журн. – 1995. – 47, № 9. – С. 1209–1216.
10. Митропольский, Ю.А. О построении асимптотического решения возмущенного уравнения Брезертона [Текст] / Ю.А. Митропольский // Укр. мат. журн. – 1998. – 59, № 1. – С. 58–71.

11. Митропольський, Ю.О. Про застосування Атеб-функцій для побудови асимптотичного розв'язку збуреного нелінійного рівняння Клейна-Гордона [Текст] / Ю.О. Митропольський, Б.І. Сокіл // Укр. мат. журн. – 1998. – 50, № 5. – С. 665–670.

12. Chen, L.Q. Nonlinear parametric vibration of axially moving beams: asymptotic analysis and differential quadrature verification [Text] / Li-Qun Chen, Bo Wang, Hu Ding // Journal of Physics: Conference Series 181 (2009), – P. 1–8.

13. Харченко, Є. Багаточастотні коливання одновимірних нелінійно пружних рухомих середовищ та методика побудови асимптотичних наближень крайових задач, що їх описують [Текст] / Є. Харченко, М. Сокіл // Машинознавство. Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал. – 2007. – № 1. – С. 19–25.

14. Wan der Pol, B. A Theory of the Amplitude of Free and Forced Triode Vibrations [Text] // Radio Review. – 1920. – № 1.

15. Митропольський, Ю.А. Лекции по методу усреднения в нелинейной механике [Текст] / Ю.А. Митропольский – К.: Наукова думка, 1966. – 467 с.

16. Митропольський, Ю.А. Метод усреднения в нелинейной механике [Текст] / Ю.А. Митропольский – К.: Наукова думка, 1971. – 440 с.

© О.Л. Ляшук

О.Л. Ляшук, к.т.н., доц.

Тернопольского национального технического университета им. Ивана Пулюя

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ ТРУБЧАТЫХ СКРЕБКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследовано зависимость частоты собственных колебаний каната от скорости передвижения сыпучей среды, ее амплитуды, физико-механических свойств материала у трубчатых скребковых конвейеров и условия существования резонансных колебаний за действия периодического возмущения на систему. Выведена зависимость резонансных колебаний, а значит и максимальных динамических усилий в канате от кинематических, геометрических и физико-механических параметров и стойкость процесса.

Ключевые слова: канат, колебание, амплитуда, скорость.

O.L. Layshyk, Ph.D., Associate Professor

Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

RESEARCH OF RESONANCE VIBRATIONS OF FLEXIBLE TUBULAR SCRAPER CONVEYERS OF TWO-DIMENSIONAL ELEMENTS

Investigate the dependence of frequency natural oscillations of rope for speed movement friable environment, its amplitude, physical and mechanical properties of the material in tubular drag conveyors and conditions for the existence of resonant oscillations and a periodic perturbation of the system. Displaying dependence of resonance oscillations, and maximum dynamic rope efforts from kinematic, geometric, mechanical parameters and the stability of the process.

Keywords: rope, vibration, amplitude, speed.

УЧЕТ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА СЛОЖНОЙ ВЫТЯЖКИ

Рассмотрена физическая сущность трансляционной анизотропии деформируемых листовых заготовок, связанная с эффектом Баушингера. Дан анализ теорий пластичности изотропного материала с анизотропным упрочнением. Получены зависимости для определения изгибающих моментов с учетом трансляционного упрочнения при изгибе по сравнительно большому радиусу, радиуса нейтрального слоя, продольной силы и радиуса нейтрального слоя при гибке с растяжением. Разработана численная математическая модель, учитывающая трансляционную анизотропию. Дан анализ результатов расчета автокузовных деталей.

Ключевые слова: анизотропия, эффект Баушингера, сложная вытяжка, напряжения.

Введение. Экономичное производство высококачественных тонколистовых деталей, особенно сложной пространственной конфигурации, является одной из важных проблем машиностроения. В условиях рыночного производства большое значение приобретает совершенствование существующих, разработка новых ресурсосберегающих процессов листовой штамповки и обеспечение наиболее благоприятных условий формоизменения. Изыскание путей повышения эффективности листоштамповочного производства неразрывно связано с сокращением отхода металла и приближением формы и размеров заготовок к готовым изделиям, совершенствованием методов расчета формоизменения, упрочнением механизма деформирования заготовки и оценкой влияния отдельных факторов на процесс сложной вытяжки. Исследования существуют приоритетному направлению развития науки и техники «Новейшие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе».

Обзор последних источников и публикаций. Эффект Баушингера наблюдается при изменении знака (реверса) напряжений. Его возникновение по данным работ [1–3] связано с возникновением остаточных напряжений после пластического деформирования и снятия нагрузки в микроскопических объемах металла. Это следствие неоднородного распределения напряжений в зернах, различно ориентированных до разгрузки. При однородном растягивании металла с последующей разгрузкой и сжатием, обнаружили снижение предела текучести при сжатии. Разрушение может наблюдаться даже по отношению к исходному, ненаклепанному материалу [1].

Выделение нерешенной раньше части общей проблемы. Эффект Браушингера проявляется при прямом и противоположном нагружении путем смещения поверхности пластичности [4, 5]. Это приводит к изменению условия пластичности Мизеса и асоцированного закона течения. Такой вид анизотропии называется трансляционным. В работах О.Ю. Ишлинского допускается степенная зависимость координаты центра поверхности пластичности от деформации. Эта теория подтвердилась в работах В. Прагера и Ф. Ходжа. Однако эта модель удовлетворительно соответствует экспериментальным данным при малых упруго пластических деформациях [4]. В теории пластичности, которая учитывает трансляционное упрочнение, рассматривали Ю.И. Кадашевич и В.В. Новожилов. В этой теории девиатор напряжений заменяется на девиатор активного напряжения. При этом координата центра поверхности пластичности зависима от плоскости деформирования. Более точное соответствие с экспериментом больших пластических деформаций достигается при предположении, что поверхность нагружения испытывает перенос и одновременно расширяется во всех направлениях [4].

В целом существующие методы расчета и моделирования процесса сложной вытяжки облицовочных деталей транспортных средств не учитывают реверса напряжений при деформировании, эффект повышения пластических свойств материала не используется и не учитывается.

Цель исследований. Разработка метода расчета процесса вытяжки деталей сложной пространственной конфигураций с учетом реверса напряжений на фланцевой части заготовки и оценка целесообразности уточнения методов расчета процесса сложной вытяжки путем учета изменения пластических свойств материала.

Основной материал и результаты. Вид нагружения, при котором листовая заготовка подвергается многократному изгибу, наблюдается при перетягивании листа по цилиндрической поверхности в некоторых операциях гибки, вытяжке коробчатых деталей и деталей сложной формы, правки, в процессах формоизменения в лабиринте тормозных порогов и ребер прижимных устройств штампов для сложной вытяжки. Для металлов, обладающих эффектом Баушингера, необходим учет его влияния на энергосиловые и кинематические параметры при многократном изгибе. При решении задач упруго-пластического формирования металлов, обладающих эффектом Браушингера, в рамках теории течения, поверхность течения представляет собой круговой цилиндр, в девиаторной плоскости — окружность, центр которой смещен от начала координат. Смещение центра определяется параметрами анизотропии, в том числе и эффектом Баушингера [4]. При расчете энергосиловых параметров в предложенной модели, расчете напряженного состояния заготовки эффект Баушингера не учитывается. При определении изгибающего момента смещение нейтрального слоя учтено, а то, что кривые упрочнения при сжатии и растяжении различны, не учитывается.

При относительно небольшой кривизне пути деформирования явлением деформационной анизотропии, в частности эффект Баушингера можно пренебречь с распространением закона единой кривой на непропорциональное деформирование [6–8]. В противном случае, когда направляющие тензора напряжений и деформаций не совпадают между собой в процессе деформирования привлекается усложненная модель Г. Бакхауза [9]. В этой теории отношение приращения пластической деформации к приращению напряжения изменяется вдоль поверхности текучести. Однако для практического использования этой теории необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований по определению перемещения центра поверхности текучести, функции влияния, характера изменения напряжений после изменения направления нагружения. При решении ряда практических задач листовой штамповки, например, инженерным методом, учет реверса напряжений не вызывает больших затруднений.

При изгибе по сравнительно большому радиусу, без учета упрочнения величина изгибающего момента с учетом эффекта Баушингера для единицы ширины заготовки определяется из выражения:

$$M = \int_{r_H}^R \sigma_S r \cdot dr + \int_{r_1}^{r_H} (-\bar{\sigma}_S) r \cdot dr = 0,5 \left[\sigma_S R^2 + \bar{\sigma}_S r^2 - r^2 (\sigma_S + \bar{\sigma}_S) \right], \quad (1)$$

где σ_S , $\bar{\sigma}_S$ – пределы текучести при растяжении и сжатии; R , r_1 – радиусы кривизны наружной и внутренней поверхности; r_H – радиус кривизны нейтрального слоя.

При изгибе моментом широкой полосы, совместное решение уравнения равновесия и условия пластичности Треска-Сен-Венана для зоны растяжения и сжатия позволяет найти распределение меридиональных и широтных напряжений по толщине заготовки. При этом в зоне сжатия используется предел текучести для сжимающих напряжений. На нейтральной поверхности при $r = r_H$ меридиональные напряжения для зон растяжения и сжатия равны между собой [4]. Формула для определения радиуса нейтрального слоя принимает вид

$$r_H = R \frac{\sigma_S}{\sigma_S + \bar{\sigma}_S} \cdot r_1 \frac{\bar{\sigma}_S}{\sigma_S + \bar{\sigma}_S} \leq \sqrt{Rr_1}, \quad (2)$$

где $\sqrt{Rr_1}$ – радиус нейтрального слоя без учета эффекта Браушингера.

Следовательно, у материалов, обладающих эффектом Браушингера, радиус нейтрального слоя и зона сжимающих напряжений меньше и пружинение меньше.

При больших радиусах кривизны и тонколистовых заготовках когда $R/r_1 \approx 1$, радиус нейтрального слоя будет равен

$$r_H = \frac{r_1(\sigma_S - \sigma_S')}{2\sigma_S'} \pm \sqrt{0,25r_1^2 \left(\frac{\sigma_S}{\sigma_S'} - 1 \right)^2 + \frac{\sigma_S}{\sigma_S'} Rr_1}. \quad (3)$$

При изгибе с растяжением или сжатием величина продольной силы выразится следующим образом

$$N = \int_{r_H}^R \sigma_S dr + \int_{r_1}^{r_H} (-\sigma_S)' dr = \sigma_S(R - r_H) - \sigma_S'(r_H - r_1). \quad (4)$$

С учетом $r_1 = R - S$; $r_H = R - 0,5S - C$, где S – толщина заготовки; C – расстояние между нейтральной и срединной поверхностью:

$$N = 0,5S(\sigma_S - \sigma_S') + C(\sigma_S + \sigma_S') = \sigma_{\theta cp} \cdot S, \quad (5)$$

где $\sigma_{\theta cp}$ – среднее по толщине напряжение, вызванное действием продольной силы.

Из (5) следует:

$$C = \frac{\sigma_{\theta cp} \cdot S - 0,5(\sigma_S - \sigma_S') \cdot S}{\sigma_S + \sigma_S'}. \quad (6)$$

Отсюда

$$r_H = \frac{R + r_1}{2} - \frac{\sigma_{\theta cp} \cdot S}{\sigma_S + \sigma_S'} + 0,5S \frac{(\sigma_S - \sigma_S')}{\sigma_S + \sigma_S'}. \quad (7)$$

При $\sigma_{\theta cp} = \sigma_S$, зона сжатия отсутствует (без учета эффекта Браушингера). Учет этого эффекта практически не сказывается на величине продольной силы.

Аналогичные результаты можно получить для схемы объемного напряженно-деформированного состояния при гибке.

При вытяжке осесимметричных деталей также возникает необходимость учета эффекта Браушингера. Материал фланцевой части заготовки подвергается сжатию, а затем растяжению. При перетекании через радиус скругления матрицы происходит его изгиб в перпендикулярном направлении к растяжению в плоскости фланца и последующее растяжение.

При вытяжке крупногабаритных листовых деталей кузова автомобиля широко применяют на прижиме тормозные ребра и пороги. Их основное назначение уменьшить ширину фланца под прижимом и размер заготовки. Производственный опыт показывает, что после расчета размеров, формы и положения заготовки в штампе после проведения ряда пробных процессов вытяжки приходится корректировать эти параметры. Одной из причин неточности определения геометрии заготовки является не учет реверса напряжений (эффект Браушингера) при перетекании материала по тормозным порогам и ребрам. Решение этой задачи с учетом эффекта Браушингера довольно сложно [7, 8] и результаты могут быть получены с использованием численных методов решения задач упругопластического формоизменения. Рассмотрим уточнение метода решения задачи сложной вытяжки предложенного в работе [9]. Используем систему уравнений движения штампуемой тонколистовой оболочки [9] и уравнения равновесия для моментов:

$$\nabla_{\beta} L^{\alpha\beta} + \left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \gamma\beta \end{matrix} \right\} \cdot L^{\gamma\beta} + \left\{ \begin{matrix} \beta \\ \gamma\beta \end{matrix} \right\} \cdot L^{\alpha\gamma} = Q^{\alpha}, \quad (8)$$

где $\left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \beta\gamma \end{matrix} \right\}$ – символ Кристоффеля α -го ряда; ∇_{β} – знак ковариантного дифференцирования;

$L^{\alpha\beta}$ – изгибающие моменты; Q^{α} – перерезывающие силы.

Вычисление деформаций по толщине заготовки производится на базе модели с подслоями. При определении тензора приращения деформаций на каждом шаге интегрирования (в рамках метода конечных разностей), последний разлагается на упругую и пластическую компоненты. Тензор упругих деформаций связан с тензором напряжений обобщенным законом Гука. Пластические компоненты тензора приращения деформаций выражаются через напряжения по закону пластического течения:

$$\Delta \varepsilon_{\alpha\beta} = \lambda (\partial \Phi^T / \partial \sigma_{\alpha\beta}), \quad (9)$$

где λ – множитель Лагранжа; Φ^T – функция текучести.

Однако при учете реверса напряжений условия перехода материала в пластическое состояние, которое графически в шестимерном пространстве изображается фиксированной поверхностью, следует учитывать асимметричность и эксцентриситет этой поверхности. Это связано с уменьшением предела текучести при сжатии. При расчете напряжений поверхность нагружения (поверхность кругового цилиндра), также асимметрична и имеет эксцентриситет.

Определив напряжения по обобщенному закону Гука, проверяем условие пластичности анизотропно упрочняющего материала Φ_K . Поверхность пластичности строим по методике В.А. Огородникова [4]. Значение трех характеристик материала: диаграммы растяжения, зависимость отношения предела текучести на сжатие после растяжения к интенсивности напряжений от интенсивности деформаций и диаграммы испытания автокузовного материала на растяжение до предельной деформации и последующее сжатие, взяты из экспериментальных исследований представлены в работах А.Д. Матвеева [2, 3].

В этом случае, когда $\Phi_K - \sigma_S < 0$, где σ_S – предел текучести, пластическое течение отсутствует. Напряжения равны расчетным по обобщенному закону Гука. Если $\Phi_K - \sigma_S = 0$, пластическое течение только наступило.

При $\Phi_K - \sigma_S > 0$, процесс деформирования происходит пластически, т. е. напряжение на шаге итерации выходит за поверхность текучести. После этого определяем главные напряжения в каждой узловой точке заготовки. Если условие текучести в главных напряжениях не попадает на поверхность текучести применяется метод возвращения вектора напряжений на площадку текучести, разработанный Уитмером [9], после определения напряжений в каждом слое и в каждом узле заготовки проводим вычисление мембранных сил и изгибающих моментов $L^{\alpha\beta}$:

$$L^{\alpha\beta} = \int_{-0,5\delta+\Delta}^0 [\sigma_{\alpha 1} (\delta_1^{\beta} - x^3 B_1^{\beta}) + \sigma_{\alpha 2} (\delta_2^{\beta} - x^3 B_2^{\beta})] (G \cdot A^{-1})^{0,5} x^3 dx^3 + \int_0^{0,5\delta-\Delta} [\sigma_{\alpha 1} (\delta_1^{\beta} - x^3 B_1^{\beta}) + \sigma_{\alpha 2} (\delta_2^{\beta} - x^3 B_2^{\beta})] (G \cdot A^{-1})^{0,5} x^3 dx^3, \quad (10)$$

где $G = |G_{\alpha\beta}| = |A_{\alpha\beta} - 2x^3 B_{\alpha\beta}|$, $A_{\alpha\beta}$ – тензор, $B_{\alpha\beta}$ – тензор кривизны.

Решая систему уравнений равновесия находим усилие деформирования соответствующее принятому шагу перемещения пуансона. На заключительной стадии получаем диаграмму усилие-перемещение по которой подбираем пресс.

По предложенному методу произведен расчет технологического процесса сложной вытяжки детали «пол кабины» автомобиля семейства КраЗ. В результате счета установ-

лено, что усилие пресса является завышенным на 24,8 %. Участки заготовки вытягиваемые через перетяжной порог и ребро имеют избыточную площадь на 15 %. В результате счета также установлено, что эффективность перетяжного порога с точки зрения торможения фланца заготовки достаточно высока, однако в этом случае реверса напряжений не происходит и резерв пластичности фланца не используется. Более эффективно использование цилиндрического ребра, сопряженного с радиусом скругления матрицы. Это позволяет максимально использовать повышение пластических свойств материала заготовки при реализации эффекта Баушингера.

Выводы. Установлена целесообразность учета эффекта Баушингера в методах моделирования процесса вытяжки деталей сложной пространственной конфигурации. Обеспечение условий, реализующих реверс напряжений позволяет снизить усилие формообразования на 15...20 %, выявить дополнительные ресурсы повышения пластических свойств материала фланцевой части заготовки с экономией листового проката при производстве облицовочных деталей транспортных средств.

Литература

1. Фридман, Я.Б. *Механические свойства металлов [Текст] / Я.Б. Фридман – В 2-х частях. Часть первая. Деформация и разрушение.* – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
2. Воронцов, А.Л. *О корректном построении и правке теоретических моделей процессов обработки металлов давлением [Текст] / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство.* – 2011. – № 5. – С. 12–20.
3. Бондарь, В.С. *Множественный пластический изгиб листа из металла, обладающего эффектом Баушингера [Текст] / В.С. Бондарь, А.Д. Матвеев, Данин // Кузнечно-штамповочное производство.* – 1989. – № 8. – С. 19–21.
4. Матвеев, А.Д. *Работа перетяжного порога вытяжных штампов [Текст] / А.Д. Матвеев, В.В. Кладников, И.Ю. Ананченко, В.А. Халдинов, В.А. Гуров // Кузнечно-штамповочное производство.* – 1989. – № 8. – С. 16–19.
5. Огородников, В.А. *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении [Текст]: учеб. пособие / В.А. Огородников.* – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.
6. Бакхауз, Г. *Анизотропное упрочнение. Теория в сопоставлении с экспериментом [Текст] / Г. Бакхауз // Механика твердого тела, 1976.* – № 6. – С. 120–129.
7. Шапиевская, В.А. *Экспериментальные методы определения параметров эффекта Баушингера [Текст] / В.А. Шапиевская // Кузнечно-штамповочное производство.* – 2011. – № 1. – С. 3–6.
8. Воронцов, А.Л. *К вопросу о контактной трении, кривых упрочнения и эффекте Баушингера [Текст] / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство.* – 2011. – № 4. – С. 38–42.
9. Уитмер, В. *Большие динамические деформации балок, колец, пластин, оболочек [Текст] / В. Уитмер // Ракетная техника и космонавтика.* – М.: Ил., 1963. – № 8. – С. 111–123.

© Н.Н. Мороз, В.В. Драгобецкий, А.А. Черныш

М.М. Мороз, к.т.н., доц., В.В. Драгобецкий, д.т.н., проф., А.А. Черныш, ст. викл.
Кременчужський національний університет ім. Михайла Остроградського

ВРАХУВАННЯ ЕФЕКТУ БАУШИНГЕРА ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ СКЛАДНОГО ВИТЯГУВАННЯ

Розглянута фізична суть трансляційної анізотропії листових заготовок, що деформуються, пов'язаної з ефектом Баушингера. Наведено аналіз теорій пластичності ізотропного матеріалу з анізотропним зміцненням. Отримані залежності для визначення згинаючих моментів з врахуванням трансляційного зміцнення при згинанні в порівнянні більшого радіусу, радіусу нейтрального шару, повздовжньої сили і радіусу нейтрального шару при згинанні з розтягуванням. Розроблена числова математична модель, що враховує трансляційну анізотропію. Приведено аналіз результатів розрахунку автокузовних деталей.

Ключові слова: анізотропія, ефект Баушингера, складне витягування, напруження.

N.N. Moroz, Ph.D., Associate Professor, V.V. Dragobetskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, A.A. Chernish, Senior Lecturer

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ACCOUNT EFFECT OF BAUSHINGER AT MODELING PROCESS OF COMPLEX DRAWING

The physical essence of transmitting anisotropy of deformable sheet billets connected with the effect of Baushinger is considered. The analysis of the theories of plasticity of isotropic material with anisotropic hardening is given. The dependences for determining bending moments are received taking into account transmitting hardening at bending on a rather large radius, a radius of a neutral layer, longitudinal force and radius of a neutral layer at bending with tensile ductility. The mathematical model of the drawing process of items with complex configuration which is taken into account transmit anisotropy is developed. The analysis of the results of calculation of lorry sheet billets.

Key words: anisotropy, effect of Baushinger, complex extend, pressure.

УДК 621.78

И.В. Коваленко, к.т.н., доц.

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

МОДЕЛЬ НАГРЕВА ДЕТАЛИ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ

На основании уравнений нестационарного теплового поля соединения предложена модель нагрева детали при экспоненциальном изменении теплотыделения в материале.

Ключевые слова: разборка, индукционный нагрев, теплопроводность, температура, скорость нагрева.

Постановка проблемы. Показателем качества процесса разборки изделий является полнота разъединения и сохранение свойств, входящих в изделие деталей: полное отделение охватываемой детали, отсутствие деформаций и риск на посадочных поверхностях деталей, сохранение физико-механических свойств материала.

Следовательно, в процессах разборки необходим текущий контроль температуры охватываемой детали, контроль длительности теплового воздействия и послеоперационный контроль качества полученных элементов (компонентов) [1–3].

Цель данной статьи — разработка модели нагрева детали при экспоненциальном изменении теплотыделения в материале.

Изложение основного материала. Рассмотрим процесс индукционного нагрева охватываемых деталей соединений, характеризующихся как: а) тонкостенные цилиндры (кольца), имеющие толщину стенки менее глубины проникновения электромагнитного поля в металл Δ ; б) толстостенные цилиндры, имеющие толщину стенки более 2Δ и $(D_H - D_B) > 2\Delta$. Эти группы элементов, в силу незначительного отличия в геометрических размерах слоев на наружном и внутреннем диаметрах, могут, с учетом осевой симметрии теплового поля, рассматриваться как стержни в прямоугольной системе координат [4, 5].

Уравнение теплового поля в этом случае примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{P_0(x)}{c\gamma} \quad (1)$$

при краевых условиях

$$T(x, 0) = \varphi_0; T(0, \tau) = T_1(\tau);$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = -\frac{\alpha}{\lambda} T \Big|_{x=L},$$

где $a = \lambda/c\gamma$ – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$; P_0 – удельная мощность источников тепла, $\text{Вт}/\text{м}^3$; T – превышение температуры элемента над температурой окружающей среды, град; λ – коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; c, γ – удельная теплоемкость и плотность материала, $\text{Вт}/(\text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{град})$ и $\text{кг}/\text{м}^3$ соответственно; α – коэффициент теплообмена (теплоотдачи) нагреваемой детали со стороны противоположной индуктору, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; $L = (D_n - D_b)/2$ – эквивалентная длина, м; x – текущая координата, м; $T_1(\tau)$ – температура на наружной поверхности детали (начало стержня), град.

Решением (1) будет, в соответствии с методом Фурье [6], сумма двух функций $U(x)$ и $W(x, \tau)$, каждая из которых определяется уравнениями:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -\frac{P_0(x)}{\lambda} \text{ при } U(0) = T_1(\tau) \text{ и } \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=L} = -\frac{\alpha}{\lambda} U; \quad (2)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = -\frac{\partial W}{\partial \tau} \text{ при } W(0, \tau) = 0; W(L, \tau) = 0; W(x, 0) = \varphi_0 - U(x). \quad (3)$$

Решение (3), так называемое стационарное решение для (1) при экспоненциальном изменении тепловыделения в материале детали, в соответствии с изменением настила вихревых токов $P_0(x) = P_0 \exp(-2x/\Delta)$, находится его непосредственным двойным интегрированием

$$U(x) = \frac{\Delta^2 P_0}{4\lambda} e^{-2x/\Delta} + C_1 x + C_2, \quad (4)$$

где $C_2 = T_1 + \Delta^2 P_0/(4\lambda)$ определяется из (4) при краевом условии $U_0 = T_1$; $C_1 = \{-\alpha \Delta^2 P_0(1 - e^{-2L/\Delta})/(4\lambda) - \Delta P_0 e^{-2L/\Delta}/2 - \alpha T_1\}/(\lambda + \alpha L)$ – постоянная интегрирования из краевых условий для (2) при $x = L$.

Подставив полученные постоянные интегрирования в (4) и пренебрегая величинами, содержащими в качестве множителя $e^{2L/\Delta}$, можно найти простую и наглядную связь между температурами T_1 в начале и T_2 в конце стержня

$$T_2 = T_1/(1 + \alpha L/\lambda),$$

которая показывает влияние соотношения внешней теплоотдачи αL и внутренней теплопроводности – λ на процесс нагрева.

Для предельного случая, в пренебрежении тепловыделением за пределами глубины проникновения Δ , коэффициент $k_g = 1/(1 + \alpha L/\lambda) < 1$, характеризующий отношение T_2/T_1 , можно определить как коэффициент гетерогенности индукционного нагрева. Его значение в общем случае с учетом тепловыделения и за пределами глубины проникновения нетрудно уточнить непосредственно по (4).

Отклонение от стационарного решения находим из (3) в виде

$$W(x, t) = \sum_{n=1}^m B_n e^{-n^2 \tau / \tau_T} \sin \left[\frac{n\pi x}{L} \right], \quad (5)$$

где $\tau_T = L^2/(\pi^2 a)$ – постоянная времени температуропроводности для нагреваемой детали;

$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L (\varphi_0 - U(x)) \sin \left[\frac{n\pi x}{L} \right] dx$ – коэффициенты разложения стационарного решения $U(x)$

в ряд Фурье.

В связи со сложным характером функции $U(x)$, получаемой по выражению (4), для нахождения коэффициентов B_n целесообразно использовать один из современных пакетов символьной математики (например, MAPLE). Методика расчетов для стального цилиндра следующая:

```
> restart;
> with(linalg):
> f := (f0 - (-P0*exp(-2*x/g) * g*g/4/l + C1*x + C2)) * sin(n*Pi*x/L);
> Bn := simplify(int((f), x=0..L) * 2/L);
> Wn := simplify(int((f), x=0..L) * 2/L * exp(-n*n*t/Tt) * sin(n*Pi*x/L));
```

где глубина проникновения обозначена как g , а коэффициент теплопроводности как l .

Так как при разложении в синусный ряд четные $B_n = B_{2m+1} = 0$, то в формуле (5) основной вклад вносит первая гармоника $\sin(\pi x/L)$, поскольку коэффициент $e^{-n^2\tau/\tau_T}$ резко затухает с ростом n .

Амплитуда первой гармоники при $\varphi_0 = \text{const}$, что соответствует детали с равномерной температурой перед термовоздействием, и получаемая при этом упрощенная модель гетерогенного индукционного нагрева будет иметь вид:

```
> restart;
> with(linalg):
> f := f0 - \left( -\frac{p0 e^{\left(\frac{-2x}{g}\right) g g}{4l} + C1x + C2 \right) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right);
> B1 := simplify\left(\frac{\int_0^L f dx}{L}\right);
> W1 := \left(\frac{\int_0^L f dx}{L} 2 e^{\left(\frac{-t}{Tt}\right)} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)\right)
```

Однако радикального упрощения можно достичь, если воспользоваться предложенным выше коэффициентом гетерогенности k_g . Это дает возможность воспользоваться стандартной процедурой MAPLE для нахождения также стационарного решения $U(x)$ и получить при этом следующие модели индукционного нагрева:

– определение стационарного решения из дифференциального уравнения:

```
> restart;
> with(linalg):
> degn := (D@@2)(U)(x) + P0*exp(-x/g)/l;
> bmp := U(0) = Q1, U(L) = Q1*(1 - exp(-t/Tt));
> dsolve({degn, bmp}, U(x));
> f := (f0 - (P0*exp(-x/g) * g*g + g*g*P0 + Q1*1 - (P0*g*g - g*g*P0*exp(-L/g) + Q1*1*exp(-t/Tt)) * x/L) / l) * sin(Pi*x/L);
> B1 := simplify(int((f), x=0..L) * 2/L);
> W1 := simplify(int((f), x=0..L) * 2/L * exp(-t/Tt) * sin(Pi*x/L));
```

– определение стационарного решения с учетом коэффициента гетерогенности:

```
> restart;
> with(linalg):
> degn := (D@@2)(U)(x) + P0*exp(-x/g)/l;
> bmp := U(0) = Q1, U(L) = Q1*kg;
> dsolve({degn, bmp}, U(x));
> f := (f0 - (P0*exp(-2*x/g) * g*g + g*g*P0 + Q1*1 - (P0*g*g - g*g*P0*exp(-2*L/g) + 4*Q1*kg*1) * x/L) / 4/l) * sin(Pi*x/L);
> B1 := simplify(int((f), x=0..L) * 2/L);
> W1 := simplify(int((f), x=0..L) * 2/L * exp(-t/Tt) * sin(Pi*x/L));
```

Таким образом, окончательное решение примет вид

$$T = T_1(\tau) + \Delta^2 P_0 / (4\lambda) + C_1(\tau)x - \Delta^2 \frac{P_0}{4\lambda} e^{-2x/\Delta} + B_1(t)e^{-\tau/\tau_H} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right). \quad (6)$$

Учитывая, что при теплоотдаче в окружающую среду нагрев определяется как

$$T_1(\tau) = T_H(1 - e^{-\tau/\tau_H}), \quad (7)$$

и подставив (6) в (7), найдем пространственно-временное распределение термовоздействия при индукционном нагреве, когда $P_0(x) = P_0 e^{-2x/\Delta}$.

Поскольку при индукционном нагреве можно иметь достаточно высокую скорость нагрева, которая определяется мощностью индуктора, то существует опасность перегрева слоя металла Δ . Это связано с инерционностью теплоотвода, зависящей от теплоемкости и теплопроводности материала и теплоотдачей в окружающую среду. Если скорость генерирования тепла будет больше, чем скорость теплоотвода, то в слое Δ не будет выдерживаться температурное условие разборки. Рассматривая теплоотвод от единичного объема нагретого слоя $V = \Delta$, массой m , удельной теплоемкостью c , теплопроводностью λ на длине L : $cm = \lambda L \tau_{T0}$, можем, таким образом, найти предельное значение времени τ_{T0} меньше которого нельзя назначать длительность нагрева детали со стенкой толщиной L . Для углеродистой стали $\tau_{T0} = 0,03$ с. При более быстром нагреве в материале детали возникают необратимые изменения в металле.

Используя τ_{T0} можно рассчитать мощность P нагрева, при которой исключается недопустимая скорость разогрева поверхностного слоя

$$P \leq cm[T]/\tau_{T0}. \quad (8)$$

Выводы. На основе уравнений нестационарного теплового поля соединения предложена модель нагрева детали при экспоненциальном изменении тепловыделения в материале. Использование полученной постоянной времени теплоотвода τ_{T0} позволяет определить предельную скорость индукционного нагрева.

Литература

1. Арпентьев, Б.М. Новый метод определения составляющих тепловой проводимости [Текст] / Б.М. Арпентьев, А.К. Дука, А.Н. Куцын // Сб. науч. тр. ХИСИ. – 1997. – С. 169–177.
2. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел [Текст] / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 326 с.
3. Попов, В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений [Текст] / В.М. Попов. – М.: Энергия, 1971. – 235 с.
4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
5. Новиков, В.В. Метод интегральных сечений в задачах теплопроводности [Текст] / В.В. Новиков, О.Б. Попковский // Инж.-физ. журнал. – 1995. – № 2. – С. 322–325.
6. Винер, Р. Интеграл Фурье и некоторые его приложения [Текст] / Р. Винер. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 256 с.

© И.В. Коваленко

І.В. Коваленко, к.т.н., доц.

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

МОДЕЛЬ НАГРІВУ ДЕТАЛІ ПРИ ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНІЙ ЗМІНІ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ У МАТЕРІАЛІ

На основі рівнянь нестационарного теплового поля з'єднання запропонована модель нагріву деталі при експоненціальній зміні тепловиділення в матеріалі.

Ключові слова: розбирання, індукційний нагрів, теплопровідність, температура, швидкість нагріву.

I.V. Kovalenko, Ph.D., Associate Professor

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov

MODEL OF HEATING OF COMPONENT PART UNDER THE EXPONENTIAL HEAT RELEASE CHANGE IN THE MATERIAL

On the basis of equalizations of the non-stationary thermal field of connection the model of heating of detail is offered at the exponential change of selection of heat in material.

Keywords: *sorting out, induction heating, heat conductivity, temperature, speed of heating.*

УДК 621.852.13: 621.73

А.В. Явтушенко, к.т.н., доц.

Запорожский национальный технический университет

Р.И. Рей, д.т.н., проф.

Восточнoукраинский национальный университет им. В. Даля

НАДЕЖНОСТЬ КЛИНОРЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Рассмотрены вопросы надежности клиноремennых передач механических прессов. Показано, что для клиноремennых передач наилучшее представление функции надежности описывается двух параметрическим законом Вейбулла. Значения параметров функции надежности для передач механических прессов определены по результатам производственных испытаний клиновых ремней листоштамповочных и горячештамповочных прессов.

Ключевые слова: *пресс, передача, ремни клиновые, надежность, долговечность, отказ, закон Вейбулла.*

Введение. Надежность привода механического пресса в значительной степени зависит от надежности клиноремennой передачи, обеспечивающей передачу движения от электродвигателя к маховику. Отказ ремennой передачи приводит или к полному отказу привода или к частичному снижению его работоспособности.

Анализ последних исследований и публикаций. В технической литературе вопросы оценки надежности клиноремennых передач обычно рассматриваются применительно к приводам машин общего машиностроения. Принятые методы испытания ремennых передач не всегда соответствуют реальным условиям работы передачи. Справочные данные чаще всего приводятся по результатам испытаний передач без нагрузки, испытываемые передачи обычно имеют один ремень, а передаточное отношение равно единице.

Расчетный срок службы ремня T_0 определяется по эмпирическим формулам, из которых чаще всего используется зависимость [1, 2, 3]

$$T_0 = 5000C_1C_2C_3, \quad (1)$$

где C_1, C_2, C_3 – соответственно, коэффициенты учитывающие режим работы ремня, передаваемую мощность и скорость ремня.

Большие сомнения вызывает значение номинального срока службы (5000) в формуле (1). Такое значение долговечности ремня является скорее не номинальным, а ожидаемым.

Более обоснованным является расчет долговечности ремня по усталостной кривой прочности ремня [2]

$$T_p = Z_\phi k_\phi / 3600 n_\phi . \quad (2)$$

где Z_ϕ – число циклов нагружения до разрушения по принятой теории разрушения ремней; k_ϕ – коэффициент эквивалентной нагрузки; n_ϕ – частоты пробегов ремня в единицу времени.

И самое главное, долговечность определенная по формулам (1) или (2) относится к единичному ремню, но не ко всей передаче в целом. Передача в целом должна рассматриваться как система, состоящая из отдельных элементов, долговечность которых известна.

Специфические условия работы механических прессов учитываются поправочными коэффициентами при определении предполагаемой долговечности ремней. Между тем многочисленные исследования привода механических прессов показывают необходимость более глубокого анализа работы клиноременных передач как с точки зрения их надежности, так и с целью уточнения методов их расчета. Клиноременные передачи механических прессов характеризуются большими значениями передаваемой мощности, значительными межцентровыми расстояниями, высокой степенью неравномерности нагрузки, большими передаточными отношениями (до 10), неблагоприятными условиями эксплуатации (вибрации, загрязнения среды и др.). Клиноременные передачи механических прессов, как правило, состоят из нескольких ремней (до 12 ремней). Замена ремней вышедших из строя производится не всегда своевременно. Отсутствует постоянный контроль состояния передачи, особенно величины начального натяжения. Замена отказавших ремней производится без соблюдения требования комплектности ремней из одной группы. В результате действительный срок службы клиновых ремней оказывается гораздо ниже расчетного значения по (1), а передача не всегда имеет расчетную работоспособность.

Постановка задачи. В данной работе сделана попытка частично оценить реальные условия работы клиноременных передач механических прессов, определить причины и интенсивность отказов ременных передач и определить направления повышения их надежности.

Основной материал и результаты. Термины и определения надежности, а также количественные ее характеристики определены в ГОСТ 13377–67 «Надежность в технике. Термины». Под надежностью подразумевается способность изделия выполнять свои функции, т. е. сохранять качество при определенных условиях эксплуатации, а основополагающим в теории надежности является понятие отказ, под которым подразумевается полная или частичная потеря работоспособности изделия [1, 4]. Отказ клиноременной передачи наступает тогда, когда происходит отказ всех ремней передачи (полный отказ), или когда происходит отказ части ремней (частичный отказ). В принципе отказ ременной передачи может наступить, когда происходит отказ одного или нескольких шкивов. Однако практика показывает, что срок службы шкивов, как правило, значительно превышает срок службы ремней и чаще всего равен или превышает ресурс работы пресса до капитального ремонта.

При частичном отказе происходит отказ нескольких ремней, и передача может сохранять общую работоспособность. Но снижение тяговой способности, увеличение скольжения вплоть до буксования ремней снижают качество передачи, и она не может качественно выполнять свои функции. Такой отказ также относится к полному отказу. К частичному отказу относится отказ передачи при нарушении условий эксплуатации, но при сохранении целостности ремней, например при большом остаточном удлинении ремней, попадании смазки на рабочие поверхности.

Выбор показателей надежности передачи из всей совокупности показателей по ГОСТ определяется требованиями эксплуатационной службы, условиями эксплуатации, конструктивным исполнением, условиями ограничения процесса эксплуатации. Клиноременная передача в целом относится к ремонтируемым изделиям, эксплуатируемым до предельного состояния, в то время как ремни являются неремонтируемыми изделиями, эксплуатируемыми до первого износа или до предельного состояния. Показателями надежности передачи

в целом и отдельных ремней в частности являются средний ресурс $T_{\text{ср}}$, количество отказов в единицу времени λ и вероятность безотказной работы при заданной наработке $P(t)$.

Функция $P(t)$ представляет собой безусловную вероятность того, что до момента времени t не наступит отказ элемента [4]. Обычно функцию $P(t)$ называют *функцией надежности*. Производная функции надежности $P'(t)$ представляет собой безусловную вероятность наступления отказа в заданном промежутке времени и называется плотность вероятности отказов. Соотношение

$$\lambda = \frac{P'(t)}{P(t)}$$

представляет собой важный показатель надежности, называемый *опасностью отказа* и являющийся вероятностью того, что элемент, проработавший безотказно до момента t , откажет в последующую единицу времени.

В таком случае можно получить

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Функция $\lambda(t)$ может быть определена по результатам испытаний.

Для широкого класса элементов принимают $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, т. е. полагают, что процесс старения элементов отсутствует, а дефектные элементы выходят из строя в период приработки. В таком случае функция надежности описывается экспоненциальным законом

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

а плотность вероятности отказов

$$q(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Среднее время жизни элемента для этого случая

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (3)$$

Экспоненциальный закон надежности обеспечивает простое решение многих задач в теории надежности, и находит применение в технических расчетах. Такой закон надежности хорошо описывает *внезапные* отказы. Однако отказы, возникающие в результате износа и старения элементов, не подчиняются экспоненциальному закону, т. к. их надежность со временем должна изменяться. Эти отказы, называемые *постепенными*, хорошо описываются другими законами, среди которых наибольшее распространение получил двухпараметрический закон распределения Вейбулла [4, 5]

$$P(t) = e^{-\lambda t^\alpha}.$$

Основным достоинством этого закона является дополнительный параметр α , отражающий интенсивность старения элемента, при условии, что опасность отказа λ является постоянной величиной.

Среднее время жизни элемента

$$T_0 = \frac{\Gamma(1+1/\lambda)}{\lambda^{1/\alpha}}. \quad (4)$$

Функция $\Gamma(z)$ представляет собой т. н. гамма-функцию, определяемую как

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt,$$

и может быть определена по таблицам, или вычислена непосредственно по указанной формуле.

Очевидно, что при $\alpha > 1$ опасность отказов монотонно возрастает от нуля, а при $\alpha = 1$ экспоненциальный закон является частным случаем закона Вейбулла.

Таким образом, надежность элемента характеризуется двумя количественными показателями λ и α , значения которых могут быть определены только по результатам испытаний. В технической литературе данные по значениям показателей надежности, в том числе и для клиновых ремней практически отсутствуют. Очевидно, что ссылка на то, что опасность отказа λ обычно составляет величину порядка $2 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-4}$ и больше, явно недостаточна для практических расчетов [1]. Значения коэффициента интенсивности старения α , приведенные в работе [1] явно завышены и вызывают большие сомнения.

С целью определения реальных значений показателей надежности и оценки причин отказов клиновых ремней в передачах механических прессов были проведены производственные испытания. Ввиду отсутствия возможности испытания отдельных ремней по стандартным методам, а также для определения реальных значений параметров оценка надежности производилась на действующем оборудовании для всей системы клиноременной передачи. На протяжении установленного времени T_0 производилась фиксация отказов ремней на нескольких листоштамповочных и горячештамповочных прессах. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 17510–72, но по производственным причинам и условиям эксплуатации прессов было ограничено время испытаний и количество допустимых отказов ремней, потому не все требования были корректно соблюдены. Параметры испытываемых кордтканевых ремней соответствуют ГОСТ 1284–89 «Ремни приводные клиновые нормальных сечений».

Испытания клиноременных передач листоштамповочных прессов проводились по плану $[N, B, r]$, соответственно которому испытывалось N ремней до момента отказа r ремней. При этом отказавшие ремни не заменялись. Испытания проводились на универсальных листоштамповочных прессах усилием от 1 до 8 МН. Всего исследовано 16 прессов. Общее количество ремней в исследуемых передачах составляет 85. Предельное число отказавших ремней принято 3, т. к. при большем числе отказов передача теряет свою работоспособность.

Испытания клиноременных передач горячештамповочных прессов проводились по плану $[N, B, T]$, соответственно которому в течение времени T испытывалось N ремней, при этом отказавшие ремни также не заменялись. Исследования проведены на 10 прессах номинальным усилием от 16 до 63 МН.

Для плана $[N, B, r]$ коэффициент интенсивности отказов λ определяется по формуле [4]

$$\lambda = r - 1/S_0, \quad (5)$$

где S_0 – суммарная наработка на отказ всех элементов

$$S_0 = t_1 + t_2 + \dots + t_r(N - r + 1);$$

t_i – время i -го отказа ($i = 1, 2, \dots, r$).

Результаты испытаний клиновых ремней листоштамповочных прессов приведены в табл. 1.

Среднеквадратичное отклонение значения λ составляет $5,188 \cdot 10^{-5}$. При доверительной вероятности 0,9 коэффициент Стьюдента равен 1,94 и доверительный интервал значений λ составляет $\pm 4,5 \cdot 10^{-5}$. Число циклов нагружения до отказа r -го ремня ремней составило $3 \div 4,2 \cdot 10^7$.

Для плана $[N, B, T]$ коэффициент интенсивности отказов определяется по формуле при общем количестве отказов ремней d за время T [4]

$$\lambda = \frac{1}{T} \ln \frac{N}{N - d}. \quad (6)$$

Результаты испытаний клиновых ремней кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) прессов приведены в табл. 2.

Таблица 1. Коэффициент λ для приводов листоштамповочных прессов

| P_n , МН | N_r | K_n | Тип ремней | N_n , кВт | t_1 , ч | t_2 , ч | t_3 , ч | S_d , ч | λ |
|------------------|-------|-------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| 1,0 | 5 | 5 | <i>B</i> | 10,5 | 361 | 850 | 1522 | 5777 | $3,46 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,6 | 5 | 3 | <i>B</i> | 25 | 109 | 857 | 1910 | 6696 | $2,99 \cdot 10^{-4}$ |
| 2,5 | 5 | 3 | <i>C</i> | 27 | 271 | 728 | 1704 | 6111 | $3,27 \cdot 10^{-4}$ |
| 4,0 | 6 | 2 | <i>C</i> | 40 | 150 | 530 | 1795 | 7860 | $2,54 \cdot 10^{-4}$ |
| 6,3 | 6 | 2 | <i>D</i> | 55 | 225 | 680 | 1670 | 7585 | $2,64 \cdot 10^{-4}$ |
| 8,0 | 6 | 1 | <i>D</i> | 125 | 150 | 820 | 2110 | 9410 | $2,13 \cdot 10^{-4}$ |
| Среднее значение | | | | | 240 | 765 | 1718 | 6917 | $2,97 \cdot 10^{-4}$ |

Примечания: P_n – номинальное усилие пресса, МН; N_r – количество ремней в приводе пресса; K_n – количество исследованных прессов; N_n – номинальная мощность двигателя, кВт; t_1 – среднее время наступления i -го отказа; S_d – наработка комплекта ремней до i -го отказа.

Таблица 2. Коэффициент λ для приводов КГШП

| P_n , МН | N_r | K_n | Тип ремней | N_n , кВт | d | λ |
|------------------|-------|-------|------------|-------------|-----|----------------------|
| 16 | 6 | 3 | <i>C</i> | 90 | 13 | $4,66 \cdot 10^{-4}$ |
| 25 ¹⁾ | 7 | 3 | <i>D</i> | 125 | 14 | $4,30 \cdot 10^{-4}$ |
| 25 ²⁾ | 7 | 2 | <i>D</i> | 90 | 7 | $3,23 \cdot 10^{-4}$ |
| 40 | 9 | 1 | <i>E</i> | 160 | 5 | $3,58 \cdot 10^{-4}$ |
| 63 | 12 | 1 | <i>E</i> | 320 | 5 | $2,69 \cdot 10^{-4}$ |
| Среднее значение | | | | | 37 | $3,65 \cdot 10^{-4}$ |

Примечания: ¹⁾ – прессы производства ВЗТМП (Воронежский завод тяжелых механических прессов), ²⁾ – прессы производства завода им. Б. Шмерала (Чехия).

Среднеквадратичное отклонение значения λ составляет $7,133 \cdot 10^{-5}$. При доверительной вероятности 0,9 коэффициент Стьюдента равен 2,132 и доверительный интервал значений λ составляет $\pm 7,603 \cdot 10^{-5}$. Число циклов нагружения до отказов ремней составило $2 \div 3,5 \cdot 10^7$. Из табл. 2 видно, что надежность ремней иностранного производства (Чехия) выше, чем отечественных ремней более чем на 30 %.

Важно отметить, что с увеличением номинального усилия пресса надежность клиновых ремней увеличивается. Для более крупных прессов падение скорости маховика, как при включении муфты, так и при рабочем ходе меньше, поэтому создаются более благоприятные условия работы ремней.

Корреляционной зависимости между типом ремней и номинальным усилием прессов (номинальной мощностью двигателя) не установлено.

В результате испытаний установлено, что основной причиной отказов (38...43 % отказов) ремней механических прессов является механическое разрушение обмоточной ткани и корда. Разрушение начинается с появлением трещин обмоточной ткани, которые постепенно развиваются на резиновый слой сжатия. В некоторых случаях разрушение ремня происходит из-за разрыва корда. Износ рабочей поверхности ремней (27...31 % отказов) вызывается, как правило, проскальзыванием ремней относительно шкивов и особенно проявляется при недостаточном начальном натяжении. Увеличение остаточного удлинения отдельных ремней (16...20 % отказов) не может быть устранено подтяжкой ремней без ущерба для остальных и такие ремни следует заменить. Для ремней увеличенной длины (крупные КГШП) наблюдается отказ из-за расслоения обмоточной ткани и корда (до 7...11 % отказов).

Величина показателя интенсивность старения ремней α , учитывающая влияние указанных причин отказов на долговечность ремней, определяется по результатам испытаний.

Согласно ГОСТ 17510–72 значение параметра α при плане проведения испытаний $[N, B, r]$ определяется из уравнения [1]

$$\left(\frac{r}{\alpha} + \sum_{i=1}^r \ln t_i \right) \left[\sum_{i=1}^r t_i^\alpha + (N-r)t_r^\alpha \right] - r \left[t_i^\alpha \ln t_i + (N-r)t_r^\alpha \ln t_r \right] = 0. \quad (7)$$

Для результатов испытаний, приведенных в таблицах 1 и 2, получено, что среднее значение параметра старения α составляет 1,015...1,05. При этом большие значения принимаются для прессов с меньшим номинальным усилием и большим передаточным отношением клиноременной передачи.

Испытание клиноременных передач механических прессов в производственных условиях показали недостаточную надежность клиновых ремней и передачи в целом. Срок службы ремней гораздо ниже рекомендованного ресурса службы. Анализ причин отказов ремней показывает, что повышение их долговечности может быть обеспечено конструктивными мероприятиями и улучшением условий эксплуатации.

Первое направление предполагает уменьшение максимальных напряжений в ветвях, особенно напряжения изгиба на малом шкиве. При заданном передаточном отношении передачи и стремлении минимизировать диаметр маховика увеличение диаметра ведущего шкива практически неосуществимо. Поэтому рациональным решением является использование большего числа ремней меньшего сечения. При этом одновременно может быть повышен коэффициент запаса долговечности ремней [2, 6].

Улучшение условий эксплуатации состоит, прежде всего, в постоянном контроле величины начального натяжения. Исследование состояния действующих прессов показывает, что фактически на всех прессах начальное натяжение намного ниже рекомендованных значений (как правило, не выше 0,6...0,8 МПа).

Практически никогда не выполняется требование ГОСТа 1284–89 [7] о замене всего комплекта ремней при отказе одного из них. После отказа одного из ремней пресс продолжает эксплуатироваться с уменьшенным числом ремней, или производится замена отказавшего ремня другим новым ремнем идентичного размера, но без перекомплектации.

Выводы

1. На основе промышленных испытаний установлены количественные характеристики для определения долговечности клиноременных передач механических прессов.
2. Получены достоверные данные о надежности клиновых ремней, характере их отказов в промышленных условиях и показаны направления работ по повышению надежности передач.

Литература

1. Карбасов, О.Г. Надежность клиноременных передач [Текст] / О.Г. Карбасов. – М.: Машиностроение, 1976. – 73 с.
2. Буланов, Э.А. Расчет ременных передач на заданный ресурс [Текст] / Э.А. Буланов, А.А. Зубарев // Вестник машиностроения. – 1995. – № 1. – С. 18–20.
3. Пронин, Б.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы) [Текст] / Б.А. Пронин, Г.А. Ревков. – М.: Машиностроение, 1980. – 320 с.
4. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
5. Шор, Я.Б. Термины и показатели надежности в технике. Основные вопросы надежности и долговечности машин [Текст]: учеб. пособие / Я.Б. Шор. – М.: МАТИ, 1969. С. 7–21.
6. Буланов, Э.А. Расчет ременных передач [Текст] / Э.А. Буланов // Вестник машиностроения. – 2001. – № 12. – С. 14–21.
7. ГОСТ 1284.2–89. Ремни приводные клиновые нормальных сечений. Технические условия. Введен 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 16 с.

© А.В. Явтушенко, Р.И. Рей

А.В. Явтушенко, к.т.н., доц.

Запорізький національний технічний університет

Р.И. Рей, д.т.н., проф.

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

НАДІЙНІСТЬ КЛИНОПАСОВИХ ПЕРЕДАЧ МЕХАНІЧНИХ ПРЕСІВ

Розглянуті питання надійності клинопасових передач механічних пресів. Показано, що для клинопасових передач якнайкраще представлення функції надійності описується двохпараметричним законом Вейбулла. Значення параметрів функції надійності для передач механічних пресів визначені за результатами виробничих випробувань клинових ременів листоштампувальних і гарячештампувальних пресів.

Ключові слова: прес, передача, ремені клинові, надійність, довговічність, відмова, закон Вейбулла.

A.V. Yavtushenko, Ph.D., Associate Professor

Zaporozhia National Technical University

R.I. Ray, Doctor of Technical Sciences, Professor

Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University

RELIABILITY OF TRANSMISSIONS BY STRAPS ARE A WEDGE OF MECHANICAL PRESSES

The questions of reliability of transmissions by straps are a wedge of mechanical presses are considered. It is noticed that for transmissions by straps are a wedge the best presentation of function of reliability is described two by the self-reactance law of Veybull. The values of parameters of function of reliability for the transmissions of mechanical presses are certain on results the production tests of wedge straps of simples and maxipresses presses.

Keywords: press, transmission, straps are a wedge, reliability, longevity, refuse, law of Veybull.

УДК 621.771

Ю.А. Плеснецов, к.т.н., доц., А.С. Забара, асп.

Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ

В результате анализа установлено, что использование профильных труб позволяет значительно снизить металлоемкость стальной конструкции. В Украине сортамент профильных труб очень узкий и производятся профильные трубы относительно простых сечений. Проведение научных исследовательских работ позволит создать теоретические и технические основы для их производства в Украине.

Ключевые слова: профильные трубы, производство труб, сортамент профильных труб.

Введение. Сегодня рынок профильных труб является одним из наиболее перспективных и быстрорастущих сегментов производства в мире, что вызвано увеличением объемов строительства и масштабной модернизацией машиностроительного комплекса. В Украине

производство профильных труб развито недостаточно, в литературе отсутствуют данные, позволяющие разработать технологию их производства, имеет место значительное количество импортной продукции, в связи с чем, работы направленные на создание научных и технологических основ их производства, являются важными и актуальными.

Цель работы — проанализировать современное состояние производства профильных труб.

Анализ последних исследований и литературы. Профильные трубы могут иметь самую разную форму поперечного сечения: квадратную, овальную, ребристую, прямоугольную, каплевидную, шести- и восьмигранную и т. д. Применение каждой из вышеперечисленных разновидностей обусловлено их конфигурацией, свойствами, а также требованиями, которые к ним предъявляются.

В индустриально развитых странах профильные трубы находят очень широкое и разнообразное применение [1–4]:

– в машиностроении (для изготовления подъемно-транспортных механизмов, несущих рам транспортных средств, сельхозмашин и др., см. рис. 1);

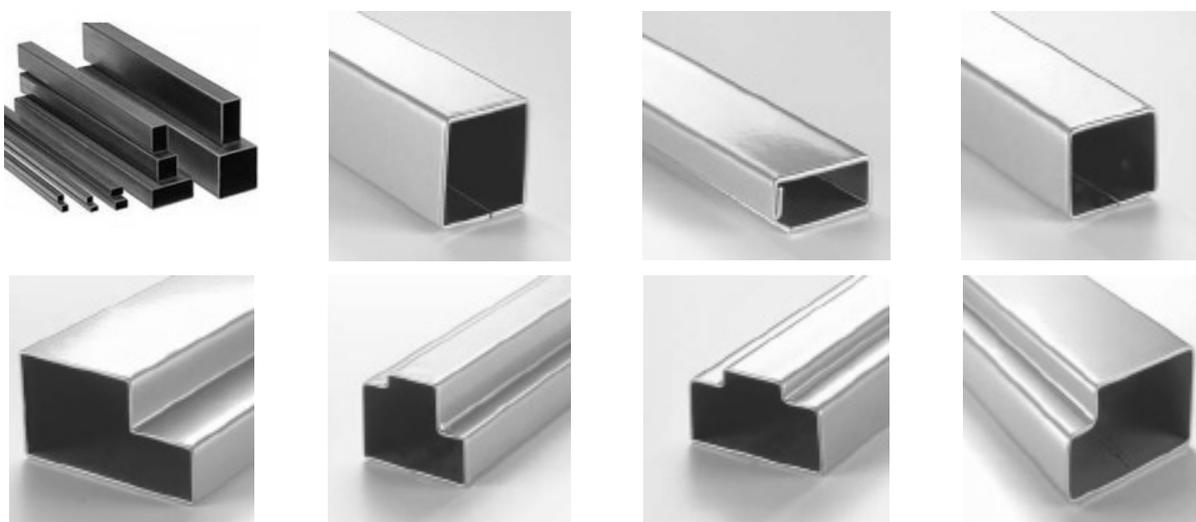


Рис. 1. Сортамент профильных труб для машиностроения

– в промышленном и гражданском строительстве (в качестве элементов несущих конструкций зданий и сооружений, перегородок, заборов, автостоянок, парковочных площадок и т. п., см. рис. 2.);



Рис. 2. Сортамент профильных труб для промышленного и гражданского строительства

– при изготовлении мебели (см. рис. 3);



Рис. 3. Сортамент профильных труб для мебели

– профильные трубы специального назначения (см. рис. 4).

Профильные трубы обладают пластичностью, устойчивостью к разнообразным воздействиям и надежностью. Дополнительная прочность на излом и изгиб приобретает труба благодаря поперечному сечению требуемой конфигурации. Это дает возможность замены швеллера, балки или уголка профильной трубой. Металлоконструкции, изготовленные из таких труб надежны, долговечны и экономичны, металлоемкость такой конструкции снижается примерно на 30 %.

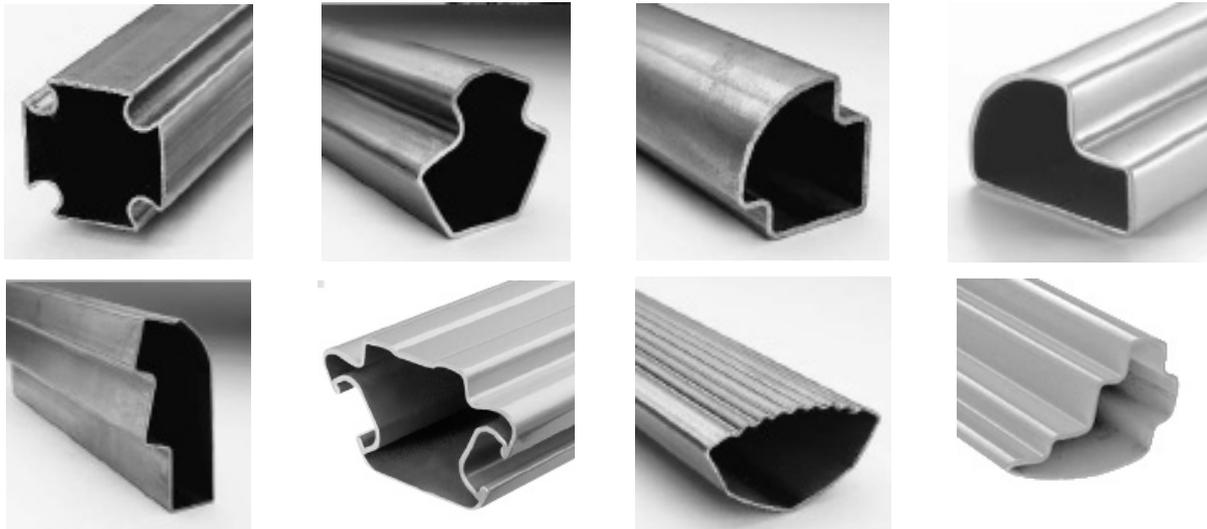


Рис. 4. Профильные трубы специального назначения

Материалы исследований. Профильные трубы в современных условиях изготавливаются, в основном, на трубопрокатных станах из труб круглого сечения. Различают трубы (имеющие круглое поперечное сечение) и профильные трубы (могут иметь различную форму поперечного сечения). Формоизменение круглых труб на профильные осуществляется в калибровочной группе стана (используемой обычно для калибровки круглых труб). При этом производятся только определенные профилиразмеры, как правило, с градацией всего по одной-двум толщинам стенки.

Технология производства профильных труб принята традиционной и предусматривает переформовку круглых труб-заготовок на квадратные и прямоугольные сечения в последовательно размещенных клетевых блоках.

Качество производимой продукции, как правило, соответствует заявленным в ТУ У В.2.7-27.224238290-001:2007 «Трубы стальные квадратные и прямоугольные, бесшовные и сварные для металлоконструкций» техническим требованиям.

Результаты исследования. Круглые электросварные трубы изготавливаются на трубосварочных станах из штрипса различной толщины. Прямошовные трубы служат, как заготовкой для производства профильных труб, так и могут быть самостоятельным конечным продуктом. Стальные электросварные трубы производятся в соответствии с техническими требованиями следующих ГОСТов: ГОСТ 10704, ГОСТ 10706, ГОСТ 10705, ГОСТ 20295. Электросварные трубы подлежат контролю качества, предполагающему гидравлические испытания. На рис. 5 представлена схема технологических операций, которые обеспечивают производство профильных труб.

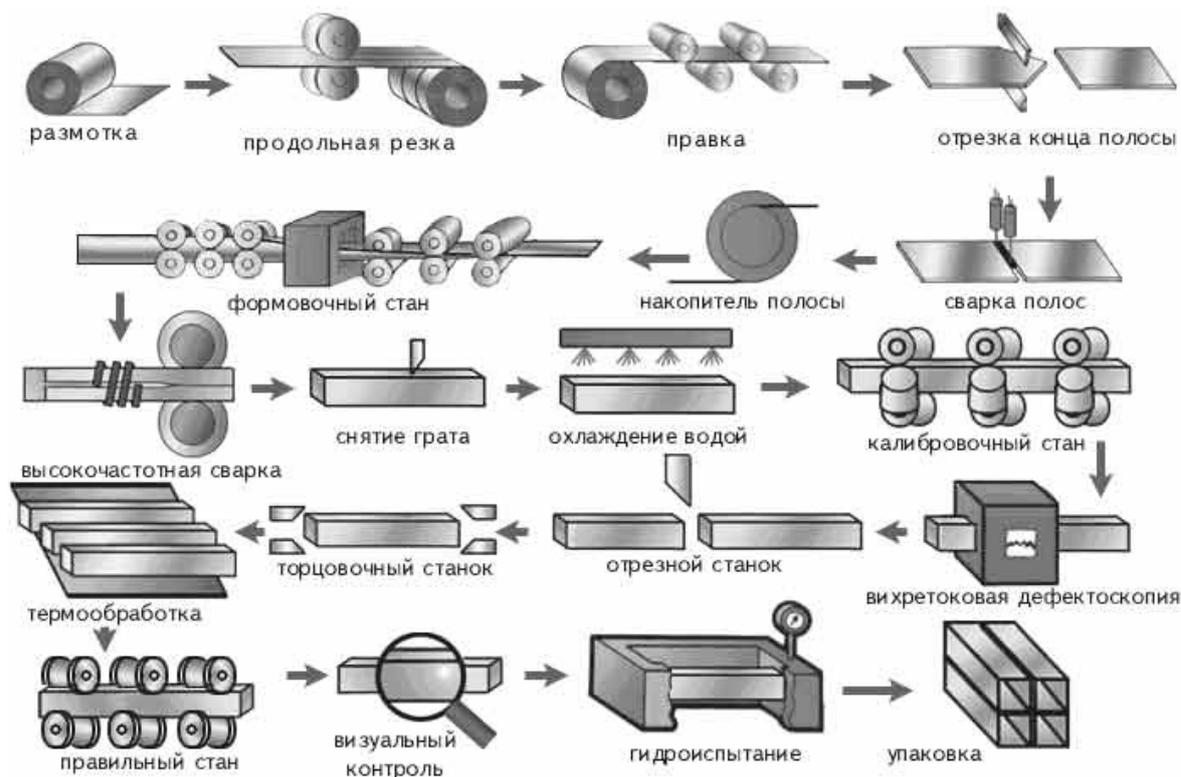


Рис. 5. Схема технологических операций, обеспечивающих производство профильных труб

К числу наиболее известных отечественных предприятий-изготовителей труб относятся:

- «Трубосталь»;
- Никопольский трубный завод;
- Донецкий металлопрокатный завод;
- Харьковский трубный завод.

Наиболее известными отечественными производителями профильных труб являются:

- «Иприс-Профиль»;
- Луганский трубный завод;
- «Славсант»;
- «Югтрансстройкомплект».

Крупнейшими зарубежными производителями профильных труб являются — Борский Трубный Завод, Московский трубный завод «Филит», «Северсталь» (Россия), а также Tubacex (Испания), Salzgitter (Германия), Vallourec (Франция), Tianda Oil Pipe Company Limited (Китай), Sagittarius Inc. (Индия) и др.

Сортамент профильных труб, используемых в мире разнообразен, однако в Украине этот сортамент очень узкий, производимые профильные трубы имеют простые поперечные сечения. Для расширения сортамента производимых в Украине профильных труб необходимо выполнение комплекса научных исследовательских работ, которые обеспечат создание теоретических и технических основ для организации их производства.

Выводы

1. Профильные трубы широко применяются в современном машиностроении и строительстве.
2. Металлоемкость стальной конструкции из профильных труб по сравнению с другим видом металлопроката снижается примерно на 30 %.
3. Для увеличения сортамента профильных труб в Украине необходимо выполнение научных исследовательских работ.

Литература

1. Плеснецов, Ю.О. *Аналіз сучасного стану виробництва гнутих профілів замкнутого перетину [Текст] / Ю.О. Плеснецов, О.С. Забара, Т.Л. Коворотний, М.С. Любімов // Вестник НТУ «ХПИ»: зб. наук. пр. – № 43. – X, 2010. – С. 146–157.*
2. *Metsec plc [Electronic resource]: official website. URL: www.metsec.com. Дата обращения: 25.09.2013.*
3. *Производство стали [Электронный ресурс]. URL: www.steelmill.ru. Дата обращения: 28.09.2013.*
4. *Иприс-Профиль [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: www.ipris-profil.com. Дата обращения: 28.09.2013.*

© Ю.А. Плеснецов, А.С. Забара

Ю.О. Плеснецов, к.т.н., доц., А.С. Забара, асп.

Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИРОБНИЦТВА І ВИКОРИСТАННЯ ПРОФІЛЬНИХ ТРУБ

В результаті аналізу встановлено, що використання профільних труб дозволяє значно знизити металоемність сталевих конструкцій. В Україні сортамент профільних труб дуже вузький і виробляються профільні труби відносно простих перерізів. Проведення наукових дослідницьких робіт дозволить створити теоретичні та технічні основи для їх виробництва в Україні.

Ключові слова: профільні труби, виробництво труб, сортамент профільних труб.

Yu.A. Plesnetsov, Ph.D., Associate Professor, A.S. Zabara, Post-graduate

National Technical University «KhPI», Kharkov

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE PRODUCTION AND USE OF SHAPED PIPES

The analysis found that the use of shaped pipes can significantly reduce the metal content of steel construction. In Ukraine, the assortment of shaped tubes are narrow and shaped tubes are made of relatively simple sections. Conducting scientific research will create a theoretical and technical basis for their production in Ukraine.

Keywords: shaped pipes, pipe making, assortment of shaped pipes.

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КУТА ВХІДНОГО КОНУСА ДВОКОНУСНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ КОМБІНОВАНОГО ВИТЯГУВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ

Методом скінченних елементів проведено моделювання процесів комбінованого витягування у конусних та двоконусних матрицях. Проведено порівняння результатів розрахунків витягування в конусних матрицях по силовим режимам з відомими даними. Досліджено вплив кута вхідного конуса двоконусної матриці на зусилля витягування, напружено-деформований стан заготовки та ресурс пластичності zdeформованого металу. Знайдено оптимальне значення кута для отримання виробів із різною товщиною стінки та донної частини.

Ключові слова: комбіноване витягування, метод скінченних елементів, кут конуса матриці, зусилля витягування, напружено-деформований стан заготовки.

Вступ. Витягування — широко розповсюджена операція холодного листового штампування, яка використовується для виготовлення вісесиметричних, коробчастих та інших порожнистих виробів. Вказані вироби використовуються на підприємствах машинобудування, приладобудування, радіотехнічного та електротехнічного профілю. Сучасне виробництво ставить задачі скорочення кількості переходів штампування, підвищення точності виробів після витягування, що приводить до зниження собівартості виробів та робить продукцію конкурентоспроможною. Традиційне витягування не відповідає вказаним вимогам, особливо по точності форми і розмірів виробів [1–3]. Використання комбінованого витягування дозволяє збільшити глибину витягування за один перехід та підвищити точність виробів завдяки потоншенню стінки. Сутність такого витягування полягає у розділі формоутворення виробу на певні стадії. При цьому, наступна стадія починається після завершення попередньої. Дані для проектування технології комбінованого витягування, які викладені в джерелі [4], в основному базуються на експериментальних даних і виробничому досвіді. На рис. 1 зображена схема комбінованого витягування в двоконусній матриці [4]. Ліворуч від вісі симетрії показаний стан перед витягуванням, праворуч – після витягування. Заготовка 1 встановлюється на матриці з двома конусами 2 (з кутами α і β). Формоутворення виробу без притискача виконується пуансоном 3. Величина зазору між матрицею і пуансоном z дозволяє виконувати потоншення стінки при витягуванні. В роботі [3] наведений інтервал для кута $\alpha = 30\text{--}45^\circ$, який встановлений експериментально. Практично відсутні дані по силових режимах і напружено-деформованому стану заготовки при інших значеннях кута та по використаному ресурсу пластичності zdeформованого металу. Останнє є визначальним для подальшого витягування з потоншенням після комбінованого витягування.

Постановка задачі. Метою роботи є вивчення впливу кута α на силові режими деформування, напружено-деформований стан заготовки та ресурс пластичності zdeформованого

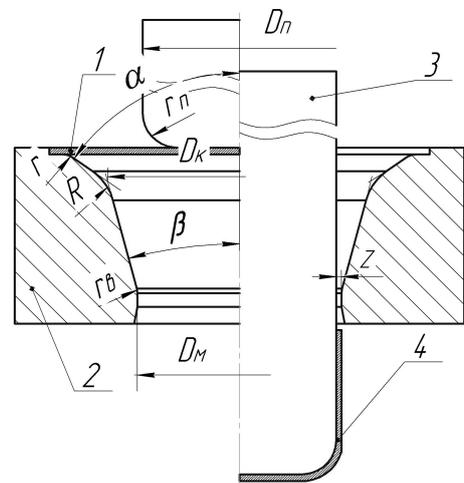


Рис. 1. Схема процесу комбінованого витягування у двоконусній матриці

металу. Вказану задачу можна вирішити шляхом створення математичних моделей з використанням чисельного методу скінченних елементів (МСЕ). МСЕ дозволяє враховувати конструктивні фактори (геометричну форму пуансону і матриці), технологічні фактори (коefficient витягування, величину зазору, тип змащення, швидкість деформування) та фізико-механічні фактори (пружні властивості металу, діаграму істинних напружень і діаграму пластичності металу, що деформується). Комп'ютерне моделювання в програмному середовищі DEFORM дозволяє одночасно врахувати наведені фактори [5]. Однак, створені моделі комбінованого витягування та результати розрахунку необхідно обов'язково перевіряти експериментальними величинами, що дозволить використати дані моделювання для удосконалення існуючих та розробки нових технологій комбінованого витягування.

Результати досліджень. Спочатку було виконане моделювання комбінованого витягування в матриці з одним конусом та проведено порівняння результатів розрахунків з даними експерименту для перевірки адекватності створених моделей з використанням МСЕ. Вихідними даними для моделювання були: діаметр заготовки $D_{\text{заг}} = 100$ мм, товщина заготовки $s_0 = 0,95$ мм, матеріал латунь Л80 з межею міцності $\sigma_B = 370$ МПа та модулем Юнга $E = 1,1 \cdot 10^{-5}$ МПа. Зміцнення матеріалу враховувалось по діаграмі істинних напружень з джерела [6]. Розміри деформуючого інструменту (див. рис. 1): діаметр матриці $D_M = 50$ мм, кут конусу матриці 15° ; діаметри пуансону $D_{\text{п}} = 47,34; 48,02$ та $48,6$ мм брали в залежності від зазору z між ним і матрицею, радіус заокруглення пуансону $r_{\text{п}} = 6$ мм. Діаметр конусу матриці $D_K = 58$ та 66 мм, вхідний радіус матриці $r = 5$ мм та радіус переходу у калібруючий пояс $r_B = 5$ мм.

Порівняння результатів чисельного моделювання та натурального експерименту процесу комбінованого витягування в одноконусній матриці проводили для витягування з наступними відносними зазорами z_B ($z_B = z/s_0$): $z_B = 1,4; 1,05$ та $0,737$. Останній зазор забезпечував деформування з потоншенням стінки. На рис. 2 приведені залежності зусилля витягування від переміщення пуансону, які отримані розрахунком МСЕ для $z_B = 0,737$, та експериментальні залежності з джерела [4]. Характер теоретичних і експериментальних залежностей практично однаковий. Графіки мають два максимуми зусилля. Максимальна розбіжність по максимальним значенням зусилля між теорією і експериментом не перевищує 10 %. На рис. 3 наведені стадії формоутворення виробу в одноконусній матриці, при яких виникають максимуми зусилля. Перший максимум виникає при заповненні конусу матриці (рис. 3, а), другий — при вході торця стінки, який зазнав потовщення в результаті витягування, у калібруючий пояс матриці (рис. 3, б).

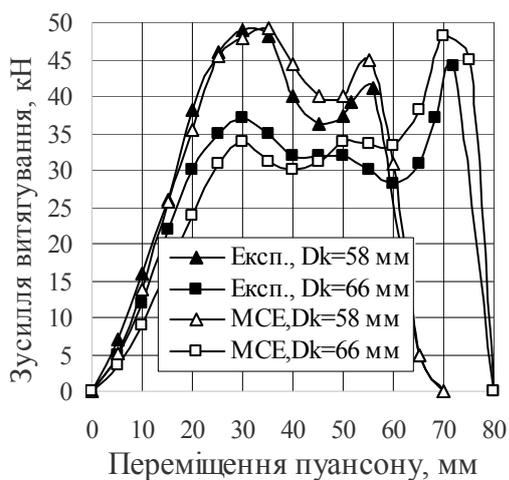


Рис. 2. Залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансону при витягуванні з $z_B = 0,737$

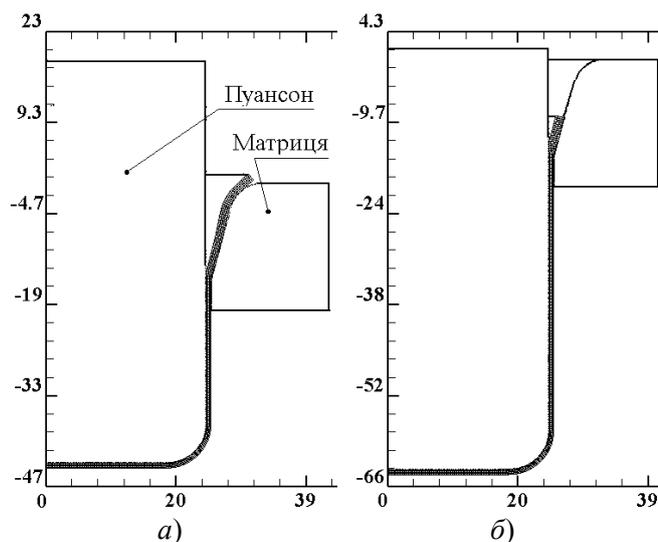


Рис. 3. Стадії формоутворення виробу. Розміри в міліметрах

Порівняння результатів чисельного моделювання та натурального експерименту процесу комбінованого витягування у випадках витягування з відносними зазорами $z_B = 1,4$ (рис. 4, а) і зазору $z_B = 1,05$ (рис. 4, б) також показало достатню збіжність даних, що підтверджує адекватність розроблених математичних моделей процесу комбінованого витягування у конусних матрицях.

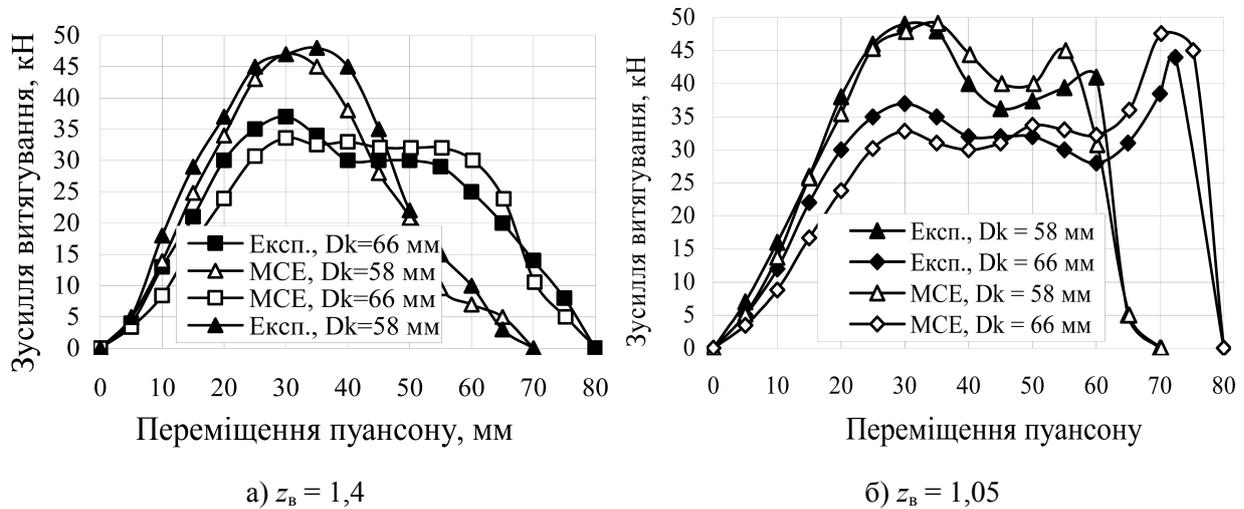


Рис. 4. Залежність зусилля комбінованого витягування від переміщення пуансону

Комбіноване витягування у двоконусних матрицях дозволяє зменшити кількість переходів формоутворення виробу у порівнянні з одноконусною матрицею, що значно здешевлює виробництво, та підвищує точність форми і розміри виробу без застосування додаткових операцій. На початковій стадії такого витягування на формоутворення виробу суттєво впливає кут вхідного конусу α . При моделюванні витягування в двоконусній матриці кут конусу змінювали від $\alpha = 30^\circ$ до $\alpha = 60^\circ$ через 5° . Деформуванню підлягала заготовка діаметром $D_{\text{заг}} = 110$ мм, товщиною $s_0 = 1,7$ мм із сплаву АМцА-М, $\sigma_B = 100$ МПа та $E = 0,71 \cdot 10^{-5}$ МПа. Зміцнення матеріалу враховувалось також по даним джерела [6]. Розміри деформуючого інструменту: діаметр пуансону $D_{\text{п}} = 57$ мм, радіус заокруглення $r_{\text{п}} = 10$ мм; діаметр матриці $D_{\text{м}} = 59$ мм, кут нижнього конусу $\beta = 15^\circ$, радіус вхідного конусу матриці $r = 5$ мм, радіус переходу конусів матриці $R = 15$ мм та радіус переходу у калібруючий пояс $r_B = 5$ мм. Основними технологічними параметрами процесу комбінованого витягування у двоконусній матриці є зусилля витягування і робота деформації, максимальне розтягувальне напруження σ_z в стінці виробу та використаний ресурс пластичності zdeформованого металу. Для прикладу, на рис. 5 приведена типова залежність зусилля витягування від переміщення пуансону при витягуванні з відносним зазором $z_B = 0,59$ і кутом матриці $\alpha = 55^\circ$. Графік має два максимуми зусилля. Це пояснюється тим, що витягування має дві стадії (рис. 6). Деформування по вхідному конусу і повне заповнення другого конусу закінчується при зусиллі 17,6 кН (рис. 6, а). Другий максимум зусилля витягування (43 кН) відповідає закінченню деформування заготовки по другому куту матриці (рис. 6, б).

На рис. 7 приведений розподіл компонент напружень при максимальному зусиллі витягування. Максимальні стискаючі радіальні напруження $\sigma_r = -161$ МПа спостерігаються в осередку деформації, загалом у стінці виробу величини σ_r змінюються від -80 МПа до -8 МПа. Розподіл осьових напружень σ_z зображено на рис. 7, б, величина σ_z у стінці виробу в середньому 64–92 МПа з максимумом 193 МПа у зоні виходу частини виробу із осередку деформації. Значення тангенціальних напружень σ_θ майже постійні по стінці виробу і складають 62–70 МПа, в осередку деформації вказані напруження досягають величини -175 МПа (рис. 7, в). Кінцеві розміри виробу зображені на рис. 8.

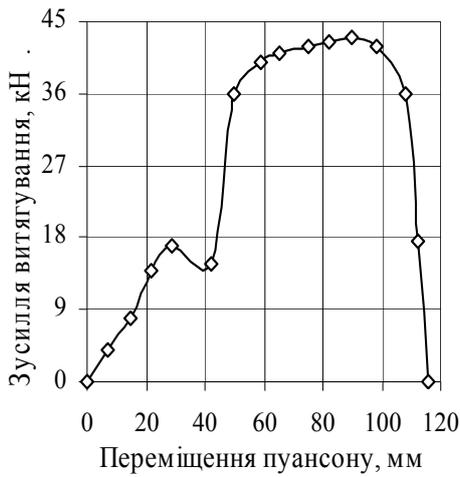


Рис. 5. Залежність зусилля від переміщення пуансону

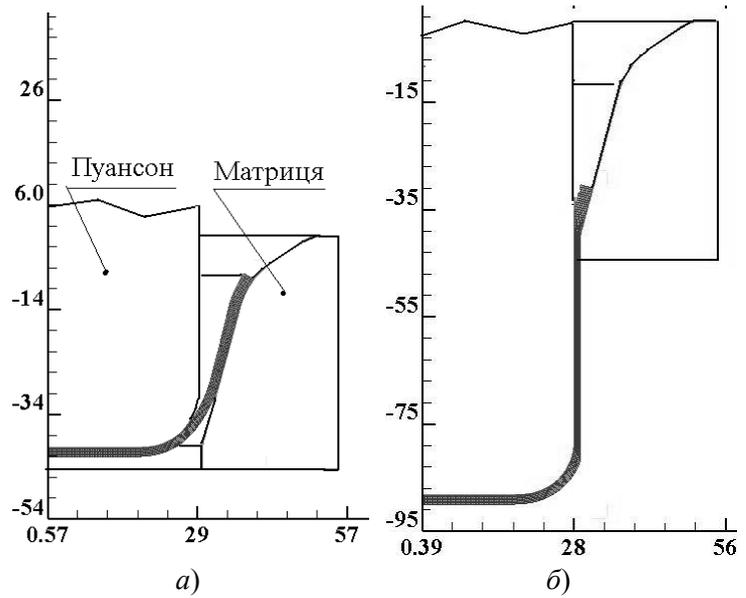


Рис. 6. Стадії формоутворення виробу. Розміри в міліметрах

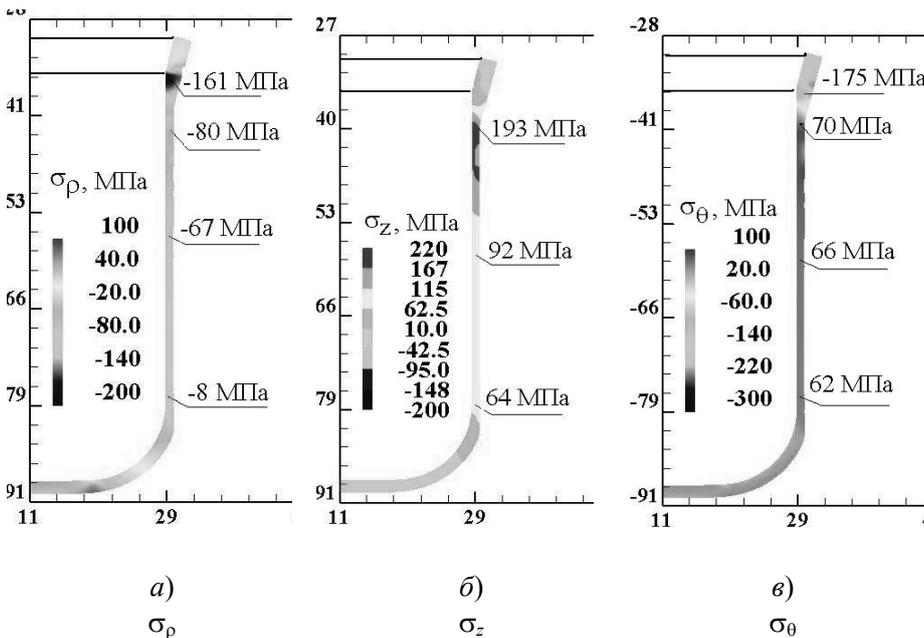


Рис. 7. Розподіл компонент напружень при максимальному зусиллі витягування

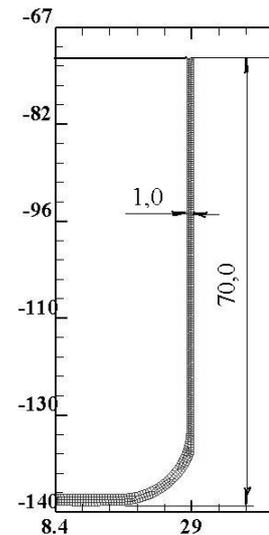


Рис. 8. Кінцеві розміри виробу

Розподіл деформацій та інтенсивності деформацій приведений на рис. 9. В донній частині виробу радіальні деформації ε_r в стінці мають значення від $-0,6$ до $-0,55$ (рис. 9, а). Максимальні осьові деформації $\varepsilon_z = 0,7-1$ мають місце у стінці виробу після виходу із зони деформування та в (рис. 9, б). Значення тангенціальних деформацій ε_θ плавно змінюються від $\varepsilon_\theta = -0,1$ у донній частині до $\varepsilon_\theta = -0,5$ у верхній частині стінки виробу (рис. 9, в). Розподіл інтенсивності деформацій ε_i приведений на рис. 9, г в стінці змінюються від $\varepsilon_i = 0,7$ до максимуму $\varepsilon_i = 1$ в зоні виходу заготовки із зони деформування.

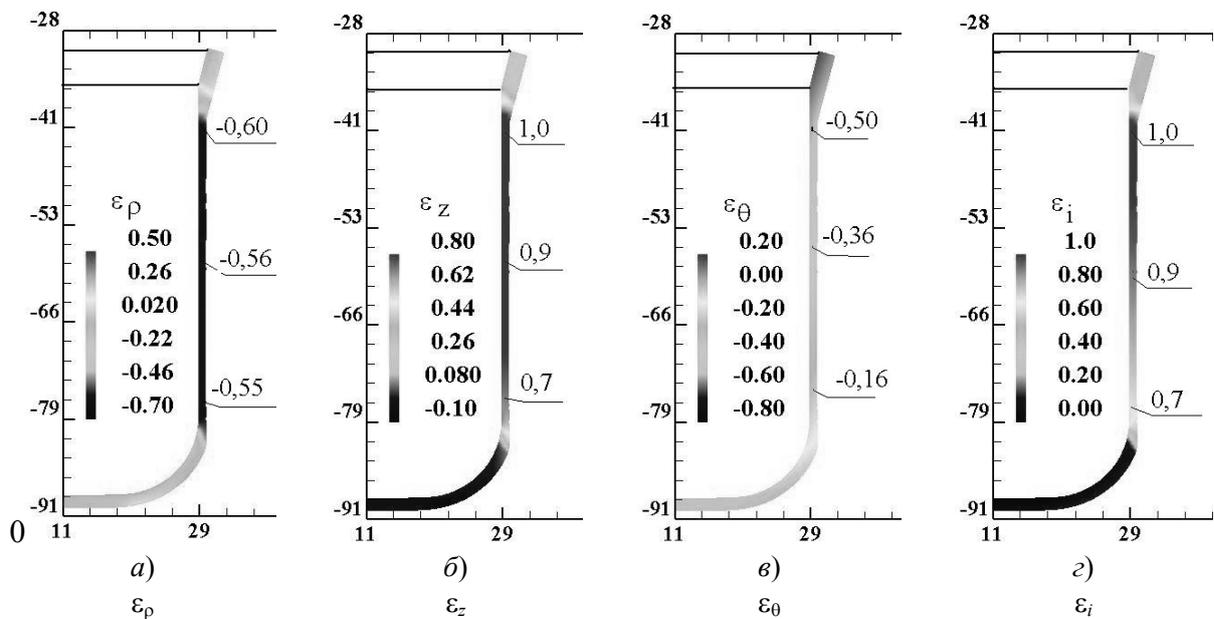


Рис. 9. Розподіл компонент деформацій і інтенсивності деформацій

Узагальнені дані по впливу кута α вхідного конусу матриці на процес комбінованого витягування приведені на рис. 10. На рис. 10, а зображена залежність максимального зусилля витягування від кута α , мінімальне значення зусилля 41 кН спостерігається при кутах 50° – 55° . Залежність використаного ресурсу пластичності zdeформованого металу в стінці виробу від кута α показує, що при куті 55° цей параметр має величину 0,69 і є найменшим (рис. 10, б), що дозволяє виконувати подальше потоншення стінки і отримання більшої висоти виробу. Залежність максимального осьового напруження, яке виникає в стінці заготовки при витягуванні, від кута α зображена на рис. 10, в. Найменше значення 218 МПа отримане при куті 55° .

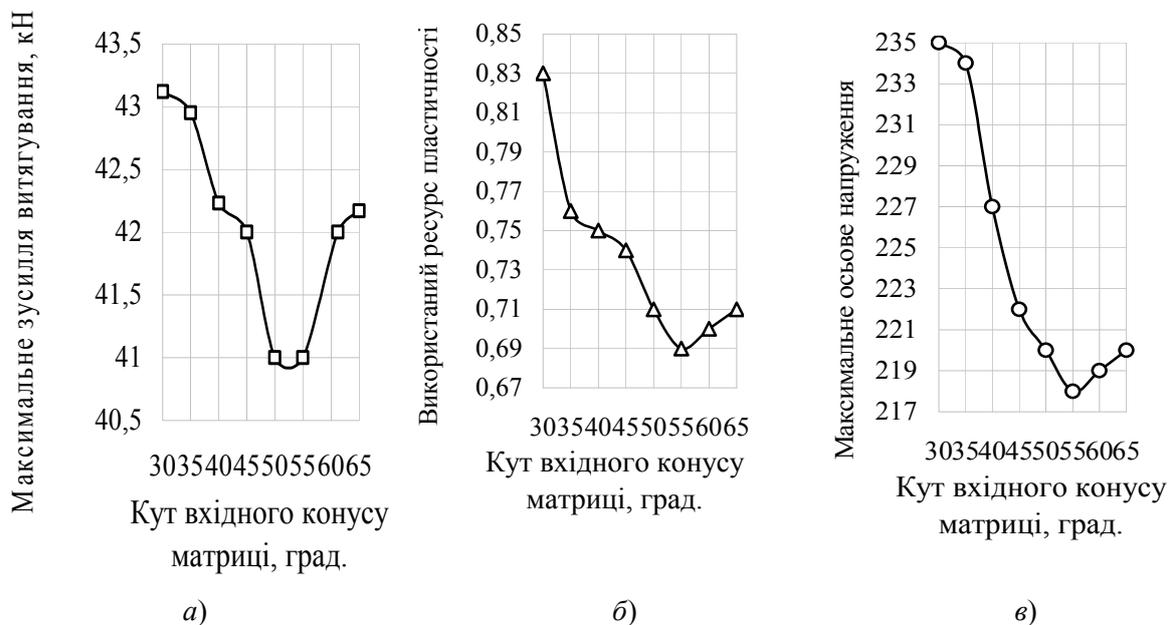


Рис. 10. Узагальнені дані по впливу кута вхідного конусу матриці на процес комбінованого витягування

Висновки

1. Методом скінченних елементів розроблені математичні моделі процесу комбінованого витягування у одноконусних і двохконусних матрицях. Для витягування в одно-

конусних матрицях проведена перевірка адекватності шляхом порівняння розрахункових та відомих експериментальних даних.

2. За допомогою комп'ютерного моделювання досліджений вплив кута входного конуса матриці на силові режими формоутворення виробів, роботу деформації, напружено-деформований стан заготовок та ресурс пластичності здеформованого металу. Встановлено оптимальний кут, який забезпечує мінімальне зусилля деформування, розтягувальні напруження та ресурс пластичності в стінці заготовки. Отримані дані можуть бути використані для проектування штампового оснащення та вибору пресового обладнання.

Література

1. Романовский, В.П. *Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский. – 6-е изд., пераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.*
2. *Ковка и штамповка: справ.: 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. – Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1984. – 288 с.*
4. Валиев, С.А. *Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов [Текст] / С.А. Валиев. – М.: Машиностроение, 1973. – 176 с.*
5. Калюжний, О.В. *Виготовлення складових деталей виробу «балон» з заданими механічними властивостями здеформованого металу [Текст] / О.В. Калюжний, В.В. Піманов / Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – № 2 (23) – Краматорск, 2010. – С. 117–121.*
6. Третьяков, А.В. *Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением [Текст] / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.*

© В.Л. Калюжний, А.С. Запорожченко

В.Л. Калюжний, д.т.н., проф., А.С. Запорожченко, асп.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА ВХОДНОГО КОНУСА ДВУХКОНУСНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Методом конечных элементов проведено моделирование процессов комбинированной вытяжки в конусных и двухконусных матрицах. Проведено сравнение результатов расчетов вытяжки в конусных матрицах по силовым режимам с известными данными. Исследовано влияние угла входного конуса двухконусной вытяжной матрицы на усилие вытяжки, напряженно-деформированное состояние заготовки и ресурс пластичности сформированного металла. Определено оптимальное значение угла для получения изделий с разной толщиной стенки и донной части.

Ключевые слова: *комбинированная вытяжка, метод конечных элементов, угол конуса матрицы, усилие вытяжки, напряженно-деформированное состояние заготовки.*

V.L. Kalyuzhniy, Doctor of Technical Sciences, Professor, A.S. Zaporozhchenko, Post-graduate

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

THE DETERMINATION OF THE OPTIMAL ANGLE OF THE INLET CONE OF THE DOUBLE-CONE DIE FOR THE COMBINED DRAWING PROCESS OF THE AXIALLY SYMMETRIC PRODUCTS

The simulation of the combined drawing process in the cone and double-cone dies was performed by means of the finite element method. For the comparison of results of simulation and experimental data of the combined drawing process were used the power modes of the process. The impact of the angle of the inlet cone of the double-cone die on the drawing process

force, the stress-strain state of the workpiece and the damage of the blank metal were researched. The optimal angle of the inlet cone of the double-cone die for the combined drawing process was defined for the production of the different thick wall and bottom part products.

Key words: the combined drawing process, the finite element method, the angle of the inlet cone of the double-cone die, the drawing process force, the stress-strain state of the workpiece.

УДК 621.961; 621.983; 621.774

О.В. Калюжний, к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ХОЛОДНЕ ШТАМПУВАННЯ ВИРОБУ З ДВОМА ФЛАНЦЯМИ ІЗ ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАЦІЙ ВИТЯГУВАННЯ, РОЗДАЧІ І ОСАДЖУВАННЯ

Розроблена технологія для серійного виготовлення виробу із листової заготовки з використанням операцій витягування, роздачі і осаджування. Методом скінченних елементів встановлені силові режими і робота деформації вирубування вихідної заготовки і по переходах формоутворення. При розрахунках розмірів напівфабрикатів враховані накопичені деформації і напруження, ресурс пластичності металу після деформації. Визначені розміри матриці, які забезпечують витягування за один перехід взамін традиційних двох. Процеси штампування можуть бути реалізовані на кривошипному обладнанні зусиллям 160 і 400 кН.

Ключові слова: холодне листове штампування, метод скінченних елементів, вирубування, витягування, роздача, осаджування фланця.

Вступ. Холодне штампування листових заготовок дозволяє виготовляти вироби з підвищеною продуктивністю і коефіцієнтом використання металу, зниженими енерговитратами. В теперішній час область промислового використання технології холодного штампування постійно розширюється в напрямку ускладнення геометричної форми виробів, скорочення кількості переходів штампування, зниження собівартості виробів, що збільшує конкурентоспроможність вказаної технології. При виготовленні деталі із низьковуглецевої сталі, ескіз якої показаний на рис. 1, можна використовувати трубчасту заготовку з наступними переходами роздачі і осаджування фланців. Однак, це приведе до великої собівартості деталі. Тому раціональним є використання формоутворення вказаного виробу з використанням операцій холодного листового штампування. Традиційно порожнисті вироби з фланцем і дном отримують витягуванням, що можна використати для отримання трубчастої заготовки з фланцем подальшим пробиванням дна. По даним джерел [1–3] традиційним витягуванням і комбінованим витягуванням [4] отримати показаний на рисунку напівфабрикат з фланцем за один перехід не можливо. Крім того в джерелах [1–3] практично відсутні дані по використаному ресурсу пластичності металу після витягування за два переходи, тому неможливо провести подальші розрахунки переходів роздачі і осаджування. Використати витягування з радіальним підпором фланця заготовки для серійного виробництва дозволить отримати напівфабрикат з фланцем циліндричної форми за один перехід, однак не забезпечить необхідну продуктивність для серійного виробництва [5]. Для скорочення кількості переходів при витягу-

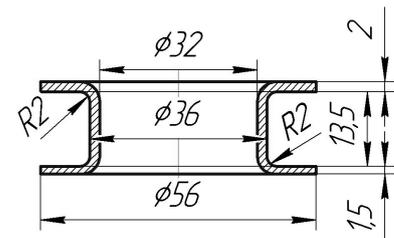


Рис. 1. Ескіз деталі

ванні автором в роботі [6] запропоновано використовувати матрицю зі спеціальним профілем, що дозволило отримати виріб за один перехід замість трьох по даним джерела [1].

Постановка задачі. Метою роботи є визначення розрахунковим шляхом параметрів штампування виробу з двома фланцями з використанням операцій холодного листового штампування та розроблення технології серійного виробництва таких виробів з використанням операцій витягування, роздачі та осаджування. Вказану задачу можна вирішити математичним моделюванням з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Застосування МСЕ дозволяє врахувати основні фактори, які впливають на формоутворення виробів холодним штампуванням з листової заготовки, накопичені напруження і деформації при штампуванні за декілька переходів, встановити розміри напівфабрикатів та кінцеві розміри виробів. В роботі використана ній ліцензований скінченно-елементний пакет програм DEFORM.

Результати досліджень. Діаметр вихідної круглої листової заготовки для першого переходу витягування визначений по даним джерела [1]. Круглу листову заготовку традиційно отримують вирубуванням із полоси. Схема вирубування для розрахунку МСЕ з позначеннями і необхідними розмірами приведена на рис. 2. Полоса 1 встановлена в матриці 2 і зафіксована притискачем 3. Заготовка діаметром 83 мм вирубується пуансоном 4.

На рис. 3. зображена розрахункова залежність зусилля вирубування від переміщення пуансону. Максимальне зусилля вирубування досягає величини 138 кН.

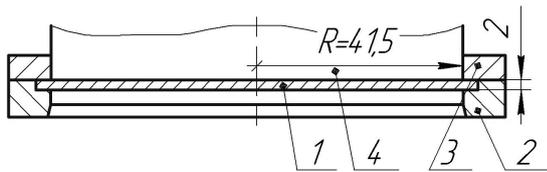


Рис. 2. Схема вирубування



Рис. 3. Залежність зусилля вирубування від переміщення пуансону

Найбільш складною є операція витягування. Було запропоновано провести витягування за один перехід в матриці спеціального профілю з отриманням фланця конічної форми

взаємін циліндричної. При подальшому пробиванні дна вказаний фланець можна буде зробити шляхом осаджування циліндричним. Моделюванням встановлений профіль матриці, який забезпечує отримання витягуванням за один перехід напівфабрикат необхідної форми і розмірів (рис. 4). Наведена половина розрахункової схеми витягування. Заготовка 1 встановлена на матриці 2. Витягування виконується пуансоном 3. Сутність спеціального профілю полягає в розподілу процесу витягування на декілька стадій, що запропоновано в роботі [4]. В даному випадку витягування виконується за три стадії. Спочатку, на першій стадії, заготовка з радіусу 41,5 мм до радіусу $R = 30$ мм деформується на радіусі матриці $R = 10$ мм. Після цього починається друга стадія формоутворення з радіусу $R = 30$ мм до радіусу $R = 24$ мм на матриці з радіусом заокруглення також $R = 10$ мм. Після

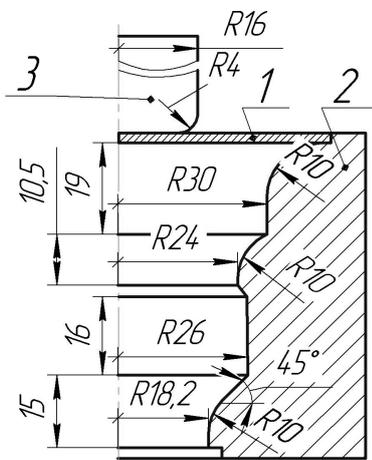


Рис. 4. Схема витягування в матриці спеціального профілю

деформування на матриці з $R = 10$ мм починається третя стадія, на якій отримується кінцевий зовнішній радіус напівфабрикату $R = 18,2$ мм і фланець під кутом 45° .

На рис. 5 показані результати розрахунку витягування в матриці спеціального профілю. Кінцеві форма і розміри в міліметрах половини напівфабрикату після витягування зображені на рис. 5, а. При витягуванні відбувається потоншення стінки на радіусі заокруглення пуансону з 2 до 1,74 мм, а фланець потовщується до 2,6 мм. Загальний вигляд напівфабрикату в розрізі наведений на рис. 5, б. На рис. 5, в показана залежність зусилля витягування від переміщення пуансону. На графіку видно три стадії витягування, причому кожна стадія починається після завершення попередньої (після суттєвого зменшення зусилля деформування). Максимальне зусилля витягування складає 65 кН. Отримана залежність дозволяє розрахувати роботу деформації.

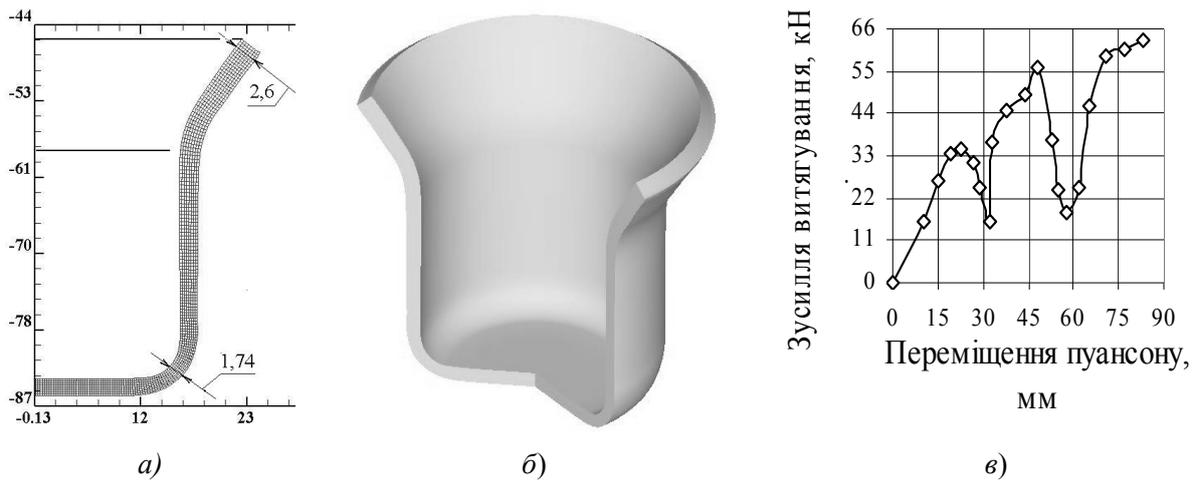


Рис. 5. Результати розрахунків переходу витягування

Наступний перехід виготовлення — пробивання дна і осаджування фланця. Схема цього переходу та результати розрахунків показані на рис. 6. В силу симетрії наведена половина схеми з формою і розмірами деформуючого інструменту (рис. 6, а). Напівфабрикат 1, який отриманий витягуванням, встановлений в матриці для вирубування 2. Деформування виконується пуансоном 3. Форма і розміри напівфабрикату після другого переходу наведені на рис. 6, б. При осаджуванні фланця відбувається його потоншення і він отримує товщину 2 мм по всій довжині. На рис. 6, в показана залежність зусилля вирубування і подальшого осаджування фланця від переміщення пуансону. Спочатку відбувається вирубування при максимальному зусиллі 85 кН, а осаджування завершується при зусиллі 140 кН.

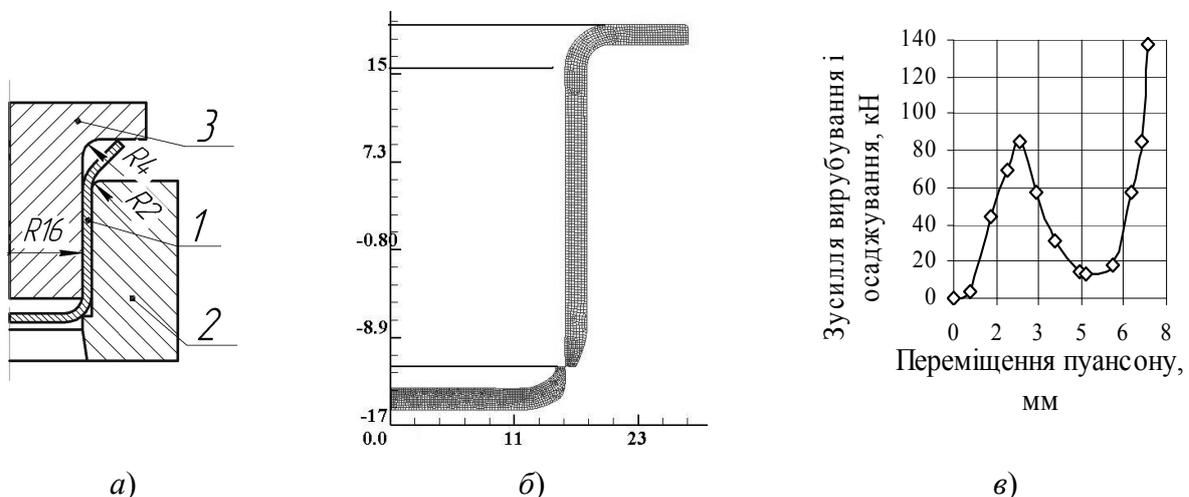


Рис. 6. Результати моделювання другого переходу формоутворення: вирубування з осаджуванням

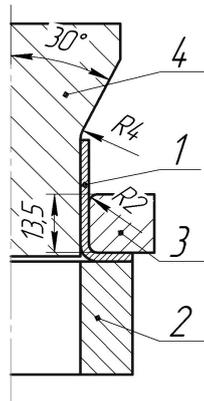


Рис. 7. Схема роздачі

Третій перехід штампування виробу — роздача трубчастій частині напівфабрикату, який отриманий на другому переході. Схема для розрахунку МСЕ формоутворення при роздачі з розмірами деформуючого інструменту зображена на рис. 7. Напівфабрикат 1 встановлений на плиті 2 в роз'ємній матриці 3. Роздача виконується пуансоном 4. На рис. 8. приведені результати моделювання. Половина напівфабрикату з розмірами після роздачі зображена на рис. 8, а. Довжина кінцевої частини після роздачі повинна забезпечити необхідну довжину другого фланця після наступного переходу осаджування. Загальний вигляд напівфабрикату в розрізі наведений на рис. 8, б. На рис. 8, в показана залежність зусилля роздачі від переміщення пуансону. Максимальне

зусилля має місце в кінці роздачі і складає 103 кН.

Останній перехід отримання виробу — осаджування кінцевої частини, яка отримана роздачею. Цей перехід можна виконувати на кривошипному пресі в двохпозиційному штампі одночасно з попереднім переходом. Схема для розрахунку МСЕ осаджування з розмірами деформуючого інструменту показана на рис. 9. Напівфабрикат 1 встановлений на плиті 2 в роз'ємній матриці 3. Осаджування виконується пуансоном 4.

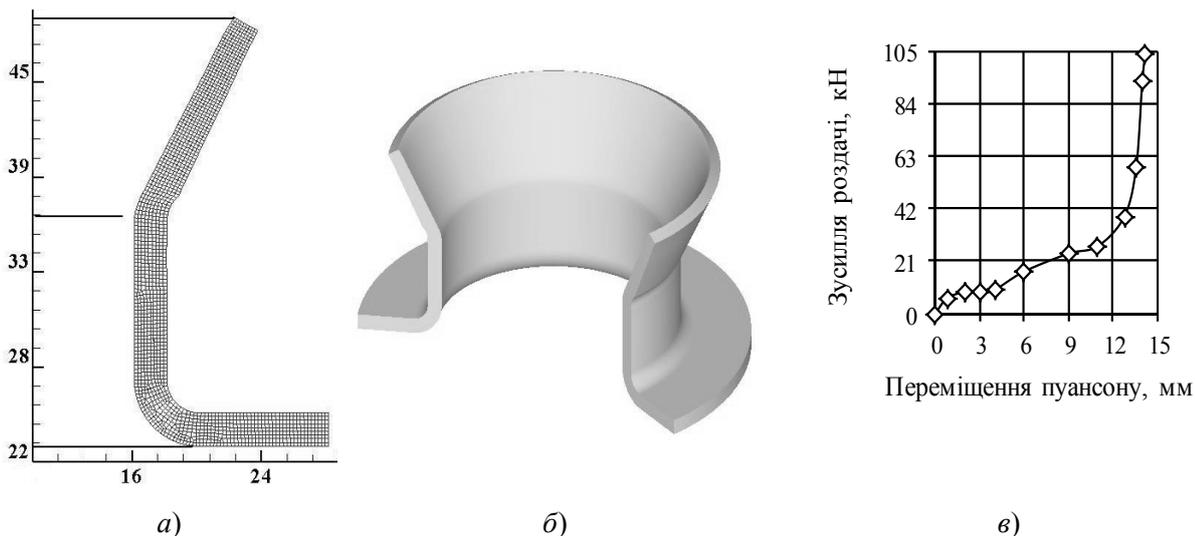


Рис. 8. Результати моделювання процесу роздачі

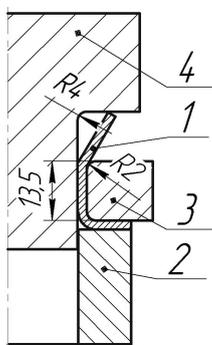


Рис. 9. Схема осаджування другого фланця

На рис. 10 приведені результати розрахункового аналізу процесу осаджування другого фланця. Кінцеві розміри виробу зображені на рис. 10, а. При осаджуванні другого фланця також відбувається потоншення і він має меншу товщину порівнянні з першим фланцем та вихідною листовою заготовкою. Однак отримана товщина відповідає кресленню виробу (див. рис. 1). Загальний вигляд виробу в розрізі наведений на рис. 10, б. На рис. 10, в зображена залежність зусилля осаджування другого фланця від переміщення пуансону. Кінцева форма виробу отримується при зусиллі 200 кН.

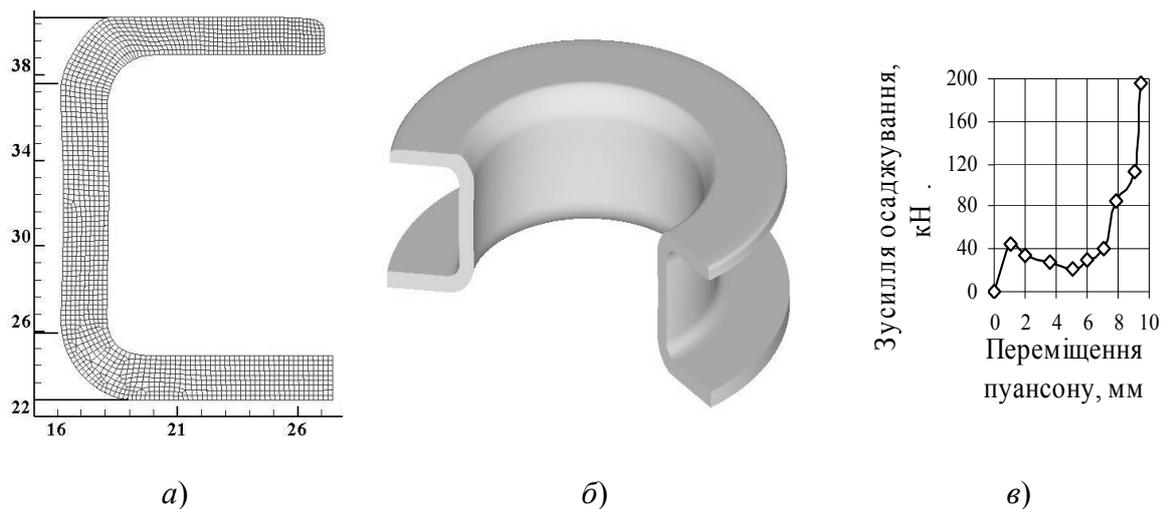


Рис. 10. Результати моделювання процесу осаджування другого фланця

Таким чином, для виробництва виробу згідно креслення необхідно використовувати наступні операції холодного листового штампування: вирубування круглої листової заготовки із полоси, витягування за один перехід порожнистого напівфабрикату з фланцем конічної форми в матриці спеціального профілю, пробивання дна з осаджуванням фланця конічної форми, роздача трубчастій частини напівфабрикату з отриманням конічної форми та друге осаджування конічної форми. Вказані процеси можна реалізувати на універсальному кривошипному обладнанні зусиллям 160 і 400 кН, яке забезпечить необхідну продуктивність для серійного виготовлення виробів.

Висновки

1. Запропонована технологія виготовлення порожнистого виробу з двома фланцями холодним листовим штампуванням взамін виготовлення із трубчастої заготовки.
2. Технологія включає операції вирубування круглої листової заготовки, витягування порожнистого виробу з конічним фланцем за один перехід, пробивання дна і одночасне осаджування першого фланця, роздачі та осаджування другого фланцю.
3. Для кожного переходу встановлені силові режими, робота деформації та розміри напівфабрикатів з урахуванням накопичених деформацій на попередніх переходах.
4. Запропонований спеціальний профіль матриці для витягування порожнистого виробу за один перехід взамін традиційних двох.
5. Переходи штампування виробу можуть бути реалізовані на кривошипних пресах зусиллям 160 і 400 кН.

Література

1. Романовский, В.П. *Справочник по холодной штамповке [Текст]* / В.П. Романовский. – 6-е изд., пераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. *Ковка и штамповка: справ.: 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. – Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1984. – 288 с.
4. Валиев, С.А. *Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов [Текст]* / С.А. Валиев. – М.: Машиностроение, 1973. – 176 с.
5. Патент України на корисну модель № 64784, МПК (2011) B21B21/10. Спосіб витягування з підпором фланця / Калюжний В.Л., Калюжний О.В., Піманов В.В., Савчук І.М.; Заявка и201101217 від 13.02.2011, опубл. 25.11.2011, бюл. № 22/2011.

6. Калюжний, О.В. Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю [Текст] / О.В. Калюжний // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості освіти: тези доп. IV Міжнар. конф., Київ, 2013. – С. 63–64.

© О.В. Калюжний

А.В. Калюжний, к.т.н., доц.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ХОЛОДНАЯ ШТАМПОВКА ИЗ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗДЕЛИЯ С ДВУМЯ ФЛАНЦАМИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ВЫТЯЖКИ, РАЗДАЧИ И ОСАДКИ

Разработана технология для серийного изготовления изделия из листовой заготовки с использованием операций вытяжки, раздачи и осадки. Методом конечных элементов установлены силовые режимы и работа деформации вырубке исходной заготовки и по переходам формообразования. При расчетах размеров полуфабрикатов учтены накопленные деформации и напряжения, ресурс пластичности сформированного металла. Определены размеры матрицы, которые обеспечивают вытяжку за одну операцию взамен традиционных двух. Процессы штамповки могут быть реализованы на кривошипном прессовом оборудовании усилием 160 и 400 кН.

Ключевые слова: холодная листовая штамповка, метод конечных элементов, вырубка, вытяжка, раздача, осадка фланца.

A.V. Kaliuzhny, Ph.D., Associate Professor

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

COLD FORMING FROM SHEET PREFORM OF AN ARTICLE WITH TWO FLANGES BY USE OF PROCESSES OF A DRAWING, DISPENSATION AND DEPRESSION

The technique is developed for serial manufacture of an article from sheet preform with use of processes of a drawing, dispensation and depression. The finite element method fixes force conditions and an energy of deformation of blanking of a part. At calculations of the sizes of semifinished materials the saved up strains and stresses, a toughness resource deformed metal are considered. The sizes of a matrix which ensure a drawing in one operation instead of traditional processes are defined. Press forming processes can be realised on crank mechanism about 160 and 400 kH.

Keywords: a cold sheet-metal forming, a finite element method, blanking, a drawing, dispensation, flange depression.

ТЕХНОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ХРОМОМАРГАНЦЕВОНІКЕЛЕВОЇ ТЕРМІТНОЇ СТАЛІ Х14Г14Н3Т

В роботі представлено результати дослідження хромомарганцевонікелевої сталі Х14Г14Н3Т, отриманої металотермічним способом. Запропоновано застосування розробленого складу металотермічної шихти, що дозволяє не тільки отримувати заданий хімічний склад сплаву, але і структуру, фізичні, механічні і службові властивості сталі. При цьому одночасно використовуються основні переваги металотермічного синтезу, а саме можливість отримувати відливки в місцях, віддалених від джерел електроенергії, при відсутності промислового устаткування. Синтезований матеріал може використовуватися при екстремому виготовленні заготовок литвом.
Ключові слова: термітна сталь, металотермія, структура, фізичні, механічні та службові властивості.

Вступ. Промислова сталь Х14Г14Н3Т отримує все більше застосування у зв'язку з тим, що їй притаманний цілий комплекс особливих, відсутніх у інших матеріалах, властивостей. Значні перспективи її використання полягають і у тому, що вказана сталь відноситься до сталей з аустенітною структурою і успішно може замінити сталі Х18Н9, 2Х18Н9 та ін.

Поєднання металотермічного методу синтезу і специфічних характеристик синтезованої сталі відкриває нові можливості для отримання виливків та для використання високопегретого розплаву для ремонту і відновлення деталей. Крім цього металотермічні методи мають цілий комплекс переваг — високу продуктивність процесу, зручність й універсальність оснащення, відсутність потреби у джерелах електроенергії та можливість термінового отримування сплаву, короткий період переходу від експериментальних досліджень до промислового впровадження. Суттєві переваги термітного способу синтезу і зараз викликають до матеріалів синтезованих цією технологією цілком заслужений інтерес.

Мета роботи. Встановити можливості виготовлення термітної сталі Х14Г14Н3Т та виявити особливості її структури, фізичні, механічні, технологічні та службові властивості.

Матеріали та методика проведення експерименту. Суть металотермічних реакцій полягає у відновленні металом з більшою хімічною активністю металу з меншою активністю з його оксиду. Екзотермічна взаємодія елементів відбувається у тому випадку, коли в результаті реакції утворюються оксиди з більш високою термодинамічною стійкістю. На алюмініотермічне відновлення оксидів найсуттєвіше впливають властивості матеріалів, що містяться у металотермічній шихті, їх агрегатний стан, співвідношення компонентів, схеми підпалювання та ін. Механізм алюмініотермічної взаємодії головним чином описаний у роботах [1, 2].

Використані матеріали: сажа ацетиленова (технічний вуглець ТУ 14-7-24-80), ферохром ФХ65-7А ГОСТ 47570-79; силікомарганець СМн26 ГОСТ 4756-77; феросиліцій ФС65Ал3,5 ГОСТ 1415-78; феромарганець ФМн70 ГОСТ 4761-80; оксид нікелю, феротитан ФТи30А ГОСТ 4761-80; порошок алюмінієвий ПА-3...ПА-4 ГОСТ 6058-73, просіяне мливно алюмінієвої стружки, залізна окалина (ковальського і прокатного виробництв) з середнім хімічним складом (% за масою): 0,05 С; 0,10–0,35 Si; 0,10–0,35 Mn; 0,01–0,03 S; 0,01–0,03 P; 40–49 Fe₂O₃; 50–59 FeO, решта — ін.

Порошкову шихту просувували, перемішували і розміщували у внутрішній камері металотермічного реактора. Надалі металотермічну шихту підпалювали. Ініціювання процесу горіння виконували спеціальним термітним сірником. Реакція за кілька секунд поширювалася на весь об'єм шихти. Температура реакції сягала 2100 °С. Головна умова

такого металотермічного процесу — необхідність отримання реальної температури горіння шихти вище температури плавлення шлаку [2–5]. Здешевлювали собівартість виготовлення шихти, замінюючи алюмінієвий порошок на мливу алюмінієвої стружки.

Розрахунок металотермічної шихти на першому етапі виконували для стехіометричного співвідношення компонентів реакції. Після цього враховували коефіцієнти засвоєння легуючих елементів у сталі [6]. В подальшому проводилася корекція хімічного складу шихти, що дозволило отримати заготовки у дослідно-промислових умовах відповідного хімічного складу та з наперед визначеною структурою.

Для визначення маси металевих зливка проводили мікроплавлення з масою шихти 250–300 г та різним процентним співвідношенням компонентів у металотермічній суміші.

Кількість випробувань вибрана у межах необхідної точності оцінки механічних властивостей — достатньо малій імовірності похибки 1-го та 2-го роду [7]. З урахуванням заданого ступеня точності (надійність оцінки середнього значення характеристики матеріалу 98–99 %) теоретична розрахункова кількість зразків 11,1. Для встановлення одного показника проводилося 12 термітних плавлень.

Експериментальні дослідження. Встановлено хімічний склад термітної сталі Х14Г14Н3Т (у % за масою): С – 0,12, Si – 0,9; Mn – 13,5...14,7, Cr – 13,5...14,5, Ni – 3,1...3,5, Ti – 0,4...0,6, S – 0,02, P – 0,035, який відповідав промисловій сталі.

В результаті експериментальних досліджень виявлено, що як і для сталей отриманих традиційними технологіями марганець і нікель розширяють для термітної сталі аустенітну область, зменшуючи температуру утворення аустеніту. Для стабілізації утвореного у структурі термітної сталі аустеніту використовували нікель, а для усунення старіння і зменшення величини карбідів — 0,4...0,6 % титану.

На початку експериментальних досліджень встановлювали вплив основних легуючих елементів на положення фазових областей термітної сталі. На рис. 1 показано ізотермічний розріз діаграми хромомарганцевонікелевої термітної сталі при 3 % Ni.

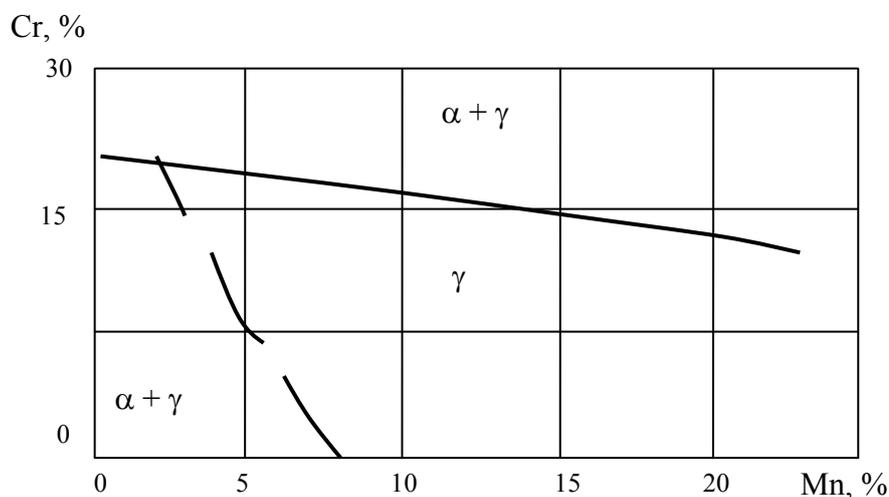


Рис. 1. Вплив хрому і марганцю на фазові перетворення хромомарганцевонікелевої термітної сталі; гартування з 1200 °С, охолодження у воді

Результати дослідження фізичних і механічних властивостей хромомарганцевонікелевої термітної сталі Х14Г14Н3Т показано в табл. 1 і 2. При порівнянні механічних властивостей термітної і промислової сталей помічено збільшення її міцності (8–10 %), пластичності (3–5 %) і ударної в'язкості (7–9 %). Очевидно, що це пов'язано із до розкислення сплаву алюмінієм, що входить у склад металотермічної шихти і роздрібненням структури сталі. Виявлено у центральній частині термітного зливка 5–6, а на відстані 3–5 мм від поверхні 6–7 бал зерна. У структурі сталі виявлено незначний вміст карбідів 2–3 % за об'ємом, тип карбідів — комплексний.

Таблиця 1. Фізичні властивості термітної сталі X14Г14НЗТ

| Густина, γ , кг/м ³ , $\times 10^3$ | Коефіцієнт теплового розширення, $\alpha \times 10^{-6}$, K ⁻¹ | | | | | Коефіцієнт тепло- провідності (k), Вт/м К | Питомий опір (ρ), $\times 10^{-7}$, Ом·м | Модуль пружності (E), ГПа | Магнітна проникність (μ), Гс/Е | Окалинстійкість, °С |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---|---|---------------------------------|--|------------------------|
| | 20–100 | 100–200 | 200–300 | 300–400 | 400–500 | | | | | |
| 7,9 | 16,2 | 16,9 | 17,6 | 20,8 | 20,9 | 38 | 0,78 | 199 | 1,05 | 710 |

Таблиця 2. Механічні властивості термітної сталі X14Г14НЗТ

| Границя міцності (σ_b) | Умовна границя текучості при допуску на пластичну деформацію 0,2 % ($\sigma_{0,2}$) | Відносне видовження, (δ_5) | Відносне звуження (ψ) | Твердість за Брінелем (НВ) | Ударна в'язкість (a_n), МПа |
|---------------------------------------|---|---|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| МПа | | % | | | |
| 660 | 240 | 410 | 50 | 230 | 0,12 |

Продовження досліджень було направлено на встановлення впливу температури на механічні властивості термітної сталі. Результати проведених дослідження показано на рис. 2. Температурний інтервал встановленого впливу знаходився у межах від -196 до 1100 °С. При цьому вдалося виявити зростання σ_b і $\sigma_{0,2}$ при низьких температурах, що може бути пояснено руйнуванням матеріалу за відомою схемою А.Ф. Йоффе [8].

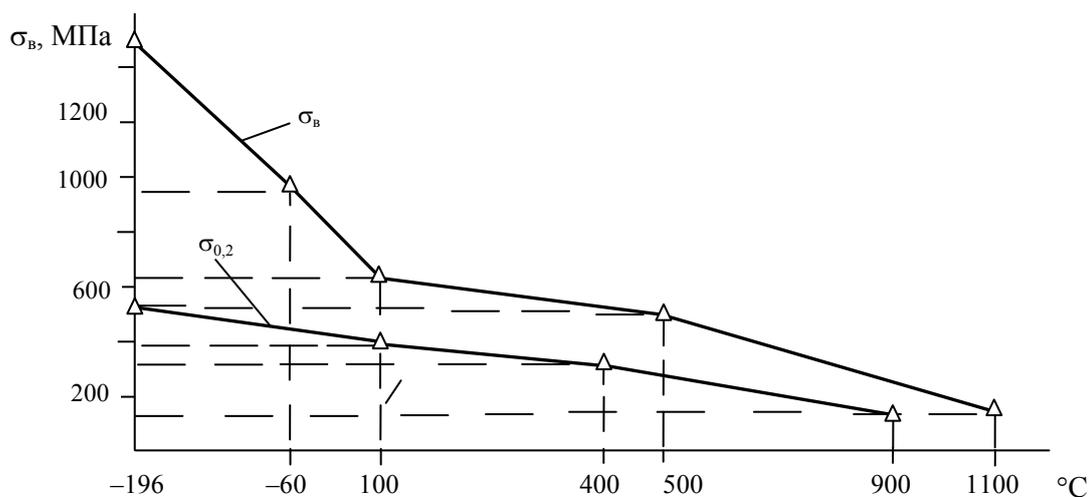


Рис. 2. Залежність механічних властивостей термітної сталі X14Г14НЗТ

При збільшенні температури випробування з 100 до 1100 °С спостерігалось плавне зменшення міцності досліджуваної термітної сталі. Одночасно виявлено, що ударна в'язкість сталі суттєво зменшується в інтервалі температур 100 – 1100 °С (майже в 2 рази) і складає $0,2$ МДж/м², а в інтервалі температур від -196 до 20 °С — $0,1$ МДж/м² (випробування виконували за КСУ).

Аналіз встановлених величин відносної пластичності і відносного зменшення перерізу зразків з термітної сталі дозволяє виявити, що при зміні температури від -60 до 1000 °С значення ψ змінюється від 62 до 74 %, в той же час в інтервалі температур 1000 ... 1100 °С ця зміна складає від 74 до 85 %. Значення δ спочатку послідовно збільшується до 50 % при -60 °С, надалі зменшується до свого мінімального значення 41 % при 550 °С і у подальшому зростає до 53 % при 850 °С. При збільшенні температури δ послідовно зменшується.

Таким чином особливістю термітної сталі X14Г14Н3Т є стабільна аустенітна структура з незначним вмістом карбідів до 2–3 % за об'ємом та комплексом задовільних механічних властивостей, які міняються за встановленими у роботі залежностями.

Висновки: 1. Встановлено, що металотермічні методи синтезу матеріалу цілком придатні для синтезу хромомарганцевонікелевої сталі X14Г14Н3Т. 2. Розроблено склади екзотермічних шихт для синтезу вказаної сталі. 3. Встановлено хімічний склад синтезованої сталі, її структура, фізичні, механічні та службові властивості, а саме границя міцності, відносна пластичність, відносне зменшення перерізу, ударна в'язкість та ін. 4. Виявлені залежності σ_b , $\sigma_{0,2}$, a_n , ψ , δ від температури.

Література

1. Лякишев, Н.П. *Алюминотермия [Текст] / Н.П. Лякишев. – М.: Металлургия, 1987. – 422 с.*
2. Жигуц, Ю.Ю. *Сплавы, синтезованные металотермией и СВС-процессами [Текст]: моногр. / Ю.Ю. Жигуц. – Ужгород: Гражда, 2008. – 276 с.*
3. Жигуц, Ю.Ю. *Синтез термитных кавитационостойких сталей [Текст] / Ю.Ю. Жигуц // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 1/5 (61). – С. 4–6.*
4. Жигуц, Ю.Ю. *Технология отримання термитних суднобудівних сталей [Текст] / Ю.Ю. Жигуц // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – 2012. – № 3 (28). – С. 283–286.*
5. Жигуц, Ю. *Ресурсозберігаюча технологія термітного зварювання сталевих деталей [Текст] / Ю. Жигуц, В. Лазар // Вісник ТДТУ. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 94–98.*
6. Жигуц, Ю.Ю. *Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу [Текст] / Ю. Жигуц, В. Широков // Машинознавство. – 2005. – № 4. – С. 48–50.*
7. Горский, В.Г. *Планирование промышленных экспериментов [Текст] / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.*
8. Золоторевский, В.С. *Механические свойства металлов [Текст] / В.С. Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.*

© Ю.Ю. Жигуц

Ю.Ю. Жигуц, д.т.н., проф.

ГВУЗ «Ужгородский национальный университет»

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ХРОМОМАРГАНЦЕВОНИКЕЛЕВОЙ ТЕРМИТНОЙ СТАЛИ X14Г14Н3Т

В работе представлены результаты исследования хромомарганцевоникелевой стали X14Г14Н3Т, полученной металлотермическим способом. Предложено применение разработанного состава металлотермической шихты, который позволяет не только получать определенный химический состав сплава, но и структуру, физические, механические и служебные свойства стали. При этом одновременно используются основные преимущества металлотермического синтеза, а именно возможность получать отливки в местах, удаленных от источников электроэнергии, при отсутствии промышленного оборудования. Синтезированный материал может использоваться при экстренном изготовлении заготовок литьем.

Ключевые слова: термитная сталь, металлотермия, структура, физические, механические и служебные свойства.

Yu.Yu. Zhiguts, Doctor of Technical Sciences, Professor

Uzhgorod National University

THE TECHNOLOGY OF SYNTHESIS CHROME-MANGANESE-NICKEL THERMITE STEELS MARKS «X14Г14Н3Т»

In this papers was analyzed the results of research of the chrome-manganese-nickel thermite steels marks «X14Г14Н3Т», where produced by metallothermic method using. The compo-

sition of reactions is used of exothermic charge and allows not only to get the chemical composition of alloy is offered, but also structure, physical, mechanical and official properties of steels. Thus taken advantage metallothermic synthesis, namely to get founding's in places, remote from the sources of electric power, industrial equipment. This material can be used for the urgent welding of purveyances casting.

Keywords: *thermite steel, metallothermy, structure, physical, mechanical and service properties.*

УДК 621.9.048

С.Н. Ясуник, к.т.н., доц., И.М. Левинская, асп., А.С. Зуев, асп.

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ АБРАЗИВА

В статье представлены результаты исследования производительности обработки сложнопровольных деталей псевдоожигенным слоем абразива при введении в установку дополнительных трубопроводов.

Ключевые слова: *обработка, абразив, дополнительный трубопровод.*

Введение. Вопросы финишной обработки сложнопровольных деталей в настоящее время являются актуальными. Применение для них классических методов финишной обработки практически невозможно, поэтому большое распространение получили методы обработки деталей свободными абразивами. Одним из таких методов является метод обработки деталей псевдоожигенным слоем абразива (ПСА), который заключается в создании кипящего (псевдоожигенного) абразивного слоя, в который погружают обрабатываемую заготовку, вращающуюся либо имеющую какое-либо другое сложное движение [1–4]. Использование кипящего слоя абразивных зерен как своеобразного режущего инструмента, обладающего высокой степенью текучести, может обеспечить обработку сложнопровольных поверхностей за счет контакта инструмента с поверхностью сложной формы [3, 4].

Одним из способов интенсификации процесса обработки ПСА таких деталей является введение в установку дополнительных трубопроводов, позволяющих создавать направленные потоки газоабразивной взвеси в область затененных участков обрабатываемых поверхностей [5].

Целью данной работы являлось изучение возможности повышения производительности обработки сложнопровольных деталей ПСА за счет введения в установку дополнительных трубопроводов.

Методика эксперимента. Для проведения данных исследований в НИЛ «ОСА» Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля был изготовлен экспериментальный стенд ТУ-9, который представляет собой рабочую камеру в виде прямоугольного параллелепипеда. В нижней части рабочей камеры устанавливаются газораспределительные решетки. В верхней части камеры располагается фильтр. В качестве псевдоожигающей среды используется воздух, подача которого в камеру осуществляется промышленным роторным компрессором. В качестве рабочей среды в экспериментальных исследованиях использовался карбид кремния черный марки 14А зернистостью F36.

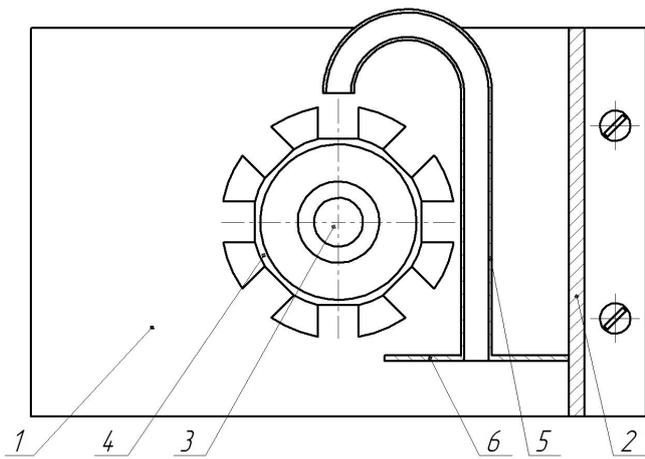


Рис. 1. Схема расположения трубопровода относительно обрабатываемой детали в рабочей камере установки:

- 1 – рабочая камера; 2 – стенка рабочей камеры;
 3 – шпиндель; 4 – деталь;
 5 – дополнительный трубопровод;
 6 – входной устройство трубопровода

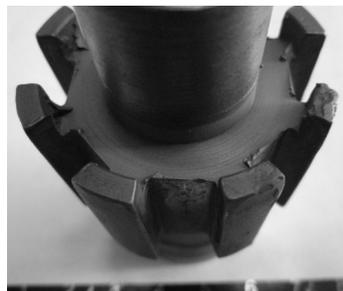
В данном исследовании оценивался съем металла, снимаемого с образцов сложной формы, в установках без трубопроводов и с их наличием. Схема расположения трубопровода в рабочей камере представлена на рис. 1. Все опыты были рандомизированы во времени, а также дублировались по три раза. Разброс полученных экспериментальных данных относительно истинного значения принимался отвечающим закону нормального распределения. Такие параметры как зернистость абразива, давление сжатого воздуха, живое сечение газораспределительной решетки в ходе исследований оставались постоянными. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 1. Внешний вид образцов до и после обработки представлен на рис. 2.

Таблица 1. Средние значения съема металла Q с поверхности исследуемых образцов

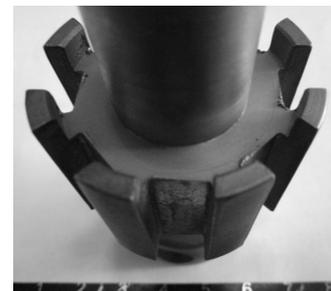
| Время обработки t , мин | Без трубопровода | С трубопроводом | Q_1-Q_2 , % |
|------------------------------|------------------|-----------------|---------------|
| | Q_1 , г | Q_2 , г | |
| 5 | 0,2095 | 0,2295 | 9,54 |
| 10 | 0,1675 | 0,1842 | 9,97 |
| 15 | 0,1394 | 0,1578 | 13,04 |



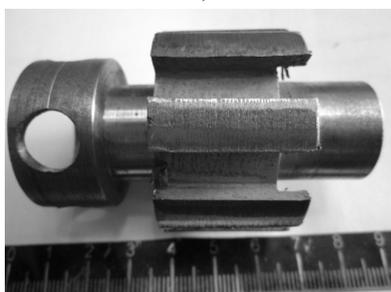
а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 2. Внешний вид деталей:

- а), г) – до обработки; б), д) – после обработки детали в ПСА; в), е) – после обработки детали в ПСА с дополнительным трубопроводом

Выводы

Результаты экспериментальных исследований показали, что введения в установку дополнительных трубопроводов позволяет повысить производительность процесса, так съём металла увеличивается в среднем на 9–13 % при всех прочих равных условиях. Анализируя поверхности образцов отчетливо видно, что обработка деталей, имеющих затененные области, с применением дополнительного трубопровода происходит более интенсивно. Этому свидетельствует как повышенный съём металла с поверхности этих образцов, так и их внешний вид. Как и при традиционной обработке деталей ПСА с течением времени интенсивность съема металла уменьшается ввиду изменения микрорельефа поверхности и удаления заусенцев. Таким образом, введение в установку для обработки деталей ПСА трубопроводов позволит без повышения энергозатрат на осуществление процесса повысить его производительность.

Литература

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора вентилятора. Часть I [Текст] / В.А. Богуслаев, Ф.И. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ООО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
2. Мозговой, В.Ф. Технология и оборудование для финишно-упрочняющей обработки деталей ГТД свободным абразивом [Текст] / В.Ф. Мозговой, А.И. Попенко, А.Я. Качан // Технологические системы. – 2001. – № 3. – С. 25–29.
3. Кремень, З.И. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля [Текст]: метод. рекомендации // З.И. Кремень, М.Л. Массарский, В.З. Гузэль – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – 53 с.
4. Левинская, И.М. К вопросу обработки деталей турбоабразивным способом [Текст] / И.М. Левинская // Вибрации в технике и технологиях. – 2010. – № 2 (58). – С. 111–119.
5. Левинская, И.М. Интенсификация обработки деталей псевдооживленным слоем абразива [Текст] / И.М. Левинская, С.Н. Ясуник, А.С. Зуев // Науч. вестник ДГМА. – 2012. – № 2 (10Е). – С. 66–70.

© С.Н. Ясуник, И.М. Левинская, А.С. Зуев

С.М. Ясунік, к.т.н., доц., І.М. Левинская, асп., О.С. Зуєв, асп.

Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ АБРАЗИВУ

У статті наведено результати дослідження продуктивності обробки складнопрофільних деталей псевдозрідженим шаром абразиву при введенні в установку додаткових трубопроводів.

Ключові слова: обробка, абразив, додатковий трубопровід.

S.N. Yasunik, Ph.D., Associate Professor, I.M. Levinskaya, Post-graduate student, A.S. Zuiev, Post-graduate student

Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University

INCREASE OF TREATMENT EFFICIENCY OF COMPLEX STRUCTURE DETAILS BY FLUIDIZED LAYER OF ABRASIVE

The results of research by performance treatment of complex structure details by fluidized layer of abrasive with additional pipelines introduction in machine are presented in the article.

Keywords: treatment, abrasive, additional pipeline.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведено результати теоретико-експериментальних робіт, присвячених розробці і дослідженню прогресивних комбінованих процесів шліфування, що забезпечують сталість процесу обробки важкооброблюваних матеріалів, в тому числі і полікристалічних надтвердих матеріалів на основі алмазу і щільних модифікацій нітриду бору.

Ключові слова: оброблюваний матеріал, комбінований процес шліфування, алмазний круг, робоча поверхня круга, автономна зона, металева зв'язка круга, правлячий катод, ультразвукові коливання, міжелектродний зазор.

Вступ. На даний момент одним з найбільш використовуваних методів формоутворення лезових інструментів та інших виробів з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) залишається шліфування алмазними кругами. Цей метод має широкі технологічні можливості і може бути застосований для обробки практично будь-яких конструкційних та інструментальних матеріалів (від надм'яких до надтвердих [1]). У зв'язку з цим пошук додаткових можливостей для підвищення ефективності цього процесу є актуальною проблемою.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Особливістю процесу алмазного шліфування ПНТМ є відсутність його сталості, оскільки він характеризується періодичністю зміни значень вихідних показників у часі [1, 2], що пов'язано з нестабільністю процесу самозаточування алмазних зерен круга. В першу чергу це обставина негативно позначається на якості обробленої поверхні. Для забезпечення сталості в часі показників якості процесу формоутворення лезових інструментів з ПНТМ необхідно в максимальному ступені реалізувати на практиці умови сталого протікання процесів їх шліфування. У технічній літературі, орієнтованій на технологію машинобудування [3], вже є сформульоване визначення поняття точності та стабільності технологічних процесів і виконана класифікація їх за видами сталості. При цьому сталість техпроцесу пов'язують в першу чергу з точністю механічної обробки, яка, як відомо, є одним з основних об'єктів уваги технолога. Глибокий аналіз точності технологічного процесу можливий тільки на основі статистичного дослідження того розміру, який формується даним технологічним процесом. По сталості технологічні процеси можна розділити [4] на повністю сталі, сталі по розсіюванню і несталі.

Повністю сталі процеси ті, у яких за час виготовлення виробів (велика вибірка) значення числових характеристик розміру деталі (середнього арифметичного \bar{X} і вибіркового середнього квадратичного відхилення S) залишаються незмінними. Процеси, сталі по розсіюванню зберігають постійною тільки характеристику розсіювання \bar{X} , а середнє арифметичне S змінюється. Якщо \bar{X} і S змінюються в часі, то такі процеси називаються несталими. Наведена класифікація технологічних процесів за характером поведінки під час числових характеристик розміру — це класифікація з математичної точки зору [3, 4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Стосовно до формоутворення лезових інструментів з ПНТМ (і особливо на основі алмазу), що мають унікальні фізико-механічні властивості і, в першу чергу найвищу в природі мікротвердість, говорити про повну сталість по точності складно через аномально високе значення лінійного зносу алмазних кругів. Це не дозволяє при роботі на заздалегідь налагоджених верстатах виконати умову $\bar{X} = \text{const}$. Однак на практиці є багато технологічних процесів сталих по розсію-

ванню, у яких центр групування зміщується в процесі обробки в основному за рахунок зносу ріжучого інструменту, але характеристика розсіювання залишається незмінною. Тому мова може йти про сталість по розсіюванню ($S = \text{const}$). Однак стосовно до якості обробки можна говорити і про повну сталість. Класичний підхід в технології машинобудування полягає в тому, що у виробництві не повинно бути несталих технологічних процесів.

Відомо [3, 4], що довести технологічний процес до сталого стану можна, витримавши наступні вимоги: усунувши нестабільність показників точності верстата; отримавши стабільні по точності і фізико-механічним властивостям заготовки; досягнувши стабільності роботи інструменту. Останнє завдання стосовно обробки надтвердих матеріалів до цього часу не вирішено.

Постановка завдання. У даній роботі мова йде про створення умов для забезпечення сталості вихідних показників процесів шліфування, які є основою проєктованих технологічних процесів виготовлення виробів з ПНТМ. З урахуванням того, що один з основних факторів, які забезпечують технологічну сталість, пов'язаний зі стабільністю роботи алмазного круга, ці умови сформульовані наступним чином: створення умов для забезпечення технологічної сталості процесу шліфування ще на етапі спікання алмазоносного шару круга (який супроводжується високими значеннями силовий і теплової напруженості) шляхом збереження його незмінною характеристики; забезпечення високого рівня зносостійкості різального рельєфу алмазного круга; наявність високоефективних способів управління ріжучим рельєфом і профілем алмазних кругів та пристроїв для їх здійснення; використання автоматичної слідкуючої системи для надійного підтримання сталості (у часі) параметрів, що характеризують стан РПК. Таким чином метою представленої роботи є пошук шляхів стабілізації комбінованого процесу шліфування і вирішення на цій основі проблеми формоутворення лезових інструментів та виробів з ПНТМ.

Основний матеріал і результати. Одним з ефективних напрямків підвищення стабільності роботи алмазних зерен є нанесення на них товстошарових рельєфних металевих покриттів [5]. З метою встановлення фізичних особливостей в зонах контакту покритого зерна зі зв'язкою і оброблюваним ПНТМ і виявлення на цій основі можливих резервів процесу шліфування були виконані теоретико-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) системи «зв'язка круга – алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – оброблюваний матеріал» з урахуванням наявності металофази в зерні. Розрахунки показали, що наявність металевих покриттів на алмазному зерні вносить суттєві корективи в НДС цієї системи. Встановлено, що товстошарові рельєфні металеві покриття на алмазних зернах відіграють важливу роль у забезпеченні технологічної сталості. 3D аналіз НДС показав, що їх наявність на алмазному зерні при тих же умовах термосилового навантаження системи істотно зменшує величину напруги на межі «зерно-зв'язка» (рис. 1). Це можна пояснити значним збільшенням поверхні контакту покритого зерна зі зв'язкою круга, що у свою чергу є підтвердженням факту кращого утримання зерен у зв'язці, а, отже, підвищення їх ріжучого ресурсу.

З іншого боку покриття сприяє збереженню цілісності алмазного зерна при спіканні, що в свою чергу є одним з факторів забезпечення стабільності процесу шліфування. Встановлено, що поява площин зносу на вершинах зерен згідно до реалізації явища пристосованості процесу шліфування знижує і згодом практично повністю виключає видалення припуску з ПНТМ [1]. Для забезпечення безперервності процесу самозаточування алмазних зерен в процесі шліфування і високого рівня зносостійкості різального рельєфу алмазного круга необхідно виконати одне з основоположних умов. Воно полягає у забезпеченні безперервного самозаточування круга за умови, що висота вильоту зерен над рівнем зв'язки має мінімально можливе значення. При цьому в контакт з ПНТМ буде знаходитися максимальна кількість алмазних зерен. Іншими словами таким способом можна регулювати величину їх концентрації, а, отже, і зносостійкість різального рельєфу круга. У зв'язку з цим нами запропонована ідея поєднання способів безперервного електрохіміч-

ного видалення зв'язки з робочої поверхні круга (РПК) та ультразвукового впливу на алмазні зерна [6], ефект від якого в умовах високошвидкісної контактної взаємодії двох високотвердих матеріалів проявляється найбільш яскраво. Для забезпечення необхідної відповідності швидкостей зношування різального рельєфу та електрохімічного видалення зв'язки круга, яке можна вважати основоположним у плані практичної реалізації умов, що забезпечують технологічну сталість, необхідно використовувати схему автоматичної підтримки щільності технологічного струму в ланцюзі управління ріжучим рельєфом круга на металевій зв'язці [1]. У той же час ультразвукові коливання дозволяють не тільки виключити утворення на алмазних зернах площин зносу, але і забезпечити безперервне формування на них мікро- і субмікрорельєфу, що в кінцевому підсумку дозволяє забезпечити високу інтенсивність знімання припуску. Таким чином, методологія управління ріжучими властивостями кругів в процесі шліфування повинна базуватися на формуванні і підтримці протягом всього періоду обробки енергетично несталих станів зерен і їх структури шляхом дозованого впливу, спрямованого на запобігання топографічної та структурної пристосованості РПК. Досягти цього простим вибором характеристики кругів та режимів шліфування практично неможливо.

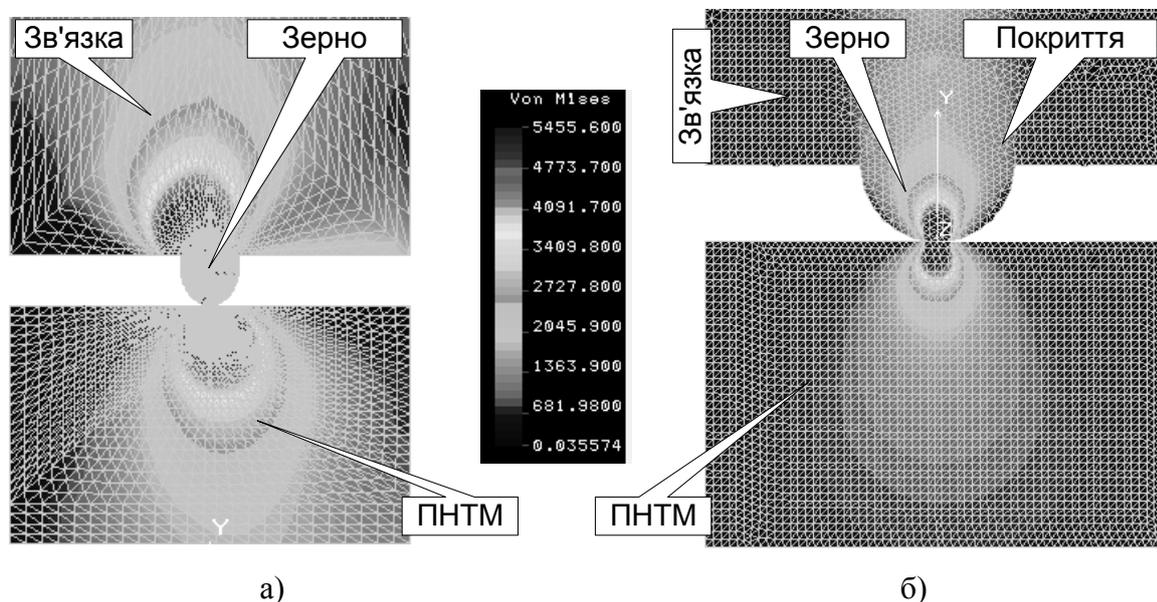


Рис. 1. Візуалізація впливу покриття на 3D НДС в системі:
а) – зерно без покриття; б) – зерно з покриттям на заставі Ni

Примусове формування різального субмікрорельєфа алмазних зерен. Оскільки головною причиною втрати ріжучих властивостей алмазними кругами при шліфуванні ПНТМ є масове утворення на зернах площин зносу, основним способом підвищення ефективності процесу є формування на зернах необхідних параметрів мікро- і субмікрорельєфу. Ідея високої ефективності використання ультразвукових коливань в умовах високошвидкісної контактної взаємодії двох однотвердих тіл (зерен круга і ПНТМ) базується на попередніх дослідженнях [2], у ході яких шліфування виконували з перемінним (з частотою $f < 15$ Гц) тиском в контакт в умовах управління ріжучим рельєфом кругів. Було встановлено, що таких процес шліфування має високі перспективи навіть при низьких (інфразвукових) частотах навантаження, що прикладається. При цьому продуктивність процесу зростає, а значення питомої витрати алмазів і питомої собівартості знижуються в декілька разів. Достатньо позитивні результати були отримані нами навіть при використанні коливань системи «електродвигун приводу головного руху – муфта з пружним елементом – шпиндель верстата – шліфувальний круг» (пат. № 81400, Україна).

Дані експериментів свідчать про те, що в умовах взаємодії двох матеріалів, що мають граничну твердість, саме змінне навантаження на алмазні зерна здатне ефективно забезпечувати безперервність процесу їх самозаточування, що, як зазначалося вище, є важливою умовою стабілізації процесу обробки в цілому. У зв'язку з викладеним було висунуто припущення про те, що в умовах безперервного електрохімічного видалення зв'язки круга найбільш доцільно управляти формуванням субмікрорельєфу на зернах круга за допомогою ультразвукових коливань, які можна реалізувати як у зоні обробки, так і в автономній зоні. У першому випадку в якості ударника виступає сам оброблюваний ПНТМ (рис. 2), а у другому спеціальний інструмент-ударник, наприклад, з міцними і дрібними алмазними зернами.

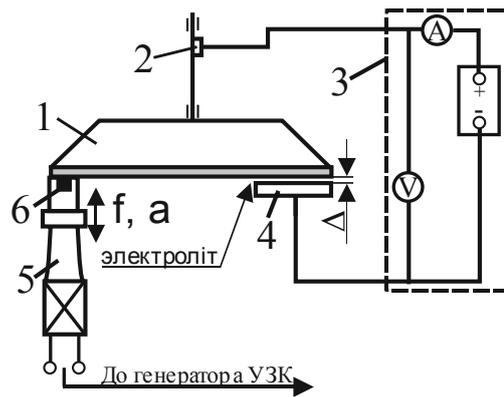


Рис. 2. Схема способу ультразвукового алмазного шліфування з управлінням РПК:
1 – алмазний круг; 2 – струмознімач; 3 – джерело живлення; 4 – правлячий катод; 5 – пристрій ультразвукової правки; 6 – ПНТМ

Нами встановлено, що найбільш ефективним представляється спосіб ультразвукового шліфування з поперечними коливаннями, які створюють додаткові ударні навантаження в контакт «зерно – ПНТМ». Це забезпечує процес формування на поверхнях зносу зерен ріжучого мікро- і субмікрорельєфу, а, отже, інтенсифікує процес знімання припуску. Природно, такий спосіб ефективний тільки в тих випадках, коли додаткова енергія ультразвуку, що надходить до зони шліфування, не буде призводити до утворення дефектного шару в оброблювальному матеріалі. Численні модельні експерименти показали що формування на зернах мікро- та субмікрорельєфу є фактором підвищення як коефіцієнта використання алмазних зерен (тому що алмазне зерно залишається активно працюючим протягом більш тривалого часу), так і продуктивності процесу шліфування ПНТМ в цілому.

Експериментально встановлено, що стосовно до обробки ПНТМ на основі алмазу використання енергії коливань в поєднанні з безперервною електрохімічною правкою круга дозволяє до семи разів підвищити продуктивність шліфування при одночасному зниженні питомої витрати алмазів круга до десяти разів. Це пояснюється тим, що в роботі бере участь гранично можлива кількість зерен круга, а оптимальне значення сили в ланцюзі управління зсувається в більшу сторону (з 55 до 100 А).

Виконані дослідження дозволили розробити автоматичну систему безперервної підтримки різального рельєфу та профілю круга в необхідному стані практично на протязі всього періоду його роботи. Це особливо важливо у випадку застосування складнопрофільних кругів.

Особливістю електрохімічного способу (рис. 3) є те, що в його основу закладено п'ять принципів, спрямованих на досягнення максимально можливої точності профілювання РПК: 1 – застосування струмопровідних алмазних кругів, внаслідок чого забезпечується можливість реалізації малих значень міжелектродного зазору; 2 – використання кругів із заздалегідь сформованим профілем, що дозволяє вважати площу в зоні управління величиною постійною; 3 – забезпечення рівноважного міжелектродного зазору перед початком електрохімічної дії на РПК за рахунок правки (корекції) профілю катода робочим кругом на зворотній полярності; 4 – використання датчика електропровідності ЗОТС (електроліту) для урахування можливого факту зміни електропровідності електроліту в процесі формоутворення РПК; 5 – використання автоматичної слідкуючої системи.

Новизна способу полягає в тому, що перед формоутворенням струмопровідного круга (що вже має заданий точний профіль) включають «зворотну полярність (круг — «—»»,

а катод — «+») джерела живлення 6 і з допомогою цього круга підправляють робочу поверхню катода, попередній профіль якої близький до свого остаточного стану. При цьому режими корегування профілю катода 2, встановленого на напрямних 5, аналогічні робочим режимам правки круга 1. Це дозволяє вирішити два важливі завдання: по-перше, отримати необхідний профіль катода (який розрахунковим методом отримати досить складно) з одночасною компенсацією різного роду похибок (наприклад, похибки установки), а по-друге, забезпечити рівноважний МЕЗ.

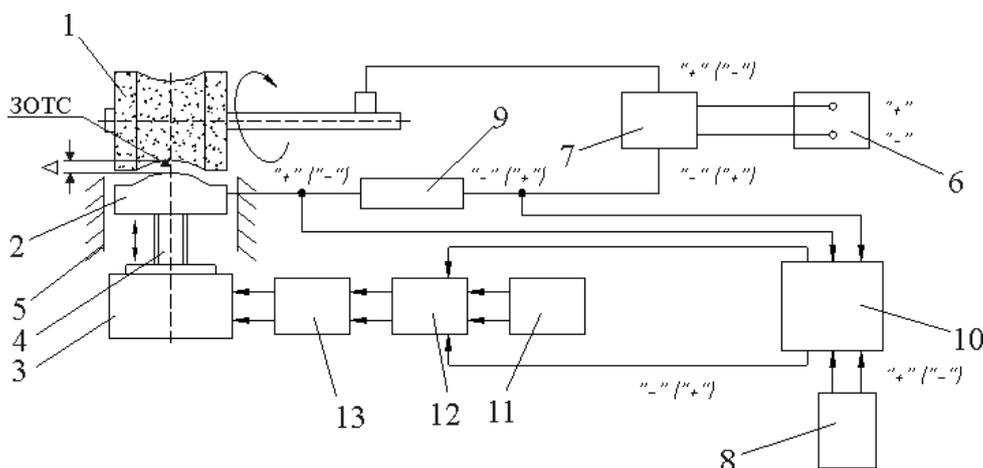


Рис. 3. Принципова схема шліфування ПНТМ з одночасним електрохімічним профілюванням РПК:

- 1 – круг; 2 – катод; 3 – реверсивний електродвигун; 4, 5 – механізм передачі; 6 – джерело живлення; 7 – реверсивний перемикач; 8 – шунт; 10 – джерело стабілізованої напруги; 10 – блок порівняння; 11 – датчик електропровідності електроліту; 12 – суматор; 13 – електронний підсилювач

Потім здійснюють робочий процес правки круга на «прямій» полярності, для чого використовується реверсивний перемикач 7. Особливістю цього способу є те, що, по-перше, у процесі правки катода встановлюється МЕЗ, що має однакову електричну провідність, а, отже, і однакову щільність струму практично в будь-якій його точці. По мірі зносу круга цей зазор підтримується незмінним за допомогою реверсивного електродвигуна 3, керованого блоком автоматики, за допомогою пари «гвинт-гайка», що також не допускає можливості підшліфовки профілю робочої поверхні катода в результаті кругом.

Ще однією важливою особливістю даного способу є те, що в електричну схему введений датчик електропровідності електроліту 11, що дозволяє істотно підвищити надійність процесу. Сигнали від шунта 9 і джерела стабілізованої напруги 8 порівнюються в пристрої 10. Результуючий сигнал надходить до суматора 12, де коригується залежно від величини сигналу з датчика 11. Це продиктовано тим, що як вже зазначалося вище, зі зміною температури електроліту змінюється його електропровідність, а, отже, і щільність технологічного струму. В іншому випадку звичайний блок автоматики відреагує на цей факт зміною величини МЕЗ, що в свою чергу може порушити точність профілю круга. Результуючий сигнал з блоку 12 посилюється підсилювачем 13 і в залежності від полярності цього сигналу, електродвигун обертається в одну або іншу сторону, підтримуючи (по мірі зносу круга і зміни електропровідності електроліту) величину МЕЗ в заданих межах. Практика використання запропонованого способу у виробничих умовах підтвердила його високу ефективність.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження дозволили в значній мірі вирішити проблему обробки важкооброблюваних матеріалів, в тому числі і полікристалічних надтвердих матеріалів на основі алмазу і щільних модифікацій нітриду бору. Надалі представляють інтерес дослідження напружено-деформованого стану системи «ПНТМ – алмазне зерно – зв'язка круга» в умовах накладення ультразвукових коливань з метою встановлення на цій основі оптимальних режимів шліфування.

Література

1. Грабченко, А.И. *Расширение технологических возможностей алмазного шлифования [Текст] / А.И. Грабченко.* – Х: Вища шк., 1985. – 184 с.
2. Грабченко, А.И. *Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ [Текст] / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, Д.М. Алексеенко // Вісник Сумського держ. ун-ту. Серія «Технічні науки».* – 2011. – Т. 1. – № 1. – С. 105–116.
3. Гаврилов, А.Н. *Точность производства в машиностроении и приборостроении [Текст] / А.Н. Гаврилов, Н.А. Бородачев, Р.М. Абдрашитов и др.; под ред. А.Н. Гаврилова.* – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
4. Сизый, Ю.А. *Основы научных исследований в технологии машиностроения [Текст]: учеб. пособие / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский.* – Х: УкрГНТЦ «Енергосталь», САГА, – 2007. – 212 с.
5. Грабченко, А.И. *Особенности использования микропорошков алмаза в кругах на металлических связках [Текст] / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, И.Н. Пыжов, В.А. Федорович // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. / Донбаська держ. машинобудівна акад. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 27. – С. 3–11.*
6. Кумабэ, Д. *Вибрационное резание [Текст]: пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова.* – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

© В.О. Федорович, І.М. Пижов, Є.О. Бабенко, В.Г. Клименко

В.А. Федорович, д.т.н., проф., И.Н. Пыжов, д.т.н., проф., Е.А. Бабенко, асп.

Национальный технический университет «ХПИ»

В.Г. Клименко, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты теоретико-экспериментальных работ, посвященных разработке и исследованию прогрессивных комбинированных процессов шлифования, обеспечивающих устойчивость процесса обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе и поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора.

Ключевые слова: *обрабатываемый материал, комбинированный процесс шлифования, алмазный круг, рабочая поверхность круга, автономная зона, металлическая связка круга, правящий катод, ультразвуковые колебания, межэлектродный зазор.*

V.A. Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, I.N. Pyzhov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ye.A. Babenko, Post-graduate

National Technical University «Kharkyv Polytechnic Institute»

V.G. Klimenko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

DIAMOND GRINDING POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIALS

Presents the results of theoretical and experimental works devoted to the development and research of progressive combined sanding process, to ensure the stability of the processing of composite materials, including polycrystalline superhard materials based on diamond and dense modifications boron nitride.

Keywords: *the processed material combined the process of grinding, diamond circle, the working surface of the circle, Autonomous zone, metal bunch round, the ruling cathode, ultrasonic vibrations, spark plug gap.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕПІЦИКЛОЇДАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ЗАДАНОГО РУХУ РОБОЧОГО ОРГАНА

Здійснено дослідження і розрахунок цівкової передачі у машині, що відрізняється від існуючих аналогів наявністю цівкової передачі. Математично визначена лінія зачеплення, геометричне місце точок, рівняння профілю зубців зірочки, кут повороту цівкового колеса від початку до кінця зачеплення, а також коефіцієнт торцевого перекриття. Використовуючи результати дослідження, здійснено виготовлення епіциклоїдального профілю зірочки.

Ключові слова: цівкова передача, зірочка, епіциклоїда, коефіцієнт торцевого перекриття, еквідистанта.

Постановка проблеми. Український ринок обладнання засобів малої механізації знаходиться на етапі формування. Наявність на ньому продукції високої вартості ведучих європейських виробників негативно відбивається на розвитку вітчизняного виробника. Використання сучасного вітчизняного обладнання дозволило б значно знизити витрати, капітального ремонту та реконструкції, при забезпеченні високої якості виконаних робіт.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. При незначних обсягах будівництва та механізації опоряджувальних робіт ефективним є використання засобів малої механізації [1–6]. До них можна віднести розчинозмішувачі, штукатурні установки та агрегати, штукатурно-затирочні машини. Бажаним є застосування розчинозмішувальних установок у порівнянні зі звичайними розчинозмішувачами, тому що перші, окрім безпосереднього приготування штукатурного розчину на робочому місці, виконують його транспортування до місця укладки, а також нанесення на поверхню шляхом безкомпресорного соплування.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Існуючі конструкції циклічних горизонтальних розчинозмішувачів стрічково-шнекового типу із примусовим змішуванням в загальному випадку не мають конструктивних відмінностей. Обертний момент від електродвигуна передається на вал змішувача за допомогою редуктора та передачі з гнучким зв'язком (пасова передача) або без неї (через муфту). Вихідний вал редуктора у свою чергу з'єднується із валом змішувача за допомогою муфти [7, 8]. Недоліком існуючих конструкцій є те, що кінці вала з підшипниковими вузлами розташовуються за межами бункера, ущільнення в торцевих стінках бункера змішувача, з часом втрачають свої властивості. Наслідком цього є розгерметизація і витікання будівельного розчину.

Постановка завдання. Основною метою даної роботи є усунення вищезазначених недоліків. Кінці вала не повинні виходити за межі торцевих стінок бункера. Вони повинні спиратись на конічні підшипники ковзання, що регулюються. Ці підшипники необхідно розташовувати із внутрішньої сторони стінки бункера. Це стало можливим завдяки застосуванню у приводі шнекового змішувача розчинозмішувальної установки конструкції ПолтНТУ [9] цівкової передачі, що є частиною робочого органу і працює безпосередньо в робочому середовищі. Передача складається із цівкового колеса та зірочки. Зубці зірочки мають невольєвентний профіль [10]. Отже, перед нами була поставлена задача стосовно дослідження, визначення цього профілю, а також розрахунку геометричних параметрів передачі для подальшої практичної реалізації.

Основний матеріал і результати. Цівкове зачеплення (рис. 1) є різновидом циклоїдального. Додатковою центроїдою для утворення по Камусу циклічного профілю, слугує центроїда одного з коліс передачі – коло радіуса r_1 (рис. 2). При перекочуванні кола радіуса r_1 по колу радіуса r_2 утворюються дві гілки епіциклоїди: Pa і $P\beta$. Таким чином, за про-

філі зубців коліс можна прийняти: а) точку P , пов'язану з колесом 1; б) криві $P\alpha$ і $P\beta$, пов'язані з колесом 2 [10].

Для реального використання замість таких профілів необхідно використовувати еквідистантні їм: а) коло радіуса $r_{\text{ц}}$; б) криві $d-d$ і $d-d'$, еквідистантні відповідним гілкам епіциклоїди.

При теоретичних профілях лінією зачеплення є дуга кола радіуса r_1 . При вказаних на рис. 2 напрямках обертання коліс і ведучій ланці – колесі 1 – робочою ділянкою лінії зачеплення буде слугувати дуга Pe .

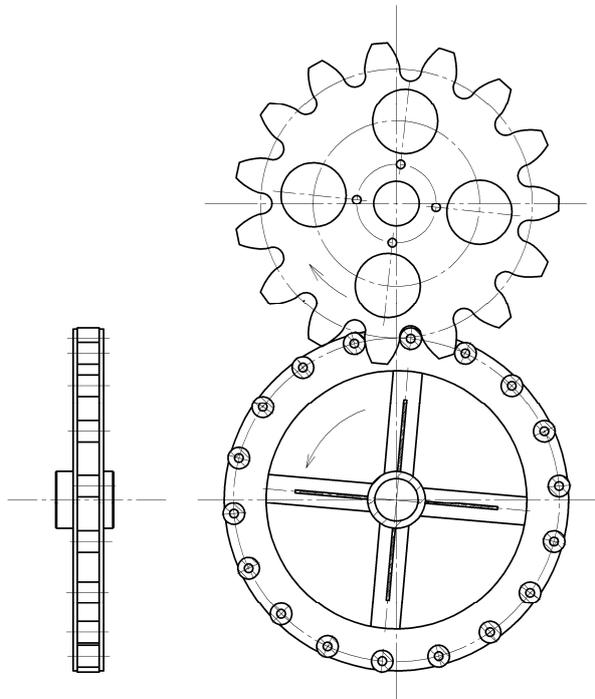


Рис. 1. Загальний вигляд цівкового зачеплення

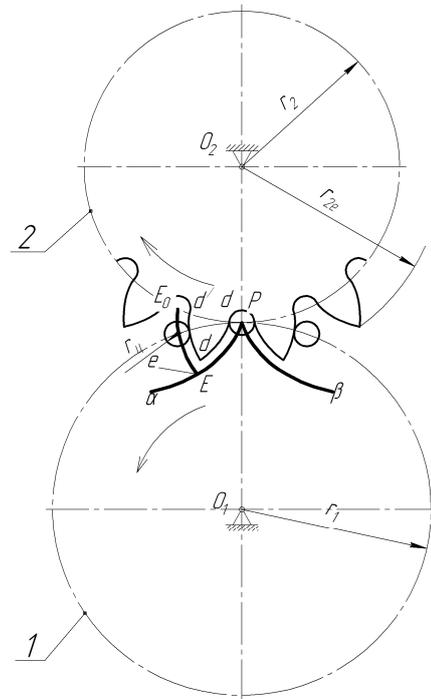


Рис. 2. Утворення цівкового зачеплення

При профілях, що еквідистантні теоретичним, лінією зачеплення слугує крива PM (рис. 3), що може бути знайдена, виходячи із наступних міркувань: нехай колесо 1 з цівкою повернулось на кут φ_1 і центр цівки з положення P перемістився у P' . Цівка увійде в співдотик зі спряженим профілем такою точкою, котра лежить на профільній нормалі.

У теоретичних профілів, оскільки одним із них є епіциклоїда, нормаллю до профілів при співдотикі їх в P' слугує хорда PP' . У реальних профілів (еквідистантні теоретичним) нормаль у точці їх співдотикі та сама, що й у теоретичних. З цього виходить, що контактною точкою є точка M .

Визначимо математично лінію зачеплення PM . В нерухомій системі координат x, y (рис. 3) лінія зачеплення визначиться рівнянням (1).

$$x = PM \cos \alpha = (PP' - r_{\text{ц}}) \cos \alpha; \quad y = PM \sin \alpha = (PP' - r_{\text{ц}}) \sin \alpha. \quad (1)$$

Але $PP' = 2r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2}$, $\alpha = \frac{\varphi_1}{2}$.

Отже маємо, що

$$\begin{aligned} x &= \left(2r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} - r_{\text{ц}} \right) \cos \frac{\varphi_1}{2}, \\ y &= \left(2r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} - r_{\text{ц}} \right) \sin \frac{\varphi_1}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

При нарізанні зубців колеса 2 методом обкатки необхідно визначити профіль вихідного контуру. Нехай цівкове колесо повернулось на кут φ_1 , а колесо 2 повернулось на кут φ_2 . Вихідний контур (рейка), з яким пов'язана система координат x_p, y_p , займе положення, яке зображено на рис. 3. Профілі зубців цівкового колеса, колеса 2 і рейки будуть дотикатися у точці M . Профілі зубців вихідного контуру, як геометричне місце точок M , визначиться рівняннями

$$\left. \begin{aligned} x_p &= \left(2r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} - r_{\text{ц}} \right) \cos \frac{\varphi_1}{2} - r_1 \varphi_1, \\ y_p &= \left(2r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} - r_{\text{ц}} \right) \sin \frac{\varphi_1}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При $r_{\text{ц}} = 0$ профіль зубців рейки являтиме собою циклоїду.

Рівняння профілю зубців колеса 2 можна отримати, якщо записати рівняння лінії зачеплення в системі координат x_2, y_2 (рис. 3), що зв'язана з цим колесом.

Матриця, що виражає перехід від координат x, y до координат x_2, y_2

$$M_{20} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & -r_2 \sin \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & r_2 \cos \varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

Перехід від системи S до S_2 визначається матричним рівнянням

$$r_2 = M_{20} r.$$

У координатній формі

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x \cos \varphi_2 - y \sin \varphi_2 - r_2 \sin \varphi_2, \\ y_2 &= x \sin \varphi_2 + y \cos \varphi_2 + r_2 \cos \varphi_2, \\ t_2 &= t = 1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Використовуючи вирази (2), після перетворень отримаємо

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= r_1 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - (r_1 + r_2) \sin \varphi_2 - r_{\text{ц}} \cos \left(\frac{\varphi_1}{2} + \varphi_2 \right), \\ y_2 &= -r_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + (r_1 + r_2) \cos \varphi_2 - r_{\text{ц}} \sin \left(\frac{\varphi_1}{2} + \varphi_2 \right), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де $\varphi_2 = \varphi_1 i_{21}$. При $r_{\text{ц}} = 0$ рівняння (6) являє собою звичайну епіциклоїду.

Визначимо коефіцієнт перекриття цівкового зачеплення. Позначимо радіус кола виступів колеса 2 через r_{2e} (рис. 2), а кут повороту цівкового колеса, що відповідає кінцю зачеплення, через φ_{1e} . Нехай x_e, y_e – координати крайньої точки лінії зачеплення при $\varphi_1 = \varphi_{1e}$.

Тоді, враховуючи (5)

$$r_{2e}^2 = (r_2 + y_e)^2 + x_e^2.$$

Використовуючи рівняння (2) після перетворення отримаємо

$$\sin^2 \frac{\varphi_{1e}}{2} - \frac{r_{\text{ц}}(r_2 + 2r_1)}{2r_1(r_2 + r_1)} \sin \frac{\varphi_{1e}}{2} + \frac{r_2^2 + r_{\text{ц}}^2 - r_{2e}^2}{4r_1(r_1 + r_2)} = 0. \quad (7)$$

З рівняння (7) знаходимо φ_{1e} – кут повороту колеса з цівками від початку до кінця зачеплення, знаючи, що радіус цівки $r_{\text{ц}} = 15$ мм, радіус ділильного кола цівкового колеса $r_1 = 225$ мм, радіус ділильного кола зірочки $r_2 = 187,5$ мм, радіус кола виступів зірочки $r_{2e} = 224$ мм.

Маємо, що $\varphi_{1e} = 26^\circ$.

Коефіцієнт перекриття знаходимо за формулою

$$\varepsilon = \frac{\varphi_{1e} \cdot z_1}{2\pi}, \quad (8)$$

де $z_1 = 18$ – кількість цівок. Отже, $\varepsilon = 1,3 > 1$.

Результати розрахунку геометричних параметрів конкретного цівкового зачеплення, якщо ведуче колесо – зірочка (рис. 4), а ведене колесо – цівкове, наступні: дільний діаметр кола ведучого колеса (зірочка), d_1 , мм – 375 мм; дільний діаметр кола веденого колеса з цівками, d_2 , мм – 450 мм; міжосьова відстань, A_w , мм – 412,5 мм; модуль зачеплення, m , мм – 25; коловий крок, t , мм – 78,5; кількість зубців ведучого колеса, Z_1 – 15; кількість цівок веденого колеса, Z_2 – 18; діаметр цівок, $d_{ц}$, мм – 30; зовнішній діаметр веденого колеса з цівками, d_2^a , мм – 480.

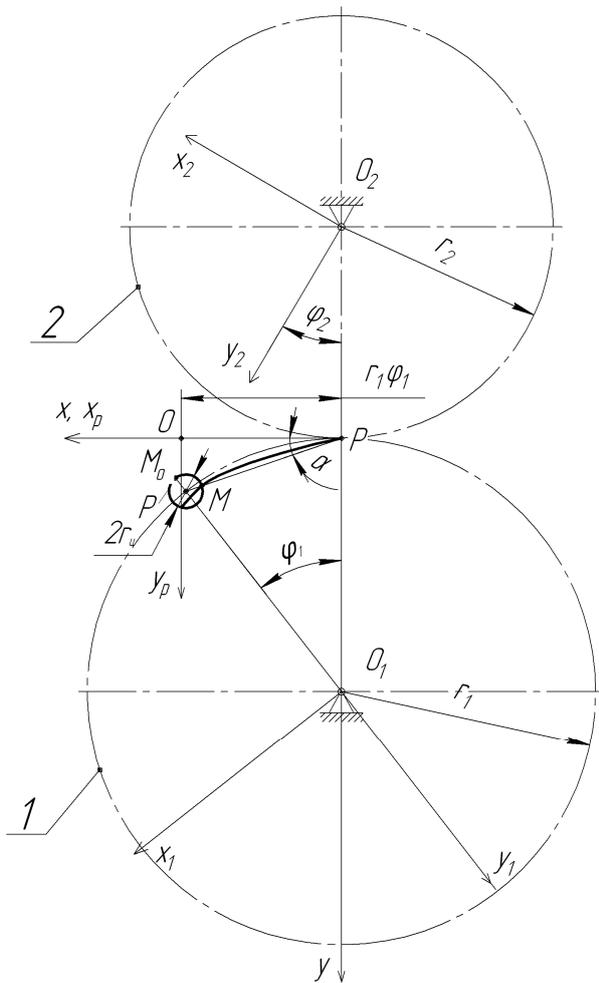


Рис. 3. Визначення лінії зачеплення PM



Рис. 4. Зірочка цівкової передачі, отримана за результатами досліджень

Висновки. За результатами проведеного дослідження визначено дійсний епіциклоїдальний профіль зірочки цівкової передачі, коефіцієнт торцевого перекриття та інші характеристики. Вони свідчать про повну працездатність та плавність робочого процесу даного виду зачеплення. Розроблено технічне креслення із координатами робочого профілю, виготовлено передачу, яка успішно працює у складі розчинозмішувальної установки тривалий час.

Література

1. Баладінський, В.Л. Будівельна техніка [Текст] / В.Л. Баладінський, І.І. Назаренко, О.Г. Онищенко. – К.-П.: КНУБА-ПНТУ, 2002. – 463 с.

2. Сухачев, В.П. Средства малой механизации для производства строительно-монтажных работ [Текст] / В.П. Сухачев, Р.А. Каграманов. – М.: Стройиздат, 1989. – 384 с.
3. Волков, Д.П. Строительные машины и средства малой механизации [Текст] / Д.П. Волков, В.Я. Крикун. – М.: Изд-во «Академия», 2002. – 480 с.
4. Popov, S. The designing of crank mechanism of piston pump [Text] / S. Popov, A. Vasilyev, S. Rymar // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – № 1/7 (61). – P. 30–32.
5. Kalpakjian, S. Manufacturing engineering and technology [Text] / S. Kalpakjian. – Canada-USA: Addison-Wesley Publishing Company, 2006. – 1320 p.
6. Добронравов, С.С. Строительные машины и основы автоматизации [Текст] / С.С. Добронравов, В.Г. Дронов. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.
7. Сівко, В.Й. Механічне устаткування підприємств будівельних виробів [Текст]: підручник / В.Й. Сівко. – К.: ІСДО, 1994. – 359 с.
8. Парфенов, Е.П. Опыт механизации строительно-отделочных работ в современных условиях [Текст] / Е.П. Парфенов, В.А. Украинцев, В.Ф. Попов // Механизация строительства. – 2003. – № 2. – С. 5–7.
9. Онищенко, О.Г. Розчинозмішувальна установка УРЗ-04 [Текст] / О.Г. Онищенко, С.В. Попов, В.У. Уст'янець // Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПНТУ. – 2005. – С. 3–7.
10. Литвин, Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений [Текст] / Ф.Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 585 с.

© С.В. Попов, А.В. Васильев

С.В. Попов, к.т.н., доц., А.В. Васильев, к.т.н., доц.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПИЦИКЛОИДАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ЗАДАННОГО ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Проведено исследование и расчет цевочной передачи в машине, отличающейся от существующих аналогов наличием цевочной передачи. Математически определена линия зацепления, геометрическое место точек, уравнение профиля зубьев звездочки, угол поворота цевочного колеса от начала до конца зацепления, а также коэффициент перекрытия. Используя конечные результаты исследования, проведено изготовление эпициклоидального профиля звездочки.

Ключевые слова: цевочная передача, звездочка, растворосмеситель, эпициклоида, коэффициент торцевого перекрытия, эквидистанта.

S.V. Popov, Ph.D., Associate Professor, A.V. Vasilyev, Ph.D., Associate Professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

THE RESEARCH OF PIN GEAR EPICYCLOIDAL TYPE FOR LABOUR BODY PRESCRIBED MOTION

The authors pay attention to research and calculation of pin gear in machine, different from existing anagoges is conducted by existence of pin gear. The gearing contact line, geometrical place of points, the equation of a profile of teethes of an asterisk, angle of rotation of a lantern wheel from beginning to end gearings, and also overlapping coefficient are defined mathematically. Using the end results of research, production of an epicycloidal profile of an asterisk is carried out.

Keywords: pin gear, asterisk, epicycloid, overlapping coefficient, equidistant curve.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИВЧЕННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуто досвід впровадження автоматизованого навчання із дисциплін, насичених інженерною графікою. Це дає можливість значно покращити сприйняття та засвоєння матеріалу, звільнити викладача на практичних заняттях від постійних пояснень щодо виконуваних робіт і забезпечити комфортну індивідуальну роботу студентів. Запропоновано інструменти для створення та автоматичної перевірки правильності побудови двомірних графічних завдань в системі КОМПАС-3D.

Ключові слова: освіта, автоматизоване навчання, інженерна графіка, програмний продукт, автоматизоване проектування.

Постановка проблеми. В Україні одним із стратегічних напрямів розвитку освіти є підвищення її якості на інноваційній основі [1]. Широкого застосування у навчальному процесі набули професійні системи. Різноманітні програмні продукти використовуються під час викладання більшості дисциплін. Але професійні пакети не розв'язують основних задач підтримки навчального процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Системи автоматизованого проектування (САПР) та промислова автоматизація все більше привертають до себе увагу ІТ-спеціалістів. І це не випадково. Автоматизовані системи, які використовуються у машинобудуванні, базуються на найскладніших програмно-методичних комплексах та потужних технічних засобах. Машинобудівні системи автоматизованого проектування та технологічної підготовки виробництва (САПР, САПР-ТП) відрізняються великим розмаїттям та складністю інформаційних потоків, програм, алгоритмів та комп'ютерних моделей [2].

Сучасна концепція автоматизації проектування та виробництва передбачає наскрізне впровадження нових промислових стандартів, заснованих на комплексному використанні комп'ютерного моделювання. Застосування електронних моделей забезпечує не лише суттєве прискорення процесів розроблення нової продукції, але й істотне підвищення їх якості за рахунок зменшення помилок та збільшення точності розрахунків. Багатократно пришвидшується модифікація виробів та внесення змін до процесів конструкторського проектування та технологічної підготовки виробництва.

Таким чином, розвиток та підвищення ефективності промислового виробництва напряму пов'язане із впровадженням нових інформаційних технологій, яке стримується, перед усім, відсутністю кваліфікованих спеціалістів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Досвід роботи та співпраці із промисловими підприємствами, регулярне анкетування та дослідження запитів підприємств дозволяють стверджувати, що на даний час однією із основних вимог, яку висувують до молодих спеціалістів на виробничих підприємствах, в конструкторських та технологічних бюро, є наявність знань та практичного досвіду застосування комп'ютерних технологій в інженерній діяльності. Сучасний інженер, затребуваний в конкурентних умовах ринкової економіки, це, перед усім, всебічно освічений спеціаліст, професійна підготовка якого орієнтується не лише на досягнення минулого, а скоріше на запити майбутнього. Він має бути готовим практично використовувати вивчені у ВНЗ комп'ютерні інновації та посісти гідне його освіті та умінням місце в галузі високих технологій.

Для організації результативного навчального процесу із засвоєння комп'ютерних технологій необхідно мати не лише найсучасніші програми та технічні засоби промислового призначення, але й відповідне їх рівню методичне забезпечення. Сучасне методичне

забезпечення навчального процесу охоплює усі традиційні форми та виявляє нові можливості та напрями: дистанційна освіта, навчання певних соціальних груп населення, підвищення кваліфікації, самостійне навчання і т. п. Але демонстраційні програми не забезпечують достатньої ефективності освіти. Для забезпечення ефективності навчального процесу потрібно використовувати автоматизований навчально-методичний комплекс, який буде принципово відрізнятися від підручників та задачників. Однією із таких відмінностей буде можливість забезпечення інтерактивності та діалогу із студентом.

Автори пропонують використовувати спеціально підготовлені експертами матеріали для проведення практичних занять та самоосвіти із можливістю автоматичного контролю правильності виконання (на прикладі однієї із частин курсу «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка»).

Постановка завдання. Проаналізувати сучасний стан викладання навчального матеріалу під час проведення практичних занять із дисциплін, насичених інженерною графікою, запропонувати методи його автоматизації. Навести приклад застосування цієї технології для конкретних інженерних дисциплін, зокрема курсу «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка».

Основний матеріал і результати. Графічна підготовка є одним із головних чинників, що формує професіоналізм фахівця — інженера, конструктора, технолога. Тому, для вдосконалення професійної підготовки фахівців, необхідно, з одного боку, проаналізувати існуючий стан графічної підготовки у технічних навчальних закладах, виявити причини недоліків, з іншого — визначити та застосувати ефективні шляхи їх усунення [3].

До організаційних форм навчання, які одночасно є способами безперервного управління пізнавальною діяльністю студентів, відносять: лекції, лабораторні роботи, практикуми, самостійну роботу та інші види занять. Серед перерахованих форм роботи у ВНЗ найважливіша роль відводиться лекції, яка вважається найскладнішим видом роботи і тому доручається більш кваліфікованим і досвідченим викладачам, як правило професорам і доцентам. В рамках модульно-рейтингових технологій практичні заняття відіграють подвійну роль. З одного боку вони сприяють поглибленню та формуванню необхідних навичок — фактичного застосування отриманих теоретичних знань. З іншого — реалізують поточний контроль цих навичок та якості засвоєння студентами лекційного та практичного матеріалу, визначеного планом навчального процесу як до аудиторного, так і до самостійного вивчення. Не дивлячись на важливість практичних занять, вони доручаються менш кваліфікованим викладачам, в результаті чого, в першу чергу, страждає контролююча складова, а подекуди, й неправильно формуються навички студентів.

Сучасну графічну підготовку у вищих навчальних закладах України можна охарактеризувати наступними рисами: низький рівень підготовки випускників інженерних спеціальностей із технічного креслення та інженерної графіки; недостатній рівень володіння інструментами автоматизації проектування — пакетами CAD/CAM/CAE; відсутність практичних навичок із створення інженерної документації; зменшення аудиторного навантаження під час вивчення фундаментальних інженерних дисциплін; домінування теоретичного матеріалу у навчальних курсах вищої школи, що неприпустимо для інженерно-конструкторських спеціальностей; відсутня сконцентрованість на об'єктах вивчення під час виконання практичних завдань; недостатній контроль процесу виконання графічних завдань.

Автори пропонують наступний шлях усунення вище перелічених недоліків: використання на початкових практичних заняттях інноваційних електронних робочих зошитів, які, окрім завдань та контрольних запитань, містять демонстраційний матеріал щодо правильного виконання та функції перевірки результатів.

Робочі зошити давно й широко відомі викладачам та студентам. Ці посібники періодично розробляються із окремих предметів, використовуються на заняттях, а потім зникають на довгий час. Їх переваги незаперечні: системний підбір завдань, які поступово ускладнюються; економія часу студента за рахунок виконання роботи безпосередньо

із певного контенту; можливість вирішення більшої кількості завдань. У сучасному світі, який намагається використовувати безпаперову технологію, робочий зошит має змінитись, поєднавши в собі всі свої переваги та сучасні інновації.

Робочий зошит — посібник із друкованою основою для роботи безпосередньо на заготовках, наведених у ньому; застосовується переважно на початкових етапах вивчення теми із метою збільшення об'єму практичної діяльності та різноманіття змісту, форм роботи, а також видів діяльності студентів [4].

Розглянемо структуру робочого зошиту [5]: 1) вступ, пояснює звернення до студентів; 2) змістове наповнення для переходу (навігації) студентів від теми до теми; 3) система запитань та завдань у визначеному порядку, від розв'язання простих питань до більш складних завдань; 4) навчаючі ілюстрації, малюнки, схеми; 5) місце для відповідей студентів; 6) серія контрольних запитань до теми, розділу, предмету; 7) глосарій термінів; 8) висновок, бібліографія.

Як бачимо, перешкоди для створення електронного робочого зошиту відсутні, а перевагами виступають як економія на друкуванні твердих копій, так і легкість поширення матеріалів серед студентів.

В якості прикладу наведемо розроблений електронний робочий зошит із розділу «Креслення у системі КОМПАС-3D» дисципліни «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка». Посібник розроблено у текстовому редакторі із застосуванням гіперпосилань на файли завдань та збережено у pdf-форматі. В даному випадку завдання передбачається виконувати послідовно переходячи від завдання до завдання, від теми до теми. Праворуч розміщені гіперпосилання, які відкривають відповідні до теми файли завдань та пояснень. Для деяких дисциплін така послідовність не є доцільною. Тому можна використовувати схеми-графи для структурування навчального контенту із можливістю зображення суттєвих зв'язків між складовими частинами [6]. В такому випадку також зручно додавати гіперпосилання на файли завдань.

Окремо слід зупинитись на завданнях для дисциплін, насичених інженерною графікою. Як уже зазначалось, у якості інструменту сучасні інженери використовують системи автоматизованого проектування, тому незаперечним буде бажання створювати та виконувати завдання саме в них, адже навички студентів будуть набуватись із використанням інструменту, з яким вони надалі будуть працювати. Автори в якості інструменту пропонують використовувати систему КОМПАС-3D.

Файли-завдання (рис. 1) із вивчення інструментів системи виконані у фрагментах — одному із видів графічних документів системи. Вгорі наводиться текстова частина завдання, у якій пояснюється що саме треба зробити у завданні. Нижче і ліворуч показано Зразок, на якому зображено те, що слід отримати в результаті виконання завдання. Поруч із зразком розташовується місце для виконання завдання, на якому студент повинен здійснити необхідні побудови. У лівому нижньому куті у зв'язку із тим, що система КОМПАС-3D є російськомовною було прийнято рішення наводити підказки щодо інструментів, якими слід користуватись під час виконання роботи. Цей аспект є доволі індивідуальним, тому його наявність не є обов'язковою, але досвід переконує у його необхідності.

За будовою файли-завдання складаються із двох прошарків: у першому (заблокованому) наводяться текстова інформація, зразок, підказка та елементи, які не впливають на процес побудови; у другому прошарку (активному) встановлюються елементи, необхідні для побудов. Досвід показав, що графічне зображення зразку в неактивному прошаркові з метою запобігання копіювання студентами елементів із нього до активного прошарку краще поміщати у форматі рисунку (*.jpeg, *.gif тощо). Який саме графічний формат обирати — залежить від зображення (кольоровість, насиченість та ін.).

Мультимедійні технології в освітньому процесі забезпечують більш просту передачу інформації. Використання відео-роликів підвищує якість сприйняття навчального матеріалу, спонукає до самостійного виконання завдань, що безперечно впливає на засвоєння мате-

ріалу. Інтерактивні можливості відео-роликів суттєво розширюють переваги даної методики навчання.

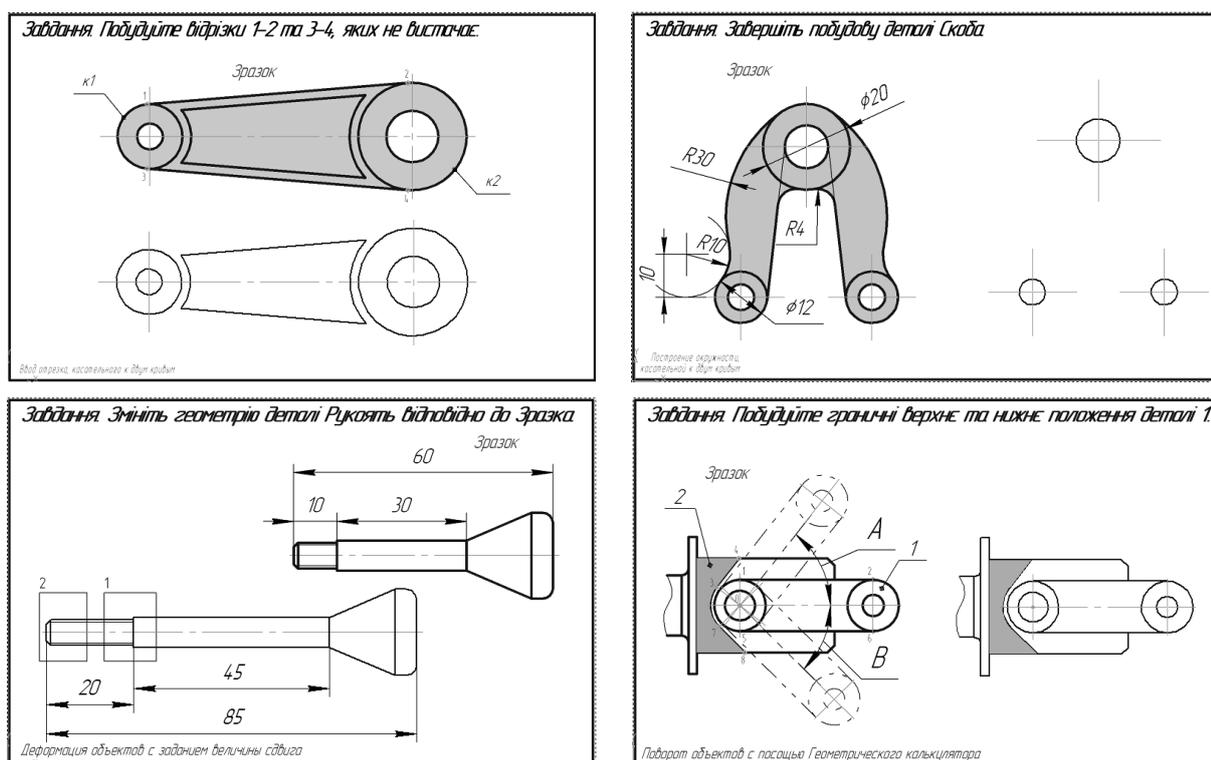


Рис. 1. Приклади файлів завдань із створення та редагування плоских моделей, виконаних у фрагментах КОМПАС-3D

У електронному робочому зошиті, який ми розглядаємо, мультимедійні технології використані для забезпечення демонстрації правильного виконання завдань. В якості інструменту створення відео-роликів використано програму uvScreenCamera, яка вільно розповсюджується в мережі. За її допомогою відзнято зображення з екрану із послідовністю виконання дій, ніби викладач показує як слід виконувати дане завдання, а потім пропонує студенту повторити побачене. Файли-пояснення в форматі *.exe мають вбудований плеєр, який дозволяє відтворювати відео на будь-якому комп'ютері без попереднього встановлення програмного забезпечення. Файли мають досить простий інтерфейс, подібний до звичайного плеєра. Із елементів управління слід окремо відмітити регулятор швидкості відтворення, за допомогою якого кожен студент може обрати для себе комфортну швидкість перегляду матеріалу.

Поточний контроль — важлива складова навчального процесу. Існує велика кількість різних методик контролю, але в нашому випадку доцільним є контроль правильності виконання завдань в електронному зошиті із автоматизацією підрахунку набраних балів. На даний час реалізація контролю виконується за допомогою спеціального файлу (бібліотека КОМПАС-3D, розроблена за допомогою АРІ КОМПАС) шляхом точного порівняння файлу, отриманого від студента із файлом-еталоном, підготовленим викладачем. Такий спосіб перевірки накладає певні обмеження на завдання: не можна допускати варіативності правильних відповідей. Будь-який зайвий графічний елемент, який не буде помилкою з точки зору правильності виконання завдання, буде розцінений програмою як помилка. Цей факт спричиняє необхідність чітко формалізувати завдання, що, безперечно, відкидає можливість використання цього методу у деяких дисциплінах. Але, з огляду на завдання, які використовуються у наведеному зошиті, інструмент для перевірки правильності виконання завдань дозволяє частково звільнити викладача від функцій контролю та підрахунку набраних балів студентами.

Висновки. Представлена авторами технологія автоматизації навчального процесу під час проведення практичних занять із дисциплін, насичених графікою, дозволяє: під-

вищити якість навчання за рахунок ефективного представлення матеріалу; забезпечити особистісний підхід до кожного студента у процесі викладання та вивчення дисциплін; підвищити швидкість сприйняття інформації; оптимізувати організацію занять; підвищити рівень знань та практичних навичок студентів; якісно сприяти пізнавальній самостійності кожного студента; урізноманітнити форми контролю за навчальною діяльністю та якістю знань студентів; підвищити ефективність навчального процесу.

Література

1. Проект Національної стратегії розвитку освіти в Україні на 2012-2021 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mon.gov.ua/index.php/ua/zvyazki-z-gromadskisty-ta-zmi/gromadske-obgovorennya/4710> – 13.08.2012.
2. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) [Текст] / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
3. Джеджула, О.М. Теорія і методика графічної підготовки студентів інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів: автореф. дис. ... д-ра пед. наук: 13.00.04 / О.М. Джеджула; Терноп. нац. пед. ун-т ім. В. Гнатюка. – Тернопіль, 2007. – 42 с.
4. Аксенова, О.В. Рабочая тетрадь по информатике для первого класса. На правах рукописи [Текст] / О.В. Аксенова. – Барнаул. – 1997-1998. – 65 с.
5. Педагогика [Текст]: учеб. пособие для студ. пед. вузов и пед. колледжей / Под ред. П.И. Пидкасистого. – М.: Педагогическое общество России, 1998. – 640 с.
6. Черніков, О.В. Задачі та особливості викладання графічних дисциплін в сучасних умовах [Текст] / О.В. Черніков // Інноваційні аспекти геометро-графічної освіти: матеріали Всеукраїнської науково-метод. конф., м. Севастополь, 7-10 трав. 2012 р. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 9–14.

© Г.С. Зінов'єв, І.В. Хоменко

Г.С. Зінов'єв, к.т.н., доц., І.В. Хоменко, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗУЧЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрен опыт внедрения автоматизированного обучения дисциплинам, которые насыщены инженерной графикой. Это дает возможность существенно улучшить восприятие и усваивание материала, а также освободит преподавателя на практических занятиях от постоянных разъяснений относительно выполняемых работ и обеспечит комфортную индивидуальную работу студентов. Предложены инструменты для создания и автоматической проверки правильности построения двумерных графических заданий в системе КОМПАС-3D.

Ключевые слова: образование, автоматизированное обучение, инженерная графика, программный продукт, автоматизированное проектирование.

G.S. Zinovyev, Ph.D., Associate Professor, I.V. Khomenko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

AUTOMATIZATION PROCESS OF STUDY GEOMETRIC DESIGN TOOLS

In the article describes the experience of implementing automated training disciplines, saturated engineering graphics, which allow significantly improve perception and learning, and release a teacher in practical lessons of permanent explanations by tutorial and provide a pleasant individual self-study. Also proposed a toolkit for creating and automatically verify the construction of graphic tasks in the system KOMPAS-3D.

Keywords: education, computer-aided instruction, engineering graphic, software, computer-aided design.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ГИБКЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК С ЛОКАЛИЗОВАННЫМ ОЧАГОМ ДЕФОРМАЦИИ

В статье приведены результаты исследований течения материалов при гибке листовых заготовок с локализованным очагом деформации. Получены аналитические зависимости характера деформирования, что позволило управлять технологическим процессом. Установлены параметры основных факторов влияния на процесс формообразования конических пространственных заготовок методом гибки.

Ключевые слова: гибка, диффузор, локальная деформация, конический пуансон.

Введение. Традиционно одним из наиболее распространенных способов изготовления заготовок из листового проката является холодная листовая штамповка. Среди прочих методов пластического деформирования наиболее высокую точность и эффективность обеспечивают процессы с локализованным очагом деформации. К преимуществам данных процессов следует отнести локальный характер приложения нагрузки, что приводит к снижению, как общей силы деформирования, так и контактных напряжений, действующих на инструмент. Это приводит к снижению трудоёмкости процессов, снижению расхода металла, сокращению расходов на инструмент, уменьшению потребности в производственных площадях.

Материалы и результаты исследований. Примером получения деталей с применением гибки с локализованным очагом деформации может служить производство конических желобов, являющихся компонентами деталей типа «диффузор» (см. рис. 1). Производство деталей такого типа на многих отечественных предприятиях является неотработанным, длительным и трудоёмким процессом. Их получают путём сварки двух частей (желобов). Для изготовления желобов используется стальной листовой прокат — по два листа на изготовление одного диффузора. После вырубki на гильотинных ножницах, зачистки кромок, правки и разметки, снятия наплывов и шлака лист правят повторно и выполняют с помощью двухдисковых ножниц прорези в местахгиба, после чего производится гибка на кромкогибочном прессе. Жёлоба подвергаются окончательной правке до чертёжных размеров и свариваются. Готовый диффузор подвергается проверке размеров, в случае необходимости правится вручную, зачищается. Изготовление данных деталей требует больших затрат времени и ручного труда, поэтому актуальным является решение по разработке и применению нового инструмента и оборудования, позволяющих интенсифицировать их производство за счёт исключения ручных работ и снижения количества необходимых переналадок оборудования.

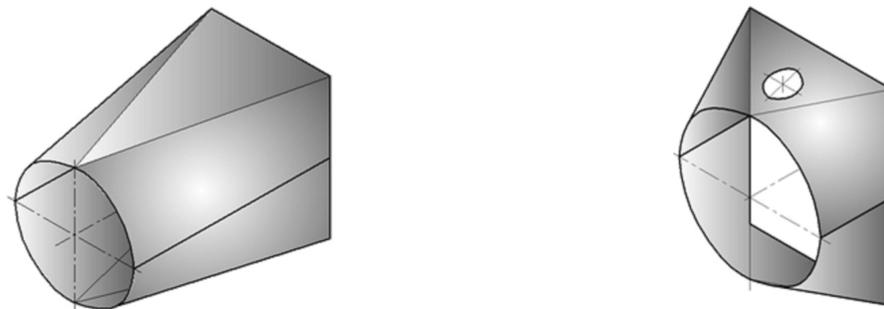


Рис. 1. Примеры диффузоров

Одним из путей интенсификации производства желобов, используемых для получения диффузоров является применение конического пуансона с давящими ребрами (см. рис. 2) [1]. В предлагаемом варианте получения необходимой формы листовых загото-

вок процесс обработки листового материала сопровождается пластической деформацией металла, т. е. происходит вдавливание заготовки при одновременном затягивании её в зону деформации.

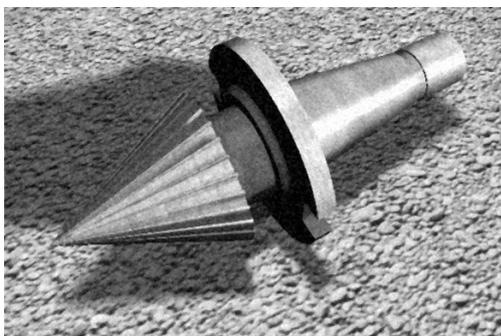


Рис. 2. Конический пуансон с давящими ребрами

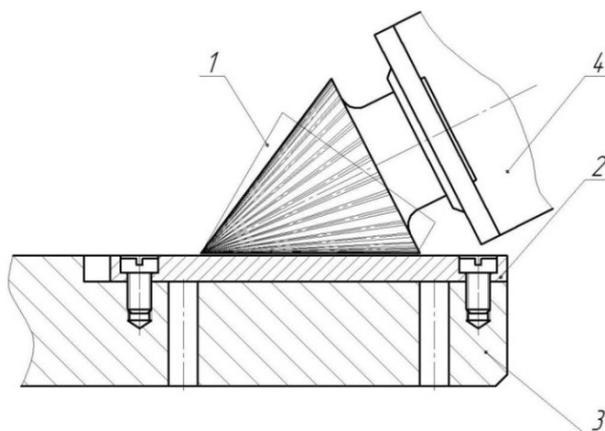


Рис. 3. Схема формоизменения плоской заготовки во время формообразования детали типа «диффузор»:
1 – заготовка; 2 – подкладка; 3 – нижняя плита; 4 – пуансон

При этом инструмент поворачивается всего на пол-оборота, т. е. на 180° (см. рис. 3). После чего инструмент возвращается в исходное положение со снятием деформирующей силы. Подобные перемещения возможно осуществить с помощью прецессионных прессов, модельный ряд которых на сегодняшний день довольно широк, либо же на традиционных прессах гидравлического или кривошипного типов с применением специальных приспособлений, позволяющих осуществлять проворачивание заготовки относительно инструмента. Примеры полученных желобов показаны на рис. 4.

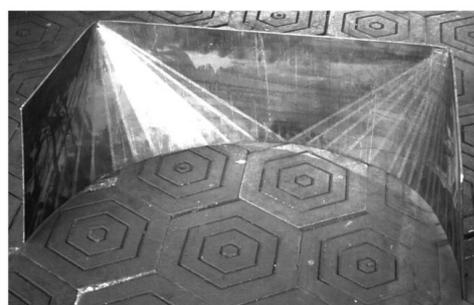
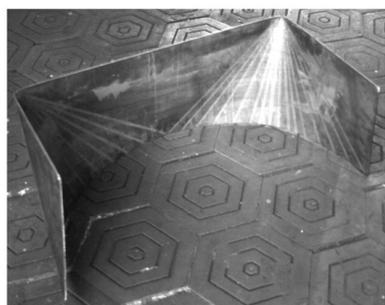


Рис. 4. Желоба, отформованные на гидравлическом прессе П6328 с использованием поворотного приспособления

Одним из факторов, оказывающих основополагающее влияние на процесс формообразования желобов на линиях внедрения ребер инструмента, является течение материала заготовки, распространяющееся в двух направлениях — от вершины инструмента к периферии заготовки вдоль линии контакта и перпендикулярно оси ребра в виде остаточной вмятины.

При обкатывании заготовок коническим инструментом с помощью простых геометрических построений невозможно определить ни направление, ни величину скорости скольжения. Поэтому для определения направления скоростей точек инструмента (давящего ребра) и заготовки был использован аппарат аналитической геометрии, предложенный в работе [2]. Анализ производился с применением декартовой системы координат, плоскость Oxy которой совпадает с плоскостью деформированной заготовки, а центр координат лежит на оси ее вращения (рис. 5).

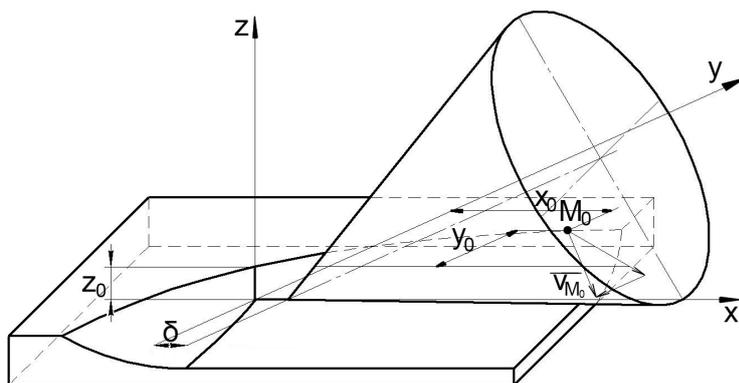


Рис. 5. Расчетная схема для определения угла между проекциями векторов скоростей точек контакта давящего ребра пуансона и заготовки на плоскость

В выбранной системе координат, согласно принятых на рис. 5 обозначений, уравнение поверхности давящего ребра (инструмента) может быть записано в виде:

$$F(x, y, z) = ((x - \delta) \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha)^2 + y^2 - \frac{((x - \delta) \cdot \sin \alpha + z \cdot \cos \alpha)^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (1)$$

Определим линию начала контакта ребра и заготовки. При подаче инструмента линией начала контакта является парабола, которая образуется при пересечении плоскости $z = h$ с поверхностью ребра, описанного выражением (1), и описывается уравнением

$$y = \sqrt{\frac{((x - \delta) \cdot \sin \alpha + h \cdot \cos \alpha)^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} - ((x - \delta) \cdot \cos \alpha - h \cdot \sin \alpha)^2}. \quad (2)$$

Определим взаимное расположение векторов скоростей заготовки и инструмента точки $M_0(x_0, y_0, z_0)$, которая лежит на линии начала контакта $y_0 = y(a, h, \delta)$ на расстоянии $x_0 = R$ от оси вращения заготовки $z_0 = h$, а также направление вектора скорости точки M_0 , принадлежащей заготовке.

Так как инструмент совершает вращательное движение вокруг своей оси, осуществляя затягивание заготовки в зону дальнейшей деформации следующим ребром, вектор скорости точки M_0 ребра лежит на прямой пересечения плоскости, касательной к поверхности ребра в данной точке, и плоскости, проходящей перпендикулярно оси ребра через точку M_0 . Уравнение проекции этой прямой на плоскость $z = z_0$ имеет вид:

$$y = -\frac{x_0}{y_0} \cdot (x - x_0) + y_0. \quad (3)$$

Уравнение плоскости, касательной к поверхности ребра в точке M_0 запишем в виде:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \cdot (x - x_0) + \frac{\partial F}{\partial y} \cdot (y - y_0) + \frac{\partial F}{\partial z} \cdot (z - z_0) = 0, \quad (4)$$

где $\partial F / \partial x$, $\partial F / \partial y$, $\partial F / \partial z$ – частные производные от (1) по x , y , z соответственно.

Учитывая то, что плоскость проходит через точку $M_0(x_0, y_0, z_0)$, ее уравнение запишется в виде:

$$z = z_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot (x - x_0). \quad (5)$$

Тогда уравнение прямой, на которой лежит вектор скорости точки M_0 инструмента, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x} \cdot (x - x_0) + \frac{\partial F}{\partial y} \cdot (y - y_0) + \frac{\partial F}{\partial z} \cdot (z - z_0) = 0; \\ z = z_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot (x - x_0). \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, проекция вектора скорости точки ребра на плоскость $z = z_0$ определится по формуле:

$$y = m/l \cdot (x - x_0) + y_0, \quad (7)$$

где m, l – параметры направляющего вектора $\vec{s}(l; m; n)$ прямой (6), полученной пересечением плоскостей (4) и (5).

Исходя из формул (3) и (7), можно построить графики проекций прямых, содержащих в себе векторы скоростей инструмента и заготовки, показанные на рис. 6.

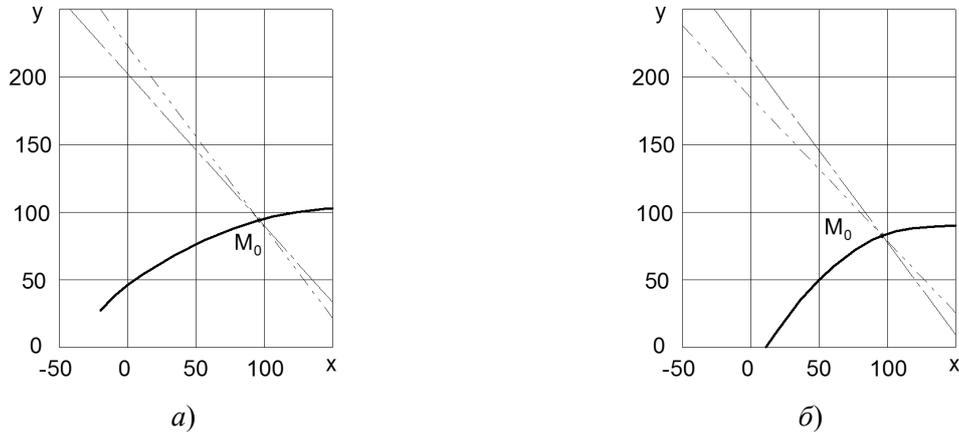


Рис. 6. Проекция прямых, на которых лежат векторы скоростей заготовки (штрих-пунктирная линия) и ребра инструмента (линия с двойным пунктиром), на плоскость $z = z_0$ при положительном (а) и отрицательном (б) смещении инструмента δ (сплошная линия – линия начала контакта)

В соответствии с расчетами, при положительном смещении инструмента (обкатка происходит по направлению от края заготовки к ее середине) материал течет вдоль линии контакта от вершины пуансона к основанию его рабочей части, а при отрицательном — к вершине. Поскольку линии изгиба заготовки сходятся в одну точку, вариант формообразования при положительном смещении инструмента является более приемлемым, так как позволяет избежать наплывов материала в точке контакта заготовки и вершины пуансона.

При исследовании характера течения материала в направлении, проходящем по нормали к пятну контакта инструмента и заготовки, выделим в поперечном сечении заготовки в очаге деформации продольными плоскостями элемент единичной длины δ_x (см. рис. 7, б).

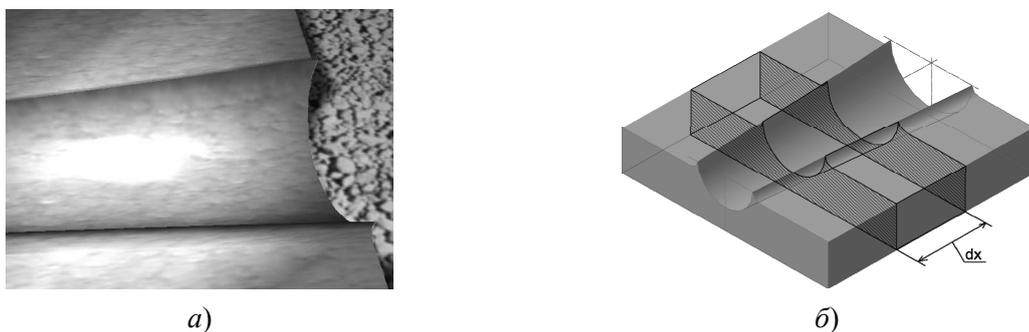


Рис. 7. Участок вдавливания ребра конического пуансона:
а – изображение остаточной вмятины, образующейся на линиигиба; б – выбор участка единичной длины для расчета напряженного состояния заготовки в зоне внедрения инструмента

Рассмотрим равновесие сил, действующих на этот элемент в сечении единичной длины, ограниченном плоскостями δ_x и $\delta_x + d\delta_x$ в декартовой системе координат (см. рис. 8). При вдавливании ребра инструмента с углом наклона относительно основания

заготовки, равно α , в сечении $d\delta_x$ действует усредненное напряжение σ_x и мгновенное давление ребра конического пуансона на материал заготовки в очаге деформации σ_n .

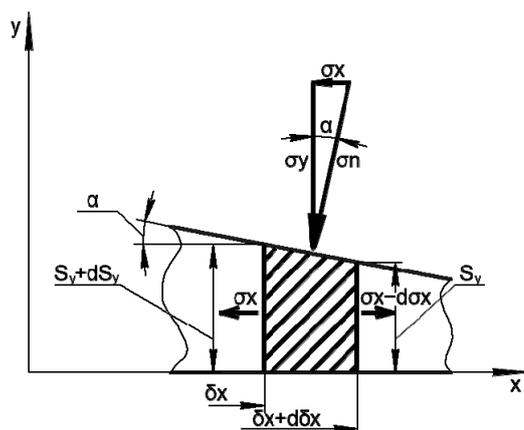


Рис. 8. Расчетная схема силового упругопластического контакта ребра инструмента и заготовки

Составим условие равновесия

$$-\sigma_x \cdot \delta_x + (\sigma_x - d\sigma_x) \cdot (\delta_x + d\delta_x) - \frac{\sigma_n \sin \alpha}{2} \cdot \frac{d\delta_x}{\sin \alpha} - \sigma_n \cdot f dx = 0, \quad (8)$$

где f – коэффициент трения металла заготовки о подкладную плиту или рабочий стол прессы.

Поскольку выделенный элемент заготовки имеет единичную длину, введем обозначение $\delta_x = s$. Таким образом, после произведения и суммирования подобных членов, выражение (8) примет вид:

$$-\sigma_x ds + d\sigma_x \cdot s = \left(0,5\sigma_n + \frac{\sigma_n \cdot f}{\operatorname{tg}\alpha} \right) ds. \quad (9)$$

Окончательно выражение (9) примет вид:

$$d\sigma_x / (\sigma_x + k) = ds / s, \quad (10)$$

где $k = 0,5\sigma_n + [\sigma_n \cdot f / \operatorname{tg}\alpha]$.

С учетом того, что на выбранном участке заготовки, ограниченном плоскостями s_0 и s_k , действует суммарное напряжение $\sigma_s = \sigma_x - \sigma_y$, проинтегрировав (10) на заданном участке, получим:

$$\int_0^{\sigma_s} \frac{d\sigma_x}{\sigma_x + k} = \int_{s_0}^{s_k} \frac{ds}{s}. \quad (11)$$

Преобразовывая далее выражение (11), установим напряжение, действующее на выбранном участке заготовки.

$$\ln \frac{\sigma_s + k}{k} = \ln \frac{s_k}{s_0}. \quad (12)$$

$$\sigma_s = \frac{s_k \cdot k - s_0 \cdot k}{s_0}. \quad (13)$$

Таким образом, окончательное решение равенства (8) будет иметь вид:

$$\sigma_s = \frac{(s_k - s_0) \cdot \left(0,5\sigma_n + \frac{\sigma_n \cdot f}{\operatorname{tg}\alpha} \right)}{s_0}. \quad (14)$$

Выводы. Полученные аналитические зависимости позволяют получить представление о характере течения материала заготовки при вдавливании и перекачивании конического пуансона с давальными ребрами и целенаправленно управлять интенсивностью течения металла в заданном направлении. Установлено, что при обкатывании инструментом заготовки по направлению от края заготовки к ее середине материал течет вдоль линии контакта от вершины пуансона к основанию его рабочей части, а при отрицательном — к вершине, что влияет на интенсивность и характер образования наплывов металла на отформованной заготовке. Если в первом случае течение металла компенсируется за счет упругого восстановления металла после снятия нагрузки, то во втором возможно образование наплывов, ведущих к возникновению напряжений сжатия в области вершины инструмента, что может воспрепятствовать получению требуемых геометрических размеров детали.

При течении металла в направлении, проходящем по нормали к пятну контакта инструмента и заготовки, вызванном непосредственным внедрением ребра инструмента в заготовку, решающее влияние на геометрию отпечатка контакта оказывают два параметра: угол α между кромкой ребер инструмента и поверхностью заготовки, образуемый в плоскости, проходящей нормально к поверхности заготовки через ось вращения инструмента, а также коэффициент трения f металла заготовки о подкладную плиту или рабочий стол прессы.

Литература

1. Пат. 6869/ЗУ/12 Україна, МПК В 26 F 1/00. Спосіб виготовлення деталей типу «дифузор» методом локальної деформації / Драгобецький В.В., Мороз М.М., Шлик С.В., Ревиниши Р.С., Коноваленко О.Д.; заявник і власник патенту Кременчуцький держ. ун-т ім. М. Остроградського. – заяв. 05.12.2011; опубл. 02.04.2012.

2. Матвийчук, В.А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов [Текст]: моногр. / В.А. Матвийчук, И.С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с.

© С.В. Шлык

С.В. Шлик, к.т.н., ст. викл.

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТІКАННЯ МАТЕРІАЛУ ПРИ ГНУТТІ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК З ЛОКАЛІЗОВАНИМ ОСЕРЕДКОМ ДЕФОРМАЦІЇ

У статті наведено результати дослідження перетікання матеріалів при гнутті листових заготовок з локалізованим осередком деформації. Отримано аналітичні залежності характеру деформування, що дозволило керувати технологічним процесом. Установлено параметри основних факторів впливу на процес формоутворення конічних просторових заготовок методом гнуття.

Ключові слова: гнуття, дифузор, локальна деформація, конічний пуансон.

S.V. Shlyk, Ph.D., Senior Lecturer

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

RESEARCH OF A CURRENT OF THE MATERIAL IN BENDING SHEET METAL PARTS WITH LOCALIZED AREAS OF STRAIN

The article contains results of flow study materials in bending sheet metal parts with localized deformation region. Obtained the analytical dependencies of the deformation character, that allowed controlling the technological process. It was established the influence factors of the main parameters on the process of shaping the spatial conical workpieces by means of bending.

Keywords: bending, diffuser, the local deformation, cone-shaped punch.

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ГІДРОФІКОВАНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

Дослідженнями встановлюється, що раціональне, по критерію найбільшої корисної потужності, значення температури (в'язкості) робочої рідини залежить від технічного стану насосу. Найбільша корисна потужність досягається оптимізацією співвідношення між втратами тиску, внутрішніми витоками в складових гідроприводу і витратами потужності системи охолодження на забезпечення раціональної температури робочої рідини. Застосування раціонального температурного режиму доцільно і є невикористаним резервом енергозбереження і підвищення ефективності експлуатації гідроприводів мобільних машин.

Ключові слова: будівельна машина, гідропривід, енергозбереження, корисна потужність, раціональний температурний режим.

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень та публікацій. Енергозбереження є актуальною проблемою у всіх галузях виробництва, включаючи експлуатацію гідрофікованих будівельних машин. Ефективність і енергозбереження гідроприводу будівельних машин забезпечується чистотою робочої рідини (РР), режимами навантаження, застосуванням сучасної діагностики, а також раціональним температурним режимом його роботи. Серед багатьох наукових праць, присвячених температурному режиму гідроприводів, недостатньо досліджено цей режим стосовно гідроагрегатів, що мають експлуатаційний знос [1, 2, 3].

Метою роботи є підвищення ефективності будівельних машин визначенням і використанням раціонального температурного режиму, що забезпечує найбільшу корисну потужність гідроприводу (на прикладі гідроприводу екскаватора ЕО-4225 [4]).

Основний матеріал і результати. Корисна потужність гідроприводу визначається

$$N_{кр} = N_T - N_{вв.н} - N_{гм} - N_{гп} - N_B, \quad (1)$$

де N_T – теоретична потужність насосу; $N_{вв.н}$ – втрати потужності внаслідок внутрішніх перетоків в насосі; $N_{гм}$ – гідромеханічні втрати потужності в насосі; $N_{гп}$ – втрати потужності в магістралях і агрегатах гідроприводу по колу «насос – бак – насос»; N_B – витрати потужності на забезпечення раціональної температури РР (на привод системи охолодження).

Теоретична потужність насосу визначається як потужність, що еквівалентна при номінальному перепаду тиску в насосі p продуктивності насосу $Q_{тн}$ [1]

$$N_T = nq_0 p = Q_{тн} p, \quad (2)$$

де n – частота обертання валу насоса; p – номінальний робочий тиск, створений насосом; $Q_{тн}$ – теоретична подача насоса.

Втрати потужності внаслідок внутрішніх перетоків в насосі

$$N_{вв.н} = Q_{вв.н} \cdot [p, \nu(T), n, S] p = \left[\frac{\pi d_n z_n S_n^3 g}{12\gamma L \nu} - \frac{\pi d_n z_n w_n S_n}{2} + \left[p \frac{\pi [A^3 S_n^3] g}{6\gamma \nu \ln(r_2/r_1)} - \frac{3\gamma (2\pi n)^2}{20g} \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot \frac{\pi [A^3 S_n^3] g}{6\gamma \nu \ln(r_2/r_1)} \right] \right] p, \quad (3)$$

де $Q_{вв.н}$ – внутрішні витоки в насосі; $\nu(T)$ – в'язкість робочої рідини в залежності від температури; S – параметри, що характеризують зазори в насосі; d_n – діаметр поршня насоса; z_n – кількість поршнів у насосі, що подають робочу рідину; S_n – зазор між гільзою

і поршнем; γ – об’ємна вага; L – довжина ущільнюючої частини поршня насоса; r_2, r_1 – зовнішній і внутрішній радіуси віконць розподільника насоса; $w_{\text{п}}$ – середня швидкість поршнів насоса; A – коефіцієнт співвідношення поршневих зазорів і зазорів в розподільнику насоса.

Залежність в’язкості робочої рідини (МГС–46В) від температури визначається (Ст)

$$\nu = \frac{e^{\frac{a+b}{T}+c \ln T}}{100} = \frac{e^{-277+\frac{17523}{T}+40 \ln T}}{100}, \quad (4)$$

де a, b, c , – безрозмірні коефіцієнти залежності; T – температура робочої рідини, °К.

Гідромеханічні втрати потужності в насосі, при припущенні, що вони визначаються втратами тиску в його каналах, дорівнюють

$$N_{\text{гм}} = Q_{\text{н}}(T, S_{\text{п}}) p (1 - \eta_{\text{гм}}) \left(\frac{\nu_T}{\nu_0} \right)^n \left(\frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{нТ}}} \right)^m, \quad (5)$$

де $Q(T, S_{\text{п}})$ – продуктивність насоса в залежності від температури РР і його технічного стану; $\eta_{\text{гм}}$ – гідромеханічний ККД; ν_T, ν_0 – співвідносно в’язкості РР при температурі T і номінальній температурі; $Q_{\text{н}}, Q_{\text{нТ}}$ – співвідносно продуктивності насоса при номінальній температурі і при температурі T робочої рідини; n, m – показники ступеня, значення яких залежить від режиму течії в каналах насоса.

Нехтуючи внутрішніми витоками в розподільнику і гідроциліндру і розбивши гідропривод на k ділянок, втрати потужності в магістралях і агрегатах гідроприводу по колу «насос – бак – насос» можна визначити

$$N_{\text{гп}} = \sum_{i=1}^k Q_{\text{н}}(T, S_{\text{п}}) \cdot p_k(T, S_{\text{п}}), \quad (6)$$

де $p_k(T, S_{\text{п}})$ – втрати тиску в кожній з k ділянок в залежності від температури РР і технічного стану насоса.

Загальні втрати тиску в магістралях гідроприводу визначалися як підсумок втрат тиску на окремих ділянках руху РР включаючи: металеві трубопроводи, рукава високого тиску (РВТ), місцеві опори при поворотах трубопроводів, при переходах з металевого трубопроводу до РВТ, при входах в гідророзподільник, гідроциліндр, фільтр, маслоохолоджувач та в самих перелічених гідроагрегатах.

Всього було розглянуті 32 ділянки. При визначенні втрат тиску на окремих ділянках використовувалися залежності, які наведені в роботах [1, 2, 3].

Витрати потужності на забезпечення раціональної температури РР приблизно можна визначити за залежністю

$$N_{\text{в}} = \frac{N_{\text{нд}}}{N_{\text{пт}}} = \frac{m_{\text{гп}} \cdot c_{\text{гп}} \cdot (T_{\text{рр}} - T^{\text{рац}})}{N_{\text{пт}}}, \quad (7)$$

де $N_{\text{нд}}$ – надлишкова теплова потужність, що акумульована в гідроприводі і викликає підвищення температури РР понад раціонального значення; $N_{\text{пт}}$ – середня, розсіяна кіловатом приводу вентилятора системи охолодження, теплова потужність, що акумульована в РР [5]; $m_{\text{гп}}$ – приведена маса гідроприводу; $c_{\text{гп}}$ – приведена теплоємність гідроприводу; $T_{\text{рр}}, T^{\text{рац}}$ – температура РР і її раціональне значення.

$$m_{\text{гп}} = m_{\text{го}} + m_{\text{рр}}, \quad (8)$$

де $m_{\text{го}}$ і $m_{\text{рр}}$ – маса основного і допоміжного гідрообладнання, гідравлічної апаратури, кондиціонерів і робочої рідини [3].

Середня питома теплоємність $c_{\text{гп}}$ матеріалів гідрообладнання і робочої рідини визначається за формулою [3]

$$c_{\text{гп}} = \frac{c_{\text{рр}} \cdot m_{\text{рр}} + c_{\text{го}} \cdot m_{\text{го}}}{m_{\text{рр}} + m_{\text{го}}}, \quad (9)$$

де $c_{\text{рр}}$ – теплоємність робочої рідини; $c_{\text{го}}$ – середня питома теплоємність матеріалів гідрообладнання (сталі); $m_{\text{рр}}$ – маса рідини; $m_{\text{го}}$ – маса гідрообладнання.

Теоретичні дослідження на основі залежності (1) зв'язку потужності з температурою (в'язкістю) РР для насосів з різним технічним станом дозволили визначити, що найбільшу корисну потужність насоси з об'ємним ККД $\eta = 0,96 \dots 0,9$ дають при в'язкості, що відповідає температурі РР близько $40 \dots 50$ °С. З погіршенням технічного стану насосу і до досягнення межі допустимого зменшення об'ємного ККД за економічним критерієм до $\eta = 0,7$, найбільшу потужність насоси дають при температурі робочої рідини $35 \dots 42$ °С.

В середньому кожний кіловат приводу маслоохолоджувача відбирає від РР $5 \dots 10$ кВт теплової енергії [1, 4]. Тому забезпечення раціональної температури РР в діапазоні об'ємних ККД до $\eta = 0,7$ збільшує необхідну потужність приводу вентилятора на $30 \dots 50$ %, тобто на $1,5 \dots 2$ кВт. При цьому корисна потужність насосу збільшується $5 \dots 9$ кВт.

При подальшому погіршенні технічного стану насосу і наближення його стану до межі працездатності, що відповідає об'ємному ККД $\eta = 0,65 \dots 0,6$, раціональна температура наближається до $30 \dots 20$ °С, забезпечення якої визиває підвищення витрати потужності в системі маслоохолодження може бути недоцільною. Але і в цьому випадку зменшення температури РР дає підвищення корисної потужності насосу.

Висновки

1. Дослідженнями встановлено, що раціональне, по критерію найбільшої корисної потужності, значення температури (в'язкості) робочої рідини не постійне і залежить від технічного стану насосу.

2. Найбільша корисна потужність може бути досягнута оптимізацією співвідношення між втратами тиску і внутрішніми витоками в складових гідроприводу, які визначаються температурою робочої рідини, а також витратами потужності системи охолодження на забезпечення раціонального значення цієї температури.

3. Застосування раціонального температурного режиму доцільно і є невикористаним резервом енергозбереження і підвищення ефективності експлуатації гідроприводів мобільних машин.

Література

1. Баишта, Т.М. *Машиностроительная гидравлика [Текст]: справ. пособие / Т.М. Баишта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.*
2. Васильченко, В.А. *Гидравлическое оборудование мобильных машин [Текст]: справ. / В.А. Васильченко. – М.: Машиностроение, 1983. – 301 с.*
3. Каверзин, С.В. *Стабилизация температуры рабочей жидкости гидроприводов строительных машин [Текст]: / С.В. Каверзин, А.С. Каверзина, С.В. Подсосов // Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 2001. – 249 с.*
4. *Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЭО-4125 [Текст]: каталог / ООО «Ковровский экскаваторный завод» – М.: Ковровец, 1980. – 110 с.*
5. Рожкин, В.М. *Калориферы для гидроприводов экскаваторов [Текст] / В.М. Рожкин // Строительные и дорожные машины. – М., 1977. – Вып. 5. – С. 4–5.*

© І.Г. Пімонов, Г.Г. Пімонов

И.Г. Пимонов, к.т.н., доц., Г.Г. Пимонов, к.т.н., доц.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГИДРОФИЦИРОВАННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Исследованиями устанавливается, что рациональное, по критерию полезной наибольшей мощности, значение температуры (вязкости) рабочей жидкости зависит от технического состояния насоса. Наибольшая полезная мощность достигается оптимизацией соотношения между потерями давления, внутренними утечками в составляющих гидропривода и расходами мощности системы охлаждения на обеспечение рациональной температуры рабочей жидкости. Применение рационального температурного режима целесообразно и является неиспользованным резервом энергосбережения и повышения эффективности эксплуатации гидроприводов мобильных машин.

Ключевые слова: строительная машина, гидропривод, энергосбережение, полезная мощность, рациональный температурный режим.

I.G. Pimonov, Ph.D, Associate Professor, G.G. Pimonov, Ph.D, Associate Professor

Kharkov National Automobile and Highway University

SUBSTANTIATION OF ENERGY-SAVING TEMPERATURE REGIME OF HYDRAULIC CONSTRUCTION MACHINES

The research proved that rational (by the criterion of useful maximum power) value of temperature (viscosity) of the working liquid depends on technical condition of the pump. The biggest useful power can be achieved by optimization of the ratio of pressure losses and internal leakage in hydraulic drive components to the power consumption of the cooling system in order to provide rational temperature of the working liquid. Using rational temperature mode is a reasonable and unused reserve of energy saving and increasing efficiency of running hydraulic drives of mobile machines.

Keywords: construction machine, hydraulic drive, energy saving, useful power, rational temperature regime.

УДК 621.87

В.О. Дзюра, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПІДНІМАННЯ НА ЗУБ ПРОТЯЖКИ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ НАПІВКРУГЛИХ КАНАВОК ЗА УМОВИ РІВНОМІРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗУБІВ

Отримано залежності для визначення величини піднімання на зуб протяжки для оброблення напівкруглих канавок за умови рівномірного навантаження зубів для забезпечення стабільності процесу різання. Отримано залежності для визначення площі зрізу одним зубом протяжки.

Ключові слова: протяжка, площа зрізу, навантаження, канавки, зуби.

Вступ. У деталях машин, що входять до складу вузлів сучасних машин використовується велика кількість профільних отворів різного функціонального призначення.

Технологія отримання профільних отворів є складною операцією технологічного процесу і вимагає проектування спеціального різального інструменту, який забезпечував би високу точність, надійність та довговічність.

На надійність інструменту і якість оброблюваної ним поверхні значний вплив має рівномірність сприйняття навантаження інструментом. Оскільки припуск на один зуб визначається як площа поперечного перерізу оброблюваного матеріалу, що знімається за прохід, то при обробці інструментом, який має декілька робочих елементів, нам необхідно забезпечити однакові припуски що припадуть на ці елементи. Це забезпечить стабільний режим навантаження інструмента з боку оброблюваного матеріалу, що збільшить ресурс його роботи і зменшить шорсткість оброблюваної поверхні, а також збільшить точність поверхні унаслідок зменшення вібрацій. Оскільки довжина оброблюваної поверхні деталі є невеликою, то можемо вважати, що різальні зуби вийшли з робочої зони, а працюють лише перехідні і калібрувальні зуби.

Огляд останніх джерел, досліджень і публікацій. У літературних джерелах [1–4] автори наводять загальну інформацію щодо проектування протяжок, не виділяючи особливостей їх проектування для обробки профільних поверхонь. У статті [5] автори запропонували розрахунок товщини зрізу матеріалу, що враховує зміну зрізу по висоті шліців.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Під час аналізу літературних джерел виявлено, що при проектуванні профільних протяжок не надається великого значення висоті розміщення різальних зубів. В основному рекомендують розміщувати різальні зуби з однаковою величиною піднімання на один зуб у межах однієї групи зубів.

Постановка завдання. Метою цього дослідження було встановлення впливу відносної висоти розміщення сусідніх зубів протяжки на навантаження, яке вони сприймають.

Основний матеріал і результати. Розглянемо процес обробки на прикладі двох сусідніх зубів протяжки (рис. 1).

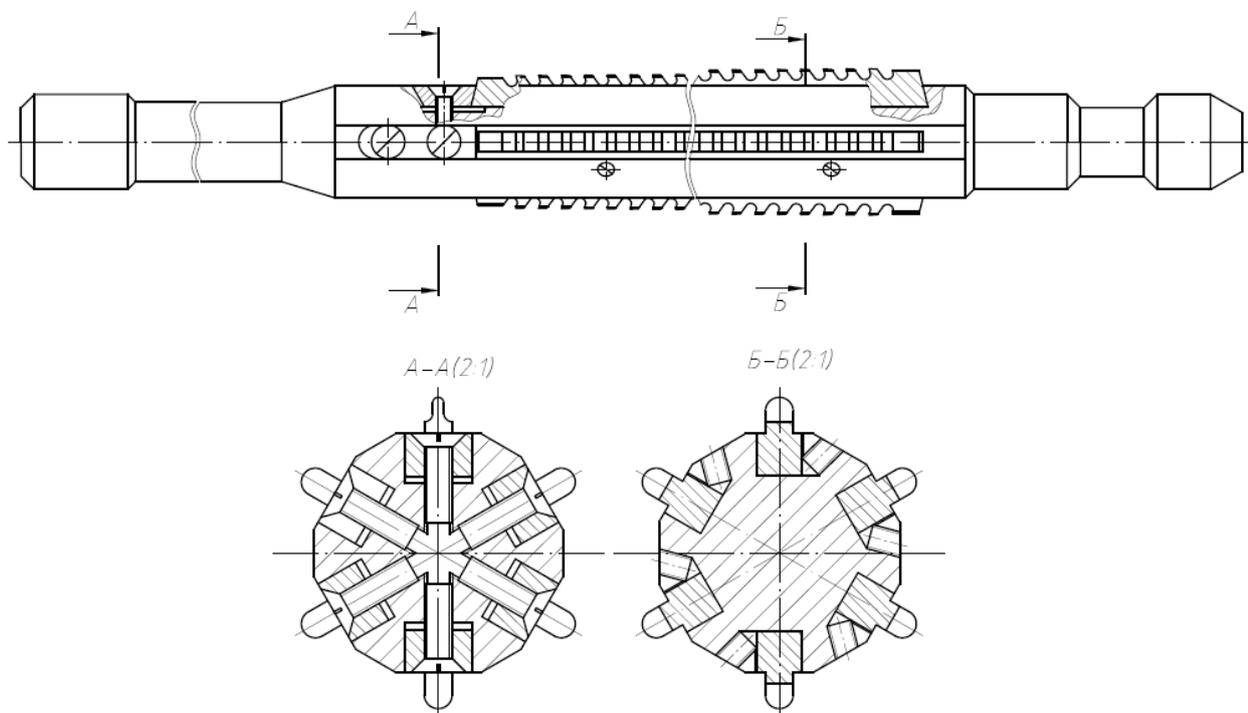


Рис. 1. Протяжка для оброблення напівкруглих канавок деталей машин

Величини припусків (площі), що зрізатимуться в процесі обробки, позначимо через S_1 і S_2 . Це будуть площі фігур, утворені перетином кіл радіусом R , що дорівнює радіусу

робочого профілю зуба інструмента. Оскільки обробка відбувається з профілем зуба з однаковим радіусом робочої поверхні, то $R_2 = R_3 = R$.

При цьому величина підйому на зуб для першого зуба буде дорівнювати $t_1 = h_1 - h_0$, а для наступного $t_i = h_i - h_{i-1}$.

Деталі для оброблення можуть надходити як з попередньо утвореними канавками, так і без. Профіль канавки в заготовці відповідає кінцевому профілю півкруглої канавки з радіусом $R_1 = R$, але з величиною припуску на обробку, тобто її профіль можна описати як круговий сектор із центром у точці A і центральним кутом α , який можна розбити на площу трикутника AOE та площу сегмента з відповідним центральним кутом.

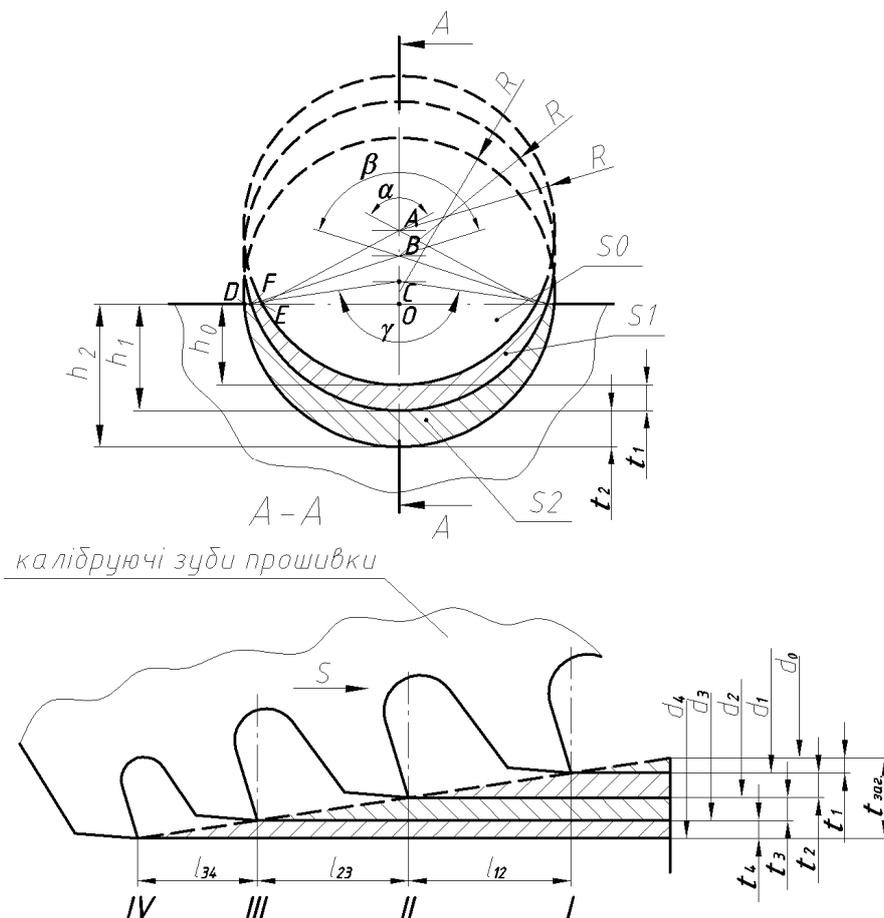


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення величини підйому на зуб протяжки:
а) поперечний переріз протяжки з заготовкою; б) поздовжній переріз протяжки з заготовкою

Площа цього сегмента буде дорівнювати:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \alpha}{360^\circ} - 2S_{AOE}. \quad (1)$$

Розглянувши трикутник AOE , можемо записати

$$OE = R \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Але оскільки

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{1 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}} = \sqrt{1 - \frac{(R - h_0)^2}{R^2}} = \frac{\sqrt{R^2 - (R - h_0)^2}}{R} = \frac{2Rh_0 - h_0^2}{R}, \quad (2)$$

то

$$OE = 2Rh_0 - h_0^2; AO = R - h_0.$$

Звідси

$$S_{AOE} = \frac{1}{2}(R - h_0)\sqrt{2Rh_0 - h_0^2}. \quad (3)$$

Отже, підставивши значення виразу (3) у формулу (1), отримаємо

$$F_0 = \frac{\pi \cdot R^2 \alpha}{360^\circ} - \frac{1}{2}(R - h_0)\sqrt{2Rh_0 - h_0^2}. \quad (4)$$

Відповідно для зуба із центром профілю в точці B

$$F_1 = \frac{\pi \cdot R^2 \beta}{360^\circ} - \frac{1}{2}(R - h_1)\sqrt{2Rh_1 - h_1^2}. \quad (5)$$

І для зуба із центром профілю в точці C

$$F_2 = \frac{\pi \cdot R^2 \gamma}{360^\circ} - \frac{1}{2}(R - h_2)\sqrt{2Rh_2 - h_2^2}. \quad (6)$$

Згідно з розрахунковою схемою (рис. 2) (площі фігур S_1 і S_2 відповідно дорівнюють:

$$S_1 = F_1 - F_0; \quad (7)$$

$$S_2 = F_2 - F_1. \quad (8)$$

Підставивши відповідні значення у формули (7) і (8), отримаємо

$$S_1 = \frac{\pi R^2 \beta}{360^\circ} - \frac{1}{2}(R - h_1)\sqrt{2Rh_1 - h_1^2} - \frac{\pi R^2 \alpha}{360^\circ} + \frac{1}{2}(R - h_0)\sqrt{2Rh_0 - h_0^2}, \quad (9)$$

де, S_1, S_2 – площі, що знімаються двома послідовно розміщеними зубами, мм²; h_0 – глибина канавки, отримана в результаті попередньої операції, мм; h_1 – глибина канавки після проходження першого зуба, мм; h_2 – глибина канавки після проходження другого зуба, мм; t_1 – величина зміщення першого зуба відносно умовного профілю канавки одержаного на попередній операції в поперечному перерізі, мм; t_2 – величина зміщення наступного зуба відносно попереднього в поперечному перерізі, мм.

$$S_2 = \frac{\pi R^2 \gamma}{360^\circ} - \frac{1}{2}(R - h_2)\sqrt{2Rh_2 - h_2^2} - \frac{\pi R^2 \beta}{360^\circ} + \frac{1}{2}(R - h_1)\sqrt{2Rh_1 - h_1^2}. \quad (10)$$

Прирівнявши значення S_1 і S_2 , що є умовою даної задачі, отримаємо трансцендентне рівняння для визначення оптимального значення величини h_2

$$\begin{aligned} \frac{\pi R^2}{360^\circ} (2\beta - \alpha - \gamma) - (R - h_1)\sqrt{2Rh_1 - h_1^2} + \frac{1}{2}(R - h_0)\sqrt{2Rh_0 - h_0^2} + \\ + \frac{1}{2}(R - h_2)\sqrt{2Rh_2 - h_2^2} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Значення кутів α можна визначити із залежності:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{R - h_0}{R}; \quad \beta = 2 \arccos \frac{R - h_1}{R}; \quad \gamma = 2 \arccos \frac{R - h_2}{R}.$$

Це рівняння дає можливість одержати значення глибини канавки h_2 після проходження i -го зуба протяжки при відомій початковій глибині канавки h_0 і заданій величині глибини канавки h_1 , отриманої після проходження $i - 1$ зуба із забезпеченням однакової величини припуску, що знімаються цими зубами.

– для i -го зуба рівняння матиме вигляд

$$\frac{\pi R^2}{360^\circ} (2\beta - \alpha - \gamma) - (R - h_i) \sqrt{2Rh_i - h_i^2} + \frac{1}{2} (R - h_{i-1}) \sqrt{2Rh_{i-1} - h_{i-1}^2} + \frac{1}{2} (R - h_{i+1}) \sqrt{2Rh_{i+1} - h_{i+1}^2} = 0. \quad (12)$$

$$\alpha = 2 \arccos \frac{R - h_{i-1}}{R}; \quad \beta = 2 \arccos \frac{R - h_i}{R}; \quad \gamma = 2 \arccos \frac{R - h_{i+1}}{R}.$$

Для визначення параметра h_i (12) використаємо спеціальні (графічні) методи розв'язку трансцендентних рівнянь за допомогою САПР (MathCAD).

Оскільки протягуванням можна формувати напівкруглі канавки як на початковій, так і кінцевій стадії їх утворення, то розглянемо два випадки формування напівкруглих канавок.

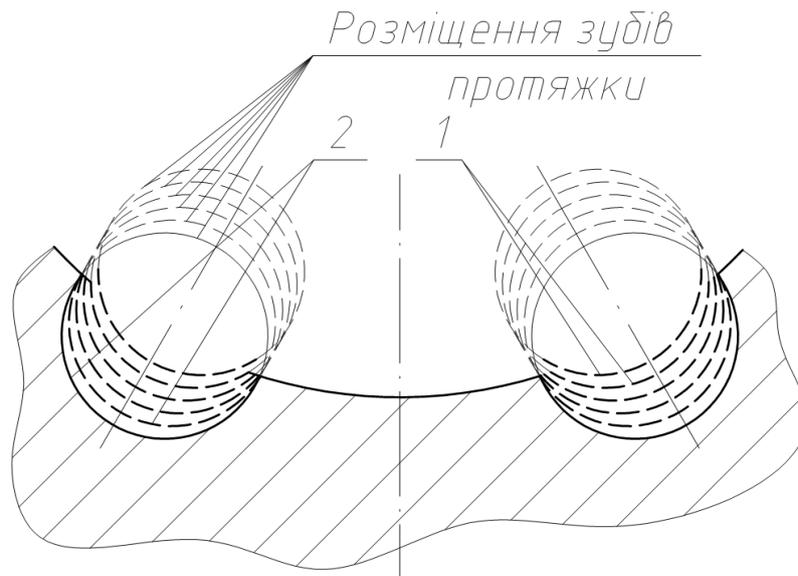


Рис. 3. Розміщення робочого профілю зубів протяжки під час обробки на різних етапах формування напівкруглих канавок:

1 – початковий етап формування; *2* – кінцевий етап формування

Розглянемо випадок оброблення напівкруглих канавок, коли зуби протяжки починають формування канавки (рис. 3), тобто величина проникнення його в оброблюваний матеріал є незначною (h_0, h_1 наближаються до 0).

Значення величини $h_2 = 0,754$ мм при відомих $h_0 = 0,1$ мм; $h_1 = 0,3$ мм; $R = 5$ мм одержано за допомогою САПР MathCAD 2013.

Тобто це значення h_2 не відповідає залежності

$$h'_2 = (h_1 - h_0) + h_1 = 2h_1 - h_0, \quad (13)$$

$$h'_2 = 2 \cdot 0,3 - 0,1 = 0,5 \text{ мм.}$$

Як бачимо, величина зміщення t_1 першої кульки відносно умовного профілю канавки отриманої на попередній операції становить $t_1 = 0,2$ мм, а от величина зміщення t_2 наступної кульки відносно попередньої $t_2 = h_2 - h_1 = 0,754 - 0,3 = 0,454$ мм.

Величина зміщення в цьому випадку майже у 2,3 рази більша від попередньої, що чинитиме значний вплив на конструктивні розміри протяжки.

Розглянемо процес оброблення, коли формування напівкруглих канавок знаходиться на завершальному етапі (рис. 3), (h_0, h_1 наближаються до R).

Для параметрів h_2 при $R = 5$ мм, $h_0 = 4,6$ мм, $h_1 = 4,7$ мм значення $h_2 = 4,799$ мм.

Як бачимо, що на завершальному етапі формування напівкруглої канавки, коли значення величини h_0, h_1 наближаються до R , то значення h_2 наближається до

$$h'_2 = (h_1 - h_0) + h_1 = 2h_1 - h_0, \quad (14)$$

$$h'_2 = 2 \cdot 4,7 - 4,6 = 4,8 \text{ мм.}$$

Висновки

1. Установлено, що для забезпечення умови рівномірного навантаження зубів протяжки при обробленні напівкруглих канавок величина піднімання на один зуб повинна бути різною і визначатися за виведеною залежністю і залежить від стадії формування канавки.

2. Отримано залежність для визначення величини піднімання на зуб протяжки для оброблення напівкруглих канавок за умови рівномірного навантаження зубів для забезпечення стабільності процесу різання.

Література

1. *Расчет и проектирование протяжек [Текст]: учеб. пособие / В.В. Демидов, Г.И. Киреев. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. Ч. 1. – 95 с.*

2. *Расчет и проектирование протяжек: в 2 ч. Наружные плоские и круглые протяжки [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Киреев, В.В. Демидов, М.Ю. Смирнов. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. Ч. 2. – 78 с.*

3. *Рыков, С.П. Проектирование металлорежущего инструмента [Текст]: учеб. пособие / С.П. Рыков, А.Г. Схиртладзе, В.Л. Хренов: 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2008. – 140 с.*

4. *Нарожных, А.Т Проектирование протяжек [Текст]: учеб. пособие / А.Т. Нарожных. – Волгоград: ВолгГТУ, 1995. – 85 с., ил.*

5. *Промптов, А.И. К расчету протяжек для шлицевых отверстий с эвольвентным профилем [Текст] / А.И. Промптов, Т.В. Зарак // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 35, № 3. – С 212.*

6. *Корн, Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 635 с.*

© В.О. Дзюра

В.А. Дзюра, к.т.н., доц.

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОДЪЕМА НА ЗУБ ПРОТЯЖКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЛУКРУГЛЫХ КАНАВОК ПРИ РАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ ЗУБЬЕВ

Получены зависимости для определения величины подъема на зуб протяжки для обработки полукруглых канавок при равномерной нагрузке зубьев для обеспечения стабильности процесса резания. Получены зависимости для определения площади среза одним зубом протяжки.

Ключевые слова: протяжка, площадь среза, нагрузки, канавки, зубы.

V.O. Dzyura, Ph.D., Associate Professor

Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

DETERMINATION OF THE VALUE OF LIFTING ON A TOOTH BROACH FOR CUTTING THE SEMICIRCULAR GROOVES UNDER THE CONDITION OF UNIFORM TEETH LOADING

The dependencies to determine the value of lifting on the tooth broach for cutting the semi-circular grooves under the conditions of uniform teeth loading to provide the stability of cutting process are developed. The dependences to determine the value of cutting by single tooth broach are developed as well.

Keywords: broach, value of cutting, load, grooves, teeth.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКА ZrO_2

Составлен алгоритм процесса моделирования горячего прессования порошков ZrO_2 при прямом пропускании переменного электрического тока, основой которого является модель Эшби для ГИП. Приведенные карты горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока порошков ZrO_2 позволяют найти давление и температуру процесса ГП для получения относительной плотности $\rho = 1,0$ за различное время.

Ключевые слова: диоксид циркония, нанопорошки, горячее прессование.

Введение. В настоящее время применяются эффективные методы, позволяющие спекать порошки различных тугоплавких материалов, при этом обеспечивая получение наноструктурных материалов. Для получения наноструктурных материалов из тугоплавких соединений, в том числе нетокопроводных, в последнее время расширяется практика использования техники и технологий FAST-метода спекания электрически активированным внешним полем. Метод спекания импульсным током (SPS – Spark plasma sintering) широко известный в мире под разными названиями - plasma activated sintering (PAS) или pulse electric current sintering (PECS) в Японии, Plasma pressure compaction (PPC) в США, instrumented pulse electrodischarge consolidation или resistance/spark sintering under pressure в Корее, позволяет производить объемные плотные материалы в течение нескольких минут при применении высоких скоростей нагрева и малом времени выдержки. Метод горячего прессования с прямым пропусканием тока позволяет так организовать процесс консолидации, чтобы избежать проблем, связанных с чрезмерной интенсивностью зернограничной диффузии: рост зерен, приводящий к увеличению диффузионного пути по границе, что замедляет процесс спекания. А возможность избежания аномального роста (превышение некоторыми зернами среднего размера) позволяет получать материалы с высокими механическими свойствами.

Однако, разница температуры в зоне спекания, установленная в процессе исследования температурного поля при горячем прессовании, которая непосредственно влияет на плотность и соответственно на физико-химические свойства образца, вызывает необходимость обратиться к моделированию данного процесса.

Цель исследования. Данная работа направлена на рассмотрение процесса горячего прессования с прямым пропусканием тока порошков диоксида циркония с разными размерами частиц с целью получения качественной модели уплотнения.

Анализ последних исследований и публикаций. В качестве основы для модели уплотнения при горячем прессовании (ГП) была взята модель горячего изостатического прессования (ГИП), предложенная М.Ф. Эшби с соавторами [1, 2]. Модель уплотнения при ГИП основана на одновременной возможности протекания процессов пластической деформации, дислокационной ползучести, ползучести Набарро-Херринга, а также массопереноса в результате объемной и граничной диффузии. Эта модель использовалась многочисленными авторами для оценки изменения плотности при горячем изостатическом прессовании различных порошков: металлических (медь, сталь, тантал, бериллий [2–5]), окислов Al_2O_3 , UO_2 [2, 6], сплавов Ti-Al [7] и т. д.

Материалы и результаты исследований. Проведены эксперименты с целью получения плотных образцов оксида циркония и изучения применения модели Эшби для описания горячего прессования (ГП) при прямом пропускании переменного электрического

тока порошков оксида циркония с диаметрами 3 мкм и 0,3 мкм. Давление прессования 45 МПа, время прессования 2, 5 и 10 минут.

Для построения диаграмм или карт ГП ZrO_2 , т. е. графиков зависимости относительной плотности от размеров порошка и параметров прессования (давления, температуры и времени) использовали следующие данные по оксиду циркония (табл. 1) [8].

Таблица 1. Свойства оксида циркония

| № п/п | Свойства ZrO_2 | Значение |
|-------|--|-----------------------|
| 1 | Атомный объем, Ω , м ³ | $3,36 \cdot 10^{-29}$ |
| 2 | Вектор Бюргерса, b , м | $5,1 \cdot 10^{-10}$ |
| 3 | Температура плавления, T_m , °К | 2985 |
| 4 | Предел текучести, σ_y , МПа | 4000 |
| 5 | Модуль сдвига при 300 °К, μ_0 , МПа | $9,6 \cdot 10^4$ |
| 6 | $T_m d\mu / \mu_0 dT$ | -0,8 |
| 7 | Объемная диффузия, D_{0v} , м ² /сек | $3,1 \cdot 10^{-6}$ |
| 8 | Зернограничная диффузия, δD_{0b} , м ³ /сек | $1,5 \cdot 10^{-12}$ |
| 9 | Зернограничная диффузия, Q_b , кДж/моль | 309 |
| 10 | Ползучесть, n | 2 |
| 11 | Ползучесть, A | $5 \cdot 10^{-4}$ |

Модель Эшби предусматривает две стадии уплотнения. На начальной стадии процесса ($\rho_0 < \rho < 0,9$) происходит рост шеек контактов первоначально сферических частиц порошка радиуса R и увеличение числа контактов. Частицы распределены случайным образом и имеют одинаковый размер. Уплотнение моделируется благодаря увеличению радиусов частиц вокруг фиксированных центров. Новый радиус R' частицы определяется как:

$$R' = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} R, \quad (1)$$

где ρ – относительная плотность и ρ_0 – исходная относительная плотность (для случайной упаковки $\rho_0 = 0,64$). При росте радиусов сфер происходит их частичное перекрытие с ближайшими соседями. Объем перекрытия вычисляется и перераспределяется в пустом пространстве, увеличивая при этом радиус шейки и число контактов с соседними частицами.

Число контактов отдельной частицы со своими соседями Z связано с относительной плотностью ρ следующим образом:

$$Z = 12\rho. \quad (2)$$

Z увеличивается от величины 7,7 с начала ГИП, что соответствует случайной упаковке частиц порошка с $\rho_0 = 0,64$, до 12, когда достигается полная теоретическая плотность. Средняя площадь контакта частицы равна:

$$s = \frac{\pi (\rho - \rho_0)}{3 (1 - \rho_0)} R^2. \quad (3)$$

При этом радиус контактной шейки x связан с плотностью следующим выражением:

$$x = \sqrt{\frac{s}{\pi}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0} \right\}^{1/2} R. \quad (4)$$

А радиус кривизны поверхности контактной шейки равен:

$$\gamma = \frac{x^2}{2(R-x)} \cong R(\rho - \rho_0). \quad (5)$$

Под воздействием внешнего давления P в местах контакта частиц возникает среднее усилие f , которое равно:

$$f = \frac{4\pi R^2}{Z\rho} P, \quad (6)$$

а, следовательно, эффективное давление P' в каждой точке контакта может быть определено как

$$P' = \frac{f}{s} = \frac{(1-\rho_0)}{\rho^2(\rho-\rho_0)} P, \quad (7)$$

при этом P' стремится к P при приближении ρ к единице.

При $0,9 < \rho < 1$ пористость становится закрытой и распределяется равномерно в угловых точках многогранников, представляющих собой поверхность частиц на заключительной стадии прессования. Радиус пор r определяется следующим соотношением:

$$r = R \left\{ \frac{1-\rho}{6} \right\}^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Внутреннее давление газа закрытых пор может существенно затруднить достижение верхнего предела плотности. Это внутреннее давление P_i равно:

$$P_i = P_0 \frac{(1-\rho_c)\rho}{(1-\rho)\rho_c}, \quad (9)$$

где P_0 – остаточное давление газа в закрытых порах, ρ_c – относительная плотность, при которой поры закрываются.

Рассмотрим уравнения для расчета плотности при пластической деформации и скоростей уплотнения при диффузии, дислокационной ползучести и ползучести Набарро-Херринга.

Пластическая деформация. При достижении определенного давления ($P' > 3\sigma_y$, где σ_y – предел текучести материала) частицы порошка уплотняются, благодаря действию пластической деформации. При этом происходит увеличение площади контактов частиц. Уплотнение, обеспечиваемое пластической деформацией, на начальной стадии определяется следующим уравнением:

$$\rho_{pl} = \left(\frac{(1-\rho_0)P}{1,3\sigma_y} + \rho_0^3 \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (10)$$

На заключительной стадии уплотнения относительная плотность, по рассматриваемому механизму, равна:

$$\rho_{pl} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{P}{\sigma_y}\right). \quad (11)$$

Далее, уплотнение происходит за счет процессов диффузии и ползучести.

Диффузия. Уплотнение на этой стадии происходит благодаря движению материала от зоны контакта между частицами порошка к поверхности образовавшейся шейки путем зернограничной и объемной диффузии. Скорость диффузионного уплотнения на начальной стадии уплотнения описывается уравнением:

$$\dot{\rho}_1 = \frac{43(1-\rho_0)^2}{(\rho-\rho_0)^2} \frac{(\delta D_b + \gamma D_v)}{kTR^3} \Omega P, \quad (12)$$

где D_v – коэффициент объемной диффузии, D_b – коэффициент диффузии по границам зерен, δ – эффективная толщина границы зерна, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, Ω – атомный объем. На заключительной стадии уплотнения уравнение для скорости диффузионного уплотнения имеет вид:

$$\dot{\rho}_1 = 54 \frac{\Omega(\delta D_b + r D_v)}{kTR^3} \sqrt[5]{1-\rho} P. \quad (13)$$

Ползучесть. Уплотнение при давлении также может осуществляться деформационной ползучестью в местах контакта частиц. Ползучесть подчиняется степенному закону:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad (14)$$

где ε_0 , σ_0 и n – параметры материала, ε – скорость деформации, σ – действующее напряжение. На начальной стадии скорость уплотнения при ползучести определяется из выражения:

$$\dot{\rho}_2 = 5,3(\rho^2 \rho_0)^{1/3} \cdot \frac{x}{R} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\sigma_0^n} \right) \left(\frac{P'}{3} \right)^n, \quad (15)$$

и на заключительной — из уравнения

$$\dot{\rho}_2 = \frac{3}{2} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\sigma_0^n} \right) \frac{\rho(1-\rho)}{[1-(1-\rho)^{1/n}]^n} \left(\frac{3}{2n} P \right)^n. \quad (16)$$

Крип Набарро-Херринга и Кобле. Данный механизм реализуется в условиях ГИП, когда размер зерна существенно меньше размеров частиц порошка. На начальной стадии скорость уплотнения определяется из уравнения:

$$\dot{\rho}_3 = 24,9 \frac{\Omega}{kTG^2} (\rho^2 \rho_0)^{1/3} \cdot \frac{x}{R} \left(D_v + \frac{\pi \delta D_b}{G} \right) P', \quad (17)$$

и на заключительной — из уравнения

$$\dot{\rho}_3 = 31,5 \frac{\Omega}{kTG^2} (1-\rho) \left(D_v + \frac{\pi \delta D_b}{G} \right) P, \quad (18)$$

где \bar{G} – средний размер зерна.

Таким образом, относительную плотность определяется путем суммирования относительной плотности, получаемой при заданной температуре и давлении, за счет пластической деформации и суммы произведений скоростей уплотнения (диффузия, ползучесть, крип Набарро-Херинга) на время прессования:

$$\rho = \rho_{pl} + \sum_{i=1}^n \dot{\rho}_i \Delta t. \quad (19)$$

Модель Эшби была разработана для описания действующих механизмов уплотнения в условиях горячего изостатического прессования. Для использования этой модели для предсказания механизмов уплотнения при горячем прессовании с прямым пропусканием переменного электрического тока нами было проведена следующая модификация модели Эшби. Ситуация осложняется тем, что точные механизмы повышения плотности при горячем прессовании с прямым пропусканием переменного электрического тока

до настоящего времени не описаны в полной мере. В частности, нет экспериментально установленного факта существования плазмы или других типов поверхностных эффектов, вызванных присутствием электрического поля. Поэтому, моделирование процессов горячего прессования с прямым пропуском переменного электрического тока часто имеет оценочный характер.

Во-первых, необходимо учесть тот факт, что при аксиальном прессовании напряжение сжатия точно известно, тогда как радиальная составляющая напряжения неизвестна и обычно имеет меньшее значение, чем аксиальное напряжение. А значит, более низкие радиальные напряжения будут вызывать понижение эффективной скорости уплотнения по сравнению с предсказанной скоростью уплотнения для гидростатического прессования. Поэтому необходимо модифицировать уравнение, описывающее скорость уплотнения в случае аксиального прессования. С этой целью Besson и Abouaf [4] предложили ввести фактор, включающий функцию локального напряжения. Отношение скорости уплотнения порошка $\dot{\rho}$ к относительной плотности ρ выражается через скорость объемной деформации $\dot{\varepsilon}$ следующим образом:

$$-\frac{\dot{\rho}}{\rho} = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33}. \quad (20)$$

Были получены уравнения для скоростей деформации в случае горячего прессования и горячего изостатического прессования, используя фактор локального напряжения. Применяя уравнение (20) для ГП и ГИП и разделив полученные два результата, получили фактор локального напряжения, который показывает насколько скорость уплотнения при ГП ниже по отношению к ГИП для каждого из действующих механизмов уплотнения. Фактор локального напряжения равен:

$$F = \left\{ \frac{c(\rho)}{c(\rho) + 4f(\rho)} \right\}^{0,5}, \quad (21)$$

где $c = 1 + \{k_1(1-\rho)\}^{k_2}$ и $f = k_3(1-\rho)^{k_4}$. Функции c и f были получены по кривым соответствующих экспериментальных данных на различных материалах. Величины k_1, k_2, k_3, k_4 , соответственно, равны 28,55, 1,678, 20,18 и 1,572. Далее, для использования подхода Эшби к описанию процессов горячего прессования мы умножили уравнения скорости уплотнения при ГИП на фактор локального напряжения F (21).

Во-вторых, известно, что при пропуске электрического тока через прессовку из порошка, как это происходит при FAST, в зонах межчастичных контактов могут возникать электрические разряды, вызывающие образование плазмы. А это, в свою очередь, приводит к очистке и активации поверхности спекаемых порошков [5]. Очистка поверхности частиц порошка приводит к образованию чистых границ зерен. Таким образом, необходимо учесть в модели горячего прессования при прямом пропуске переменного электрического тока очистку порошков во время прессования от поверхностных примесных оксидных пленок. Другими словами необходимо учесть, как будет влиять чистота порошка на процесс его уплотнения во время прессования. Влияние примесей может быть учтено, благодаря использованию примесно-модифицированных: объемной диффузии, зернограничной диффузии, поверхностной энергии и зернограничной энергии. Известно, что поверхностная энергия и зернограничная энергия уменьшаются с увеличением содержания примесей [7]. Уравнение для свободной поверхностной и зернограничной энергии разбавленных растворов представлено следующим образом:

$$\Delta\gamma_{\text{пов/згр}} = RT\Gamma_b^0 \left[1 - \frac{\Gamma_b}{\Gamma_b^0} \right], \quad (22)$$

где

$$\frac{\Gamma_b}{\Gamma_b^0} = \beta_b X_c, \quad (23)$$

$$\Gamma_b^0 = \frac{1}{N_a a_{\text{раст}}^2}, \quad (24)$$

где Γ_b^0 – количество раствора в моль/м², N_a – число Авогадро, β_b – коэффициент обогащения и X_c – концентрация в мольных долях сегрегированных частей. Изменения в поверхностной энергии и зернограничной энергии равны:

$$\gamma_{\text{пов}}^{\text{прим}} = \gamma_{\text{пов}} - \Delta\gamma_{\text{пов}}; \quad (25)$$

$$\gamma_{\text{згр}}^{\text{прим}} = \gamma_{\text{згр}} - \Delta\gamma_{\text{згр}}. \quad (26)$$

Объемная диффузия в материале с сегрегированными примесями:

$$D_v^* = D_v(1 + b_v X_c), \quad (27)$$

где b_v – коэффициент сегрегации. Фактор сегрегации может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от материала. Зернограничная диффузия изменяется как

$$D_b^* = D_b \left[1 + \left\{ b_v - \frac{2\Delta}{m_i} \times \left(\frac{a_{\text{рраст}}}{a_{\text{раст}}} \right)^2 \beta_b \right\} X_c \right], \quad (28)$$

где m_i – число эффективных слоев атомов примеси, $a_{\text{рраст}}$ – размер растворенного атома, $a_{\text{раст}}$ – размер атома растворителя, Δ – ширина границы зерна. Число слоев примеси на границе зерна равно:

$$m_i = \frac{\Delta}{a_{\text{раст}}}. \quad (29)$$

Вышеприведенные уравнения используются только для разбавленных систем. Для очень загрязненных систем дифференцированный подход основан на следующих соображениях. Так как диффузия зависит от изменения активационной энергии, следующие уравнения были использованы для оценки изменения активационной энергии и предэкспоненциального множителя. Изменения активационной энергии для граничной диффузии в зависимости от содержания примесей представляется как:

$$Q_b^{\text{прим}} = Q_b + N_a \alpha'_{\text{прим.1}} a_{\text{раст}}^2 + N_a \alpha'_{\text{прим.2}} a_{\text{раст}}^2 + \dots \quad (30)$$

в зависимости от примесной сегрегации на границе зерна [7]. Решеточная активационная энергия изменяется в зависимости от содержания примесей в теле или на поверхности как:

$$Q_v^{\text{прим}} = \frac{3}{2} Q_b^{\text{прим}} \quad (31)$$

или

$$Q_v^{\text{прим}} = Q_v + \Delta E, \quad (32)$$

где ΔE – активационная энергия, связанная с уменьшением миграции дефектов, благодаря торможению дефектов примесными атомами. Предэкспоненциальный множитель для диффузии в системе со следами примесей и в системе, загрязненной примесями, модифицируется следующим образом:

$$D_0^{\text{прим}} = D_0 \exp\left(\frac{-\delta S}{R}\right) \exp\left(\frac{-C}{RT}\right) \quad (33)$$

и

$$\delta S = \frac{\lambda \delta Q}{T_m} \left\{ \frac{T_m}{G_0} \times \frac{\partial G}{\partial T} \right\}, \quad (34)$$

где λ – константа, равная 0,55 для ГЦК и 1 для ОЦК материалов, G – модуль сдвига, T_m – температура плавления, δQ – разница в активационной энергии, благодаря присутствию примесей и $C \sim 10 \dots 50$ кДж/моль. Следует учитывать, что разрушение оксидных пленок и, таким образом, очистка частиц порошка происходит очень быстро на первой стадии прессования. В модели при $\rho_0 < \rho < 0,9$ переходили от диффузии в системе, загрязненной примесями, к системе с отсутствием примесей.

Кроме эффекта очистки порошка во время проведения процессов FAST, необходимо также учесть при моделировании изменение температуры, которое происходит благодаря воздействию электрического тока. Приложенное электрическое поле приводит к образованию градиента температур вокруг пор, благоприятно влияющего на уплотнение больших пор. На промежуточных стадиях спекания в области пор различного размера образуется градиент заряда. Электросопротивление увеличивается по мере увеличения концентрации эквивалентных линий. Плотность электрического тока выше в районе больших пор. Это создает градиент температуры, т. е. температура более высокая в районе больших пор. Райченко получил уравнение для расчета градиента температур ΔT в районе поры радиусом r [9]:

$$\Delta T \approx \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\Theta_0 T_0 E_0^2 \Delta \tau}{2C_m n}}, \quad (35)$$

где Θ_0 – электропроводность, C_m – теплоемкость, T_0 – начальная температура, E_0 – напряженность электрического поля, $\Delta \tau$ – время действия электрического поля, n – число электрических импульсов.

Таким образом, был составлен алгоритм процесса моделирования горячего прессования порошков ZrO_2 при прямом пропускании переменного электрического тока, основой которого является модель Эшби для ГИП. На рис. 1 представлена блок-схема программы для расчета относительной плотности прессованных материалов в зависимости от приложенного напряжения, температуры и времени.

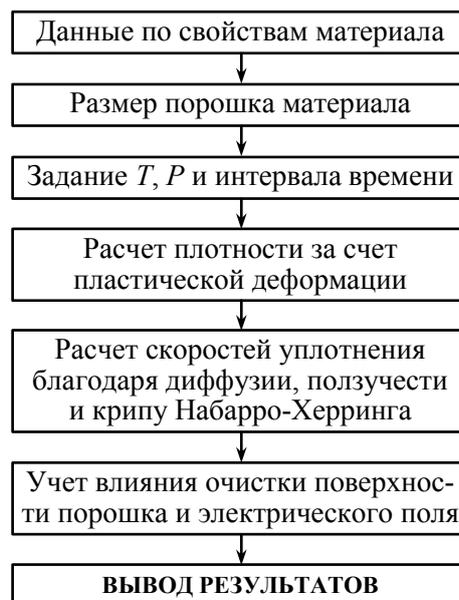


Рис. 1. Блок-схема программы расчета карт горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока

На рис. 2, 3 показаны результаты моделирования ГП при давлении прессования 45 МПа в диапазоне температур 1000–1300 °С порошков ZrO_2 3 и 0,3 мкм. При горячем прессовании при прямом пропускании переменного электрического тока порошков ZrO_2 с диаметром порошка, равным 0,3 мкм наблюдается увеличение отклонения моделируемых значений плотности от экспериментальных с уменьшением температуры прессования. Модель не «обеспечивает» достаточной плотности при данных режимах прессования. По-видимому, в данном случае, не удается в достаточной мере учесть влияние электрического тока в процессе прессования. FAST процесс может достаточно сильно изменить известные кинетические механизмы, что приведет к изменению соответствующих коэффициентов диффузии, энергий активации и характерных уравнений, описывающих указанные процессы.

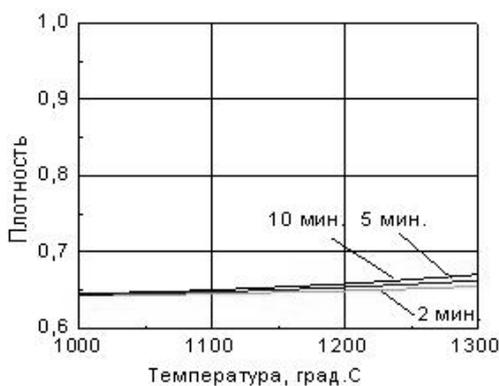


Рис. 2. Зависимость относительной плотности прессуемого порошка ZrO_2 (диаметр 3 мкм) от температуры горячего прессования при давлении $P = 45$ МПа

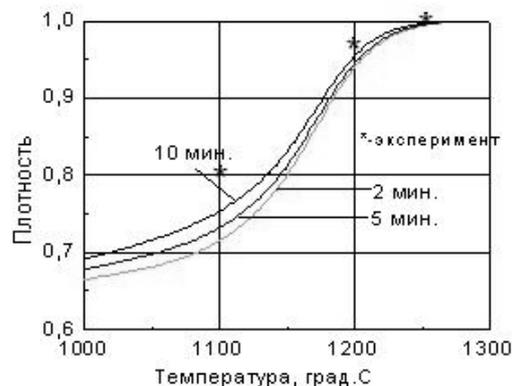


Рис. 3. Зависимость относительной плотности прессуемого порошка ZrO_2 (диаметр 0,3 мкм) от температуры горячего прессования при давлении $P = 45$ МПа

Приведенные карты (рис. 2, 3) горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока порошков ZrO_2 позволяют найти давление и температуру процесса ГП для получения относительной плотности $\rho = 1,0$ за различные времена. Карты ГП показывают значения давления и температуры, которые необходимы для порошка с размером частиц 0,3 мкм, чтобы получить из них заготовки с относительной плотностью 0,9 и 1,0. Хорошо видна тенденция изменения параметров ГП (P и T) в зависимости от времени процесса (1 мин., 5 мин. и 10 мин.). Сравнение рис. 2 и 3 показал характер изменения карт ГП в зависимости от размера частиц порошка. Видно, что для получения определенной величины относительной плотности за одинаковое время процессов необходимо увеличить давление и температуру ГП при использовании более крупнозернистых порошков.

Выводы. Проведено моделирование процесса ГП порошка ZrO_2 с размерами 3 мкм и 0,3 мкм. Построены карты горячего прессования при прямом пропускании переменного электрического тока порошков ZrO_2 . Определены оптимальные параметры (давление и температура) процесса ГП для получения максимальной плотности. Как показано и другими авторами [10], основным механизмом уплотнения при ГП порошков ZrO_2 является зернограничная диффузия.

Литература

1. Wilkinson, D.S. Pressure sintering by powder law creep [Text] / D.S. Wilkinson, M.F. Ashby // *Acta Metall.* – 1975. – Vol. 23, № 11. – P. 1277–1285.
2. Arzt, E. Practical Applications of Hot-Isostatic Pressing Diagrams [Text]: Four Case Studies / E. Arzt, M.F. Ashby, K.E. Easterling // *Met. Trans.* – 1983. – Vol. 14A, P 211–221.

3. Helle, A.S. *Hot-Isostatic Pressing Diagrams: New Developments [Text]* / A.S. Helle, K.E. Easterling and M.F. Ashby // *Acta Metall.* – 1985. – Vol. 33, № 12 – P. 2163–2174.
4. Besson, J. and Abouaf, M., *J. Am. Ceram. Soc.* – 1992, 75 (8). – P. 2165.
5. Schneider, J.A. *Surface Effects in Field-Assisted Sintering [Text]* / J.A. Schneider, J.R. Groza and M. Garcia // *Mater. Res.* – 2001. – 16 (1) – P. 286–292.
6. Anderson, K.R. *Surface Oxide debonding in field assisted powder sintering [Text]* / K.R. Anderson, J.R. Groza, M. Fendorf, C.J. Echer // *Mater. Sci. Engin.* – 1999. – A270. – P. 278–282.
7. Hondros, E.D. *Physical Metallurgy [Text]* / E.D. Hondros and M.P. Seah; ed. R.W. Cahn and P. Haasen. *Elsivier, Amsterdam, 1993.*
8. Kim, J.-Y. *Hot isostatic pressing of Y-TZP powder compacts [Text]* / J.-Y. Kim, S. Okamoto, N. Uchida, K. Uematsu. *J. Mater. Sci.* – 1990. – 25. – P. 4634–4638.
9. Райченко, А.И. *Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока [Текст]* / А.И. Райченко. – М.: *Металлургия, 1987.* – 128 с.
10. Kim, J.-Y. *Analysis of Hot Isostatic Pressing of Presintered Zirconia [Text]* / J.-Y. Kim, N. Uchida, K. Saito, K. Uematsu. *J. Am. Ceram. Soc.* – 1990. – 73 (4). – P. 1069–1073.

© Э.С. Геворкян, О.М. Мельник

Е.С. Геворкян, д.т.н., проф., О.М. Мельник, асп.

Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКУ ZrO_2

Складено алгоритм процесу моделювання гарячого пресування порошків ZrO_2 при прямому пропусканні змінного електричного струму, основою якого є модель Ешбі для ГП. Наведені карти гарячого пресування при прямому пропусканні змінного електричного струму порошків ZrO_2 дозволяють знайти тиск і температуру процесу ГП для отримання відносної щільності $\rho = 1,0$ за різний час.

Ключові слова: диоксид цирконію, нанопорошки, гаряче пресування.

E.S. Gevorkyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, O.M. Melnik, Post-graduate

Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov

MODELING OF THE HOT PRESSING OF ZrO_2 POWDER

The algorithm of the simulation of hot pressing ZrO_2 , which based on an Ashby model for the HIP was considered. And maps of hot pressing ZrO_2 powders designed and allow us to find the pressure and temperature of the process HP to obtain the relative density $\rho = 1,0$ at different times.

Keywords: zirconium dioxide, nanopowders, hot-pressing.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИМИ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Відомо, що найбільш ефективний метод обробки поверхні – це алмазне шліфування, але і відомо, що якість поверхні залежить і від якості підготовки поверхні ріжучих інструментів. Для підготовки поверхні цих унікальних за своїми фізико-механічними властивостями матеріалів, необхідно використовувати комбінований процес, заснований на безперервному електрохімічному управлінні робочою поверхнею струмопровідного кола в автономній зоні. Цей процес має досить широкі технологічні можливості, що дозволяє припускати наявність ще нерозкритих його потенційних можливостей.

Ключові слова: полікристалічні надтверді матеріали, полікристалічні надтверді матеріали на основі алмазу, лезові інструменти.

Вступ. Відомо, що питання якості підготовки робочих поверхонь ріжучих інструментів у матеріалобробці має першорядне значення. Це особливо відноситься до випадку використання лезових інструментів з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) — на основі алмазу (НПА) і твердих нітридів бору, володіють надзвичайно високою мікротвердістю й підвищеною крихкістю тому при їх заточуванні виникають значні зусилля різання, що призводять до появи сколів на ріжучих крайках і тріщин на робочих поверхнях.

На даний момент одним з найбільш використовуваних методів формоутворення лезових інструментів та інших виробів з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) залишається шліфування алмазними колами. У зв'язку з цим вишукування додаткових можливостей для підвищення ефективності цього процесу є актуальною проблемою.

Огляд останніх джерел і публікацій. Проблемою підвищення ефективності процесу алмазного шліфування ПНТМ займалися багато авторів [1, 2 та ін.]. Ними зроблений основоположний висновок про те, що найбільш перспективним методом алмазного шліфування цих унікальних за своїми фізико-механічними властивостями матеріалів слід вважати комбінований процес, заснуваний на безперервному електрохімічному управлінні робочою поверхнею струмопровідного кола (РПК) в автономній зоні. Це процес має досить широкі технологічні можливості, що дозволяє припускати наявність ще нерозкритих його потенційних можливостей.

Відомо, що питання якості підготовки робочих поверхонь різальних інструмент має в матеріалобробці першорядне значення. Це в особливій мірі ставиться до випадку використання лезових інструментів з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПСТМ) — на основі алмаза (СПА) і твердих нітридів бору, що володіють надзвичайно високою мікротвердістю й підвищеною крихкістю тому що при їхнім заточенні виникають значні зусилля різання, що приводять до появи відколів на ріжучих крайках і тріщин на робочих поверхнях (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Стан ріжучої кромки (а) лезового інструмента з алмаза і його робочої поверхні (б) після чорного шліфування (×50)

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Метою цієї роботи є підвищення ефективності комбінованого процесу алмазного шліфування ПНТМ шляхом встановлення її фізичних і технологічних особливостей стосовно кругів на металевих зв'язках зі шліфпорошка та мікропорошка.

Для практичної реалізації комбінованих процесів шліфування з автономним управлінням ріжучим рельєфом кругів має принципово важливе значення при вирішенні питання забезпечення стабілізації керуючого електрохімічного впливу на робочу поверхню круга [1, 2].

Постановка завдання. Аналіз можливої перспективи застосування для даних цілей струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмаза показавши, що їх ріжучий рельєф має великі перспективи для забезпечення технологічної стійкості в порівнянні з колами на основі шліфзерен. Це пояснюється, перш за все, незначною величиною висоти виступу зерен над рівнем зв'язки, завдяки чому ріжучий рельєф набуває більшу стійкість і реалізує свої позитивні якості.

Основний матеріал і результати. Для практичної реалізації комбінованих процесів шліфування з автономним керуванням ріжучим рельєфом кіл має принципово важливе значення питання забезпечення стабілізації керуючого електрохімічного впливу на робочу поверхню кола [1, 2, 3]. Одним з можливих варіантів вирішення цього завдання може бути спосіб, представлений на рис. 2.

Інтенсивність (швидкість) розчинення зв'язки круга, а, отже, і відновлення його ріжучих властивостей задається величиною сили струму в колі керування (ланцюг: мінус джерела живлення 3, катод 5, алмазний круг 1, струмознімач 4, плюс джерела живлення 3). Регулювання сили струму при незмінній напрузі джерела живлення здійснюється величиною міжелектродного зазору Δ (у результаті чого змінюється його електричний опір). Підведення катода 5 до круга 1 або відведення від нього (залежно від величини сили струму в колі керування) здійснюється автоматично за допомогою механізму переміщення 6 катода 5.

Для цього в складі відзначеного механізму є реверсивний конденсаторний електродвигун 7, який у свою чергу управляється блоком автоматики 8. Основними елементами цього блоку є джерело стабілізованого напруги 9, блок порівняння 10, електронний підсилювач 11.

Інформація про величину сили струму в ланцюзі керування знімається із шунта опором R у вигляді спадання напруги, значення якого залежить від сили струму. Ця напруга рівняється в блоці порівняння 10 зі стабілізованою напругою джерела 9. Результуючий сигнал підсилюється електронним підсилювачем і надходить на реверсивний електродвигун 7. Залежно від полярності цього сигналу двигун 7 буде або підводити катод 5 до кола 1, або відводити від нього. При цьому відбувається зміна величини МЭЗ, а, отже, і сили струму в колі керування.

Практика використання розроблених пристроїв підтвердила необхідність їх застосування й показала високу надійність їх роботи.

Установлено, що найбільший вплив на величину відколів ріжучих крайків лезових інструментів із ПСТМ є такі фактори, як зернистість круга Z , величина поперечної

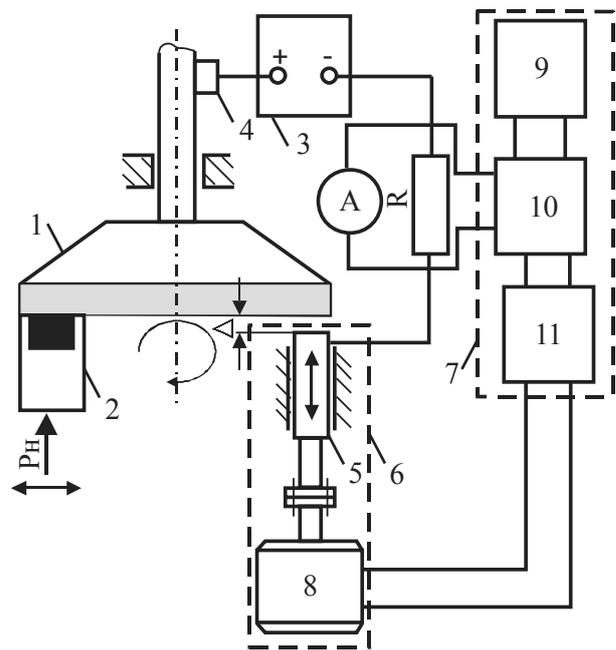


Рис. 2. Принципова схема комбінованого процесу шліфування з автоматичною стабілізацією сили струму в колі керування

подачі S (тиск у контакті p), кут загострення крайка β , концентрація алмазного круга й ін., що дає змогу одержати наступні результати:

- невеликий період припрацювання круга, що свідчить про малу чутливість різального рельєфу до зміни розумів обробки, які прагнуть дестабілізувати процес шліфування;

- закон розподілу мікропорошків на РПК повинний бути рівномірний, що буде сприяти істотному збільшенню кількості працюючих зерен, а, отже, збільшенню зносостійкості рельєфу в цілому;

- малі значення висоти ріжучого рельєфу круга повинні надати можливість ефективно управляти щільністю розподілу та статистичними характеристиками глибини залягання вершин зерен шляхом зміни параметрів хвилястості поздовжнього профілю поверхні зв'язки;

- найбільш ефективними в даному випадку повинні бути металеві покриття. Можливість незалежного дозованого електрофізико-хімічного видалення зв'язки круга і самого покриття може створити передумови для цілеспрямованого управління механізмом руйнування зерен, а, отже, і вихідними показниками процесу обробки;

- малі значення висоти ріжучого рельєфу круга забезпечують суттєво кращі умови реалізації електрофізико-хімічного впливу на зв'язку круга в зонах управління й шліфування завдяки можливості забезпечення малих значень міжелектродних зазорів, без чого реалізація технологічної стійкості була б дуже проблематичною. Поєднання таких чинників, як малі розміри зерен мікропорошку й можливість використання спрямованого дозованого керуючого впливу на РПК, буде сприяти досягненню максимально можливої точності її профілювання й у кінцевому результаті повинно дозволити вирішити проблему високоякісного формування прецизійних і особливо складнопрофільних лезових інструментів з ПНТМ.

Висновки

1. Чорнові стадії заточення ПСТМ лезових інструментів із ПСТМ алмазними кругами на основі шліфпорошків алмаза супроводжуються високою силовою й тепловою напруженістю в умовах зняття значних по величині припусків на обробку, у більшості випадків забезпечують низька якість обробки на макрорівні. Сюди в першу чергу слід віднести відколи ріжучих кромки, а також тріщини на робочих поверхнях ПСТМ.

2. Імовірнісне прогнозування вихідних показників в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів на базі використання концепції статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій, адаптованої стосовно до процесу формування лезових інструментів із ПСТМ, показало, що в умовах чорнового шліфування ймовірність появи відколів менш припустимої величини мала й перебуває у межах п'яти відсотків.

3. Одним з ефективних шляхів більш повного використання ріжучого ресурсу зерен дрібнозернистих кругів на основі алмазних шліфпорошків можна вважати комплексний підхід до вибору характеристики алмазного кола в керованому процесі шліфування ПСТМ із урахуванням межі міцності ПСТМ на стиск. Це одночасно дозволяє звести до мінімуму можливість тріщиноутворення й забезпечити стабільність стану ріжучих кромки.

Таким чином, за результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про те, що використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмаза для чистової обробки має ряд переваг у порівнянні з кругами на основі алмазних шліфпорошків, що дозволить розв'язати проблему якісного формування ріжучих кромки лезових інструментів із ПСТМ.

4. 3D моделювання ПДВ ріжучої кромки лезового інструмента із ПСТМ, що має у своєму складі металеві включення, підтвердило визначальну роль коефіцієнта їх лінійного розширення, а також розмірів і кількості цих включень у процесі формування ріжучих кромки. При цьому великі відколи на ріжучих кромках можуть бути результатом випадання блоку алмазних зерен, охоплених металевим зв'язуванням, а ймовірність настання цієї події зростає в міру збільшення температури у зоні шліфування.

5. Установлено, що завдяки незначній різниці висоти зерен на робочій поверхні струмопровідний круг на основі мікропорошків алмаза має гарні передумови для забезпе-

чення стійкості вихідних показників обробки при якісному формоутворенні лезових інструментів із ПСТМ.

6. Доведено, що однією з найважливіших передумов вирішення проблеми формоутворення прецизійних лезових інструментів із ПСТМ при максимальному використанні ріжучого ресурсу зерен мікропорошків алмаза є використання на них рельєфних товстошарових металевих покриттів.

7. Ефективність використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмаза з рельєфними товстошаровими покриттями для чистового формоутворення лезових інструментів із ПСТМ доведена експериментально досягненням зниження значення питомої витрати алмазів на рівні кругів на основі алмазних шліфзерен.

Література

1. Грабченко, А.И. *Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Грабченко Анатолий Иванович.* – Х., 1995. – 59 с.
2. Грабченко, А.И. *Повышение производительности шлифования ПСТМ с управлением режущим рельефом круга [Текст] / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов // Сверхтвердые материалы.* – 1982. – № 5. – С. 34–37.
3. Федорович, В.А. *Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Федорович Владимир Алексеевич.* – Х., – 2002. – 466 с.
4. Хрульков, В.А. *Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении [Текст] / В.А. Хрульков, А.Я. Головань, А.И. Федотов.* – М.: Машиностроение, 1977. – 223 с.
5. Резников, А.Н. *Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст]: справ. / А.Н. Резников, Е.И. Алексенцев, Я.И. Барац и др.; под ред. А.Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
6. *Синтетические алмазы в машиностроении [Текст] / В.Н. Бакуль, Б.И. Гинсбург, Л.Л. Мишинаевский и др.; под ред. В.Н. Бакуля.* – К.: Наукова думка, 1976. – 352 с.
7. Гаврилов, А.Н. *Точность производства в машиностроении и приборостроении [Текст] / А.Н. Гаврилов, Н.А. Бородачев, Р.М. Абдрашитов и др.; под ред. А.Н. Гаврилова.* – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
8. Новиков, Н.В. *Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов [Текст] / Н.В. Новиков, А.Л. Майстренко, В.Н. Кулаковский – К.: Наук. думка, 1993. – 220 с.*
9. Яцерицын, П.И. *Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов [Текст] / П.И. Яцерицын, В.Д. Дорофеев, Ю.А. Пахалин.* – Минск: Наука и техника, 1981. – 232 с.
10. Доброскок, В.Л. *Модификация законов распределения при статистическом моделировании абразивно-алмазных инструментов [Текст] / В.Л. Доброскок, Я.Н. Гаращенко, В.И. Воронков // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. НТУ «ХПИ».* – Вып. 61. – Х., 2002. – С. 51–59.
11. Пыжов, И.Н. *Научные основы формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Пыжов Иван Николаевич.* – Х., – 2009. – 405 с.

© І.Ю. Боцман, А.В. Калашников

И.Ю. Боцман, студентка, А.В. Калашников, к.т.н., доц.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СВЕРХТВЕРДЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Известно, что наиболее эффективный метод обработки поверхности – это алмазное шлифование, но и известно, что качество поверхности зависит и от качества подготовки поверхности режущих инструментов. Для подготовки поверхности этих уникальных за своими физико-механическими свойствами материалов, необходимо использовать комбинированный процесс, основанный на непрерывном электрохимическом

управлении рабочей поверхностью токопроводящего кола в автономной зоне. Этот процесс имеет довольно широкие технологические возможности, что позволяет предполагать наличие еще нераскрытых его потенциальных возможностей.

Ключевые слова: поликристаллические сверхтвердые материалы, поликристаллические сверхтвердые материалов на основе алмаза, лезвийный инструмент.

I.Yu. Botsman, student, A.V. Kalashnikov, Ph.D., Associate Professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

COMBINED EFFICIENCY OF DIAMOND GRINDING POLYCRYSTALLINE SUPERFIRM MATERIALS

It is known that the most effective method of surface treatment, diamond grinding, but it is known that the quality of the surface depends on the quality of surface preparation of cutting tools. For the surface preparation of these unique for its physical and mechanical properties of materials, you must use the combined process facilities in continuous electrochemical control surface conductive coke in the autonomous zone. This process has a pretty wide technological possibility that allows you to suggest a still undisclosed, his potential.

Keywords: polycrystalline super hard materials, polycrystalline diamond on superhard materials, edge tools.

УДК 621.914.1

В.А. Гайдар, начальник отдела программной обработки

ПАО «Полтавский турбомеханический завод», концерн «Укрросметалл», г. Полтава

С.Г. Ясько, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ КОНЦЕВЫМИ И ТОРЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ С ПОСТОЯННЫМ ВО ВРЕМЕНИ КОЛИЧЕСТВОМ СНИМАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Приведена методика расчета по программе «Turbo_Profile.Section_30» зависимостей между количеством снимаемого металла в единицу времени, параметрами фрезы, углом атаки фрезы при обработке, шагом между строками обработки, толщиной снимаемого слоя и режимами резания. Такой расчет необходим при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ при режиме обработки с постоянным во времени объемом снимаемого материала заготовки для получения стабильного (по нагрузке на инструмент) и оптимального (по времени обработки) фрезерования детали. Указанный режим фрезерования обладает высокой эффективностью при черновой обработке, когда толщина снимаемого слоя может существенно изменяться.

Ключевые слова: турбинная лопатка, фрезерование, режим обработки, технология, программа, станок, управление.

Цели и задачи. Повышение производительности механообработки при стабильном обеспечении требуемого качества поверхности детали является приоритетным направлением современного машиностроения. Стабильность качества достигается внедрением новых и более эффективных технологических процессов.

В современном машиностроении большое значение имеют такие критерии оптимизации как производительность и себестоимость, которые включают в себя зависимости времени обработки и стойкости инструмента от параметров резания. В результате оптимизации по этим критериям находятся условия, которые обеспечивают оптимальные значения данных критериев.

В работе рассмотрен явно первый критерий оптимизации и косвенно – второй, так как стойкость инструмента существенно повышается при режиме обработки с постоянной величиной съема материала.

Для расчета оптимальных (по качеству и времени обработки концевой или торцевой фрезой) технологических параметров при заданной заранее величине гребешка H (рис. 1) и площадей (а значит и объемов) съема материала $S1$, $S2$ (рис. 2 и рис. 3) необходимо знать уравнения кривых, описывающих следы фрезы в металле при фрезеровании.

В статье [1] были получены уравнения таких кривых (1) (кривых Персея) и их производных (2) в параметрической форме:

$$\begin{cases} x(t) = x + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \cos(t) + \frac{r \cdot \sin(at)}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + \sin^2(at)}} \\ y(t) = y + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \sin(at) \cdot \sin(t) + \frac{r}{\sqrt{1 + \sin^2(at) \cdot \operatorname{ctg}^2(t)}} \end{cases} \quad \text{при } t \in [0, 2\pi], \quad (1)$$

$$\begin{cases} x(t)' = \left(r - \frac{D}{2}\right) \cdot \sin(t) - r \cdot \sin(at) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + \sin^2(at)}}\right)^3 \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\cos^2(t)} \\ y(t)' = \left(r - \frac{D}{2}\right) \cdot \sin(at) \cdot \cos(t) + r \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2(at) \cdot \operatorname{ctg}^2(t)}}\right)^3 \cdot \frac{\operatorname{ctg}(t)}{\sin^2(t)} \end{cases} \quad \text{при } t \in [0, 2\pi], \quad (2)$$

где D – диаметр фрезы; r – радиус скругления режущей кромки фрезы; at – угол атаки фрезы; Z – направление движения фрезы (рис. 4); t – эксцентрический угол внешней эквидистанты эллипса; x_0, y_0 – координаты центра фрезы (точка пересечения оси фрезы и плоскости, проходящей через центры окружностей, образованных кромками). Здесь: $(D/2 - r)$ – большая полуось, $(D/2 - r) \cdot \sin(at)$ – малая полуось эллипса, полученного проецированием на фронтальную плоскость окружности (перпендикулярную Z – общему направлению движения фрезы), проходящей через центры дуг окружностей скругления кромок (радиусом r). Внешняя эквидистанта данного эллипса (на величину r) и есть искомая кривая.

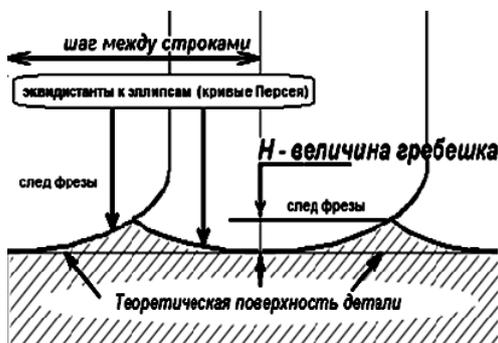


Рис. 1. Схема образования «гребешков»

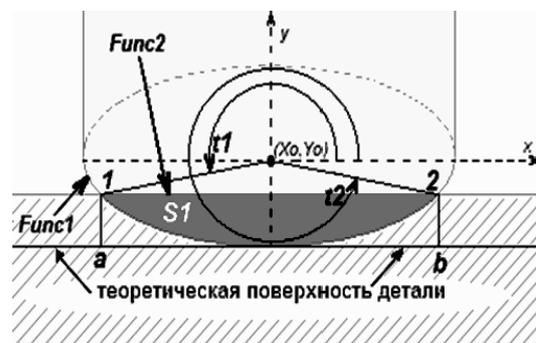


Рис. 2. Расчетная схема определения площади сечения срезаемого слоя $S1$

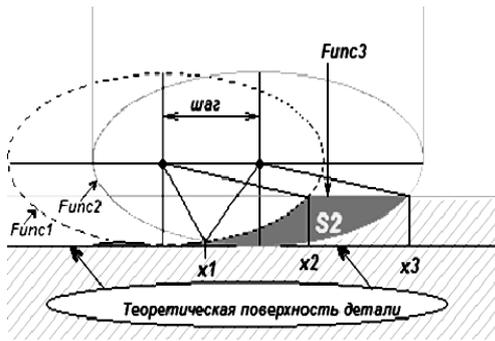


Рис. 3. Расчетная схема определения площади сечения срезаемого слоя S2

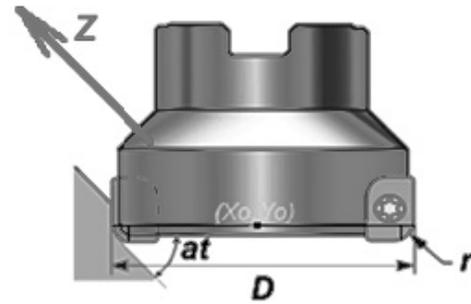


Рис. 4. Технологические параметры фрезы и обработки

Рассмотрим (рис. 2) декартову систему координат XY с центром в точке (x_0, y_0) .

Площадь снимаемого материала при первом проходе фрезы $S1(z)$ (на рис. 2 выделена темной заливкой) в сечении с координатой z определяется из выражения:

$$S1(z) = \int_a^b (Func2(x, z) - Func1(x)) dx = \int_a^b Func2(x, z) dx - \int_a^b Func1(x) dx, \quad (3)$$

где $y = Func2(x)$ – функция, определяющая геометрию заготовки в текущем сечении (рис. 2), а $y = Func1(x)$ – функция, определяющая кривую Персея (1) в декартовых координатах.

Пределы интегрирования a и b находим из выражений: $a = x(t1)$; $b = x(t2)$, где $x(t)$ – зависимость из (1), а $t1$ и $t2$ находятся численным итерационным методом половинного деления как корни определяющей функции, следующего вида:

$$Def_Func1(t) = Func2(x(t), z) - y(t),$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – зависимости из (1).

Определенный интеграл $\int_a^b Func1(x) dx$ из выражения (3) преобразуем к виду:

$$\int_a^b Func1(x) dx = \int_{t1}^{t2} y(t) x'(t) dt, \quad (4)$$

где $y(t)$ и $x'(t)$ – зависимости из (1) и (2) соответственно.

Учитывая зависимости (1), (2) и (3) выражение (3) приобретает вид:

$$\begin{aligned} S1(z) &= \int_a^b Func2(x, z) dx - \int_{t1}^{t2} y(t) x'(t) dt = \\ &= \int_a^b Func2(x, z) dx - \int_{t1}^{t2} \left(y + \left(\frac{D}{2} - r \right) \cdot \sin(at) \cdot \sin(t) + \frac{r}{\sqrt{1 + \sin^2(at) \cdot \text{ctg}^2(t)}} \right) \times \\ &\quad \times \left(\left(r - \frac{D}{2} \right) \cdot \sin(t) - r \cdot \sin(at) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\text{tg}^2(t) + \sin^2(at)}} \right)^3 \cdot \frac{\text{tg}(t)}{\cos^2(t)} \right) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

При плоскопараллельном движении фрезы в направлении Z и постоянной (вдоль Z) функции глубины съема, т. е. при $\partial Func2(x, z) / \partial z = 0$, а значит и $\partial S1(z) / \partial z = 0$ количество снятого материала $V1$ при движении фрезы из точки $z1$ в точку $z2$ определяется простой формулой:

$$V1 = S1(z) \cdot Z2 - S1(z) \cdot Z1, \quad (6)$$

где $S1(z)$ – постоянная величина площади съема (5).

Количество снятого материала в единицу времени в данном случае будет равно:

$$V1 = S1(z) \cdot F, \quad (7)$$

где $S1(z)$ – величина площади съема (5), а F – скорость подачи фрезы.

Для реализации режима фрезерования с постоянным значением количества снимаемого материала $V1$ в соответствующем месте управляющей программы для станка с ЧПУ нужно установить скорость подачи равную: $F = V1/S1(Z)$.

При плоскопараллельном движении фрезы в направлении Z и переменной (вдоль Z) функцией глубины съема, т. е. при $\partial Func2(x, z)/\partial z \neq 0$, а значит и $\partial S1(z)/\partial z \neq 0$ количество снятого материала $V1$ при продвижении фрезы из точки $z1$ в точку $z2$ определяется выражением:

$$V1 = \int_{z1}^{z2} S1(z) dz, \quad (8)$$

где $S1(z)$ – переменная величина площади съема (5).

На практике зависимость $S1(z)$ (5) в общем (аналитическом) виде получить, как правило, сложно. Поэтому значения функции $S1(z)$ можно вычислить в некоторых контрольных сечениях и произвести линейную или нелинейную аппроксимацию, после чего воспользоваться формулой (8).

Площадь съема материала при следующих проходах фрезы $S2$ (на рис. 3 отмечена темной заливкой) определяется аналогично:

$$S2(z) = \int_{x1}^{x2} (Func1(x) - Func2(x)) dx + \int_{x2}^{x3} (Func3(x, z) - Func2(x)) dx, \quad (9)$$

где $y = Func2(x)$ – функция, определяющая текущую кривую Персея (1) в декартовых координатах; $y = Func1(x)$ – функция, определяющая предыдущую кривую Персея (1) в декартовых координатах; $y = Func3(x)$ – функция, определяющая геометрию заготовки в текущем сечении (рис. 3).

Предел интегрирования $x1$ находится посередине между центрами кривых $y = Func1(x)$ и $y = Func2(x)$ и определяется полусуммой абсцисс точек их центров. Можно видеть, что $t11$ и $t12$ как эксцентрические углы для $Func1$ и $Func2$ в выражении (1) определяются по известному $x1$ из условия пересечения $Func1$ и $Func2$.

Пределы интегрирования $x2$ и $x3$ определяются аналогично первому варианту расчета:

$x2 = x(t21)$, где $x(t)$ – зависимость (1) для $Func1$, а $t21$ находится методом половинного деления из условия пересечения $Func1$ и $Func3$.

$x3 = x(t3)$, где $x(t)$ – зависимость (1) для $Func2$, а $t3$ находится из условия пересечения $Func2$ и $Func3$.

Аналогично $t21$ и $t22$ как эксцентрические углы для $Func1$ и $Func2$ в выражении (1) определяется по известному $x2$ из условия пересечения $Func1$ и $Func3$, а также $Func2$ и $Func3$ соответственно.

Для выражения (9) сделаем преобразования:

$$\int_{x1}^{x2} Func1(x) dx = \int_{t11}^{t21} y_1(t) x_1'(t) dt, \quad (10)$$

где $y_1(t)$ и $x_1'(t)$ – зависимости из (1) и (2) соответственно для $Func1$

$$\int_{x1}^{x2} Func2(x) dx = \int_{t12}^{t22} y_2(t) x_2'(t) dt, \quad (11)$$

$$\int_{x2}^{x3} Func2(x) dx = \int_{t22}^{t3} y_2(t) x_2'(t) dt, \quad (12)$$

где $y_2(t)$ и $x_2'(t)$ – зависимости из (1) и (2) соответственно для $Func2$.

Отсюда, с учетом (10), (11) и (12) выражение (9) принимает вид:

$$S2(z) = \int_{t11}^{t21} y_1(t)x'_1(t)dt - \int_{t12}^{t22} y_2(t)x'_2(t)dt + \int_{x2}^{x3} Func3(x, z)dx - \int_{t22}^{t3} y_2(t)x'_2(t)dt . \quad (14)$$

Подставив в (14) выражения для $y_1(t)$ и $x'_1(t)$ из (1) и (2) для $Func1$, а также выражения для $y_2(t)$ и $x'_2(t)$ из (1) и (2) для $Func2$ можно получить окончательную (и очень громоздкую) формулу для функции $S2(z)$.

Все остальные формулы, определяющие количество снимаемого материала $V2$ при последующих проходах фрезы, абсолютно идентичны уже рассмотренным выше формулам для первого прохода:

$$V2 = S2(z) \cdot Z2 - S2(z) \cdot Z1, \quad (15)$$

$$V2 = S2(z) \cdot F, \quad (16)$$

$$V2 = \int_{z1}^{z2} S2(z)dz . \quad (17)$$

Полученные зависимости между такими технологическими параметрами как: D – диаметр фрезы, r – радиус скругления режущей кромки фрезы, at – угол атаки фрезы, F – скорости подачи фрезы, S и V – площади и объема снимаемого материала, а также функциями, описывающими геометрию заготовки, были использованы при создании программного модуля «Turbo_Profile.Section_30».

При использовании данной программы, технолог-программист при задании исходных данных для обработки детали фрезами указанного вида имеет возможность:

1. Задав параметры фрезы, угол атаки, шаг между строками фрезерования, функции глубины съема материала и скорость подачи определить количество снимаемого материала в единицу времени для первого и последующих проходов фрезы.

2. Задав параметры фрезы, угол атаки, шаг между строками фрезерования, функции глубины съема материала и количество снимаемого материала в единицу времени определить необходимую для этого скорость подачи для первого и последующих проходов фрезы.

3. Определить угол атаки или шаг между строками таким образом, чтобы при заданной скорости подачи количество снимаемого материала в единицу времени было определенной величины.

Все расчеты можно произвести как для первого, так и для последующих проходов фрезы.

Выводы. Применение программного модуля «Turbo_Profile.Section_30» позволяет разработчику управляющих программ уменьшить машинное время обработки, без снижения качества рабочей поверхности за счёт близких к оптимальным технологическим параметрам. Например, при обработке турбинной лопатки (см. рис. 5) машинное время обработки снижено на 10...15%. Повышение производительности обработки, при одновременном обеспечении требуемого качества обрабатываемой поверхности и стойкости инструмента, зависит от многих параметров и, являясь достаточно сложной задачей, требует дальнейших исследования.

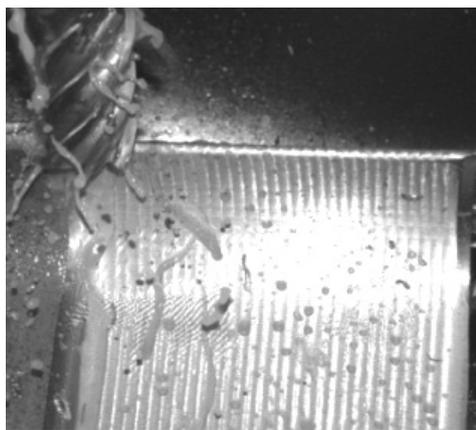


Рис. 5. Вид обработанной рабочей поверхности турбинной лопатки

Литература

1. Гайдар, В.А. Автоматический расчет технологических параметров фрезерной обработки турбинных лопаток [Текст] / В.А. Гайдар // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4 (10). – С. 54–56.

2. Савелов, А.А. *Плоские кривые: Систематика, свойства, применения [Текст]* / А.А. Савелов. – М.: Физматгиз, 1960. – 293 с.
3. Марчук, Г.И. *Методы вычислительной математики [Текст]* / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1989. – 390 с.
4. Корн, Г. *Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст]* / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 408 с.
5. Бахвалов, Н.С. *Численные методы [Текст]* / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 283 с.
6. Пиеничный, Б.Н. *Численные методы в экстремальных задачах [Текст]* / Б.П. Пиеничный, Ю.М. Данилин. – М.: Наука, 1975. – 320 с.

© В.А. Гайдар, С.Г. Ясько

В.О. Гайдар, начальник відділу програмної обробки

ПАТ «Полтавський турбомеханічний завод», концерн «Укрросметал», м. Полтава

С.Г. Ясько, ст. викл.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК КІНЦЕВИМИ І ТОРЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ З ПОСТІЙНОЮ У ЧАСІ КІЛЬКІСТЮ МАТЕРІАЛУ, ЩО ЗНИМАЄТЬСЯ

Наводиться методика розрахунку у програмному модулі «Turbo_Profile.Section_30» залежності між: кількістю знятого металу за одиницю часу, параметрами фрези, кутом атаки фрези при обробці, кроком між проходами обробки, товщиною шару, що зрізується, та режимами різання. Такий розрахунок необхідний при підготовці керуючих програм для верстатів з ЧПК при режимі обробки з постійним у часі об'ємом знятого матеріалу заготовки для отримання стабільного (по навантаженню на інструмент) та оптимального (за часом обробки) фрезерування деталі. Вказаний режим фрезерування є ефективним при чорновій обробці деталі, коли товщина знятого шару може суттєво змінюватись.

Ключові слова: турбінна лопатка, фрезерування, режим обробки, технологія, програма, верстат, керування.

V.A. Gaidar, Head of the Department of Software Processing

PJSC «Poltava Turbomechanical plant», concern «Ukrrosmetall», Poltava

S.G. Yasko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk

CALCULATION OF OPTIMUM CONDITIONS FOR MILLING END MILLS AND FACE MILLS FOR CNC MACHINES WITH A CONSTANT AMOUNT OF CUT MATERIAL PER UNIT OF TIME

Methodology is given in calculating software module «Turbo_Profile.Section_30» relationship between: the number of captured metal per unit time, the parameters of cutter, angle cutter attack in the processing step of processing between passes, thickness of layer, trimmed and cutting conditions. This calculation requires the preparation of programs for CNC machines for processing mode with time constant volume of footage for sustainable harvesting (the load on the tool) and optimal (time processing) milling parts. The specified mode is effective for milling roughing treatment details when skim layer thickness can vary significantly.

Keywords: turbine shoulder-blade, milling, mode of treatment, technology, program, machine-tool, management.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены современные направления исследовательских работ, направленных на достижение высоких показателей производительности алмазного шлифования в сочетании с сохранением качественных характеристик обработанных поверхностей.

Ключевые слова: алмазное шлифование, высокая производительность, комбинированные технологии, инструментальные материалы, качество поверхности.

Постановка проблемы. В промышленно развитых странах для металлообработки преимущественно используется твердосплавный инструмент (от 50 % в США и Германии до 70 % в Японии) [1]. Прогнозируется, что в ближайшие десятилетия в мировом производстве доля использования твердых сплавов для режущих инструментов в среднем составит 40 %. Согласно [2] незначительная составляющая высокотехнологических инструментов из твердых сплавов в отечественном экспорте свидетельствует об низких объемах его производства и недостаточном уровне качества инструмента, не соответствующем требованиям иностранных потребителей. Возникает необходимость постепенного обновления производства путем внедрения новых и усовершенствования старых технологий изготовления твердосплавных инструментов с более высокими показателями качества.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время производительность шлифования кругами из СТМ вольфрамowych, маловольфрамowych и безвольфрамowych, углеродистых материалов и керамики инструментального назначения не превышает 1000–3000 мм²/мин. В соответствии же с современными требованиями к станочным системам и промышленным технологиям механообработки этот показатель должен достигать 3000–5000 мм²/мин [3]. На современных этапах развития методик шлифования достижение высокой производительности сопровождается ухудшением качества обработанной поверхности.

Формулирование целей статьи. Учитывая необходимость расширения технологических возможностей шлифования, возникает необходимость проведения мониторинга современных тенденций развития данного процесса.

Изложение основного материала. В основе всех процессов снятия припуска лежат явления, связанные с упруго-пластической деформацией поверхностного слоя обрабатываемых материалов. Чем выше жесткость зерен, тем глубже зона деформации материала. Но чрезмерно интенсивная деформация поверхностного слоя приводит к появлению большого числа дефектов. Поэтому, оптимальной среди существующих методик шлифования будет считаться та, которая совмещает в себе наиболее рациональное соотношение продуктивности обработки и качества получаемых изделий.

Основными объектами исследований в ходе разработки новых технологий алмазного шлифования являются конструктивные особенности инструмента, новые связи, модифицированные зерна, составы и способы подачи в зону резания смазующе-охлаждающих жидкостей (СОЖ), новые методы правки кругов, применение комбинированных технологий.

1. Конструктивные особенности кругов. Одним из перспективных технических решений является применение вибрационно-прецессионного шлифования кругами из сверхтвердых материалов [4], которое позволяет в значительной степени уменьшить мощность обработки. Также с целью повышения производительности обработки применяются круги с переменной характеристикой рабочего слоя [5] и многослойные круги [6],

круги с изнашиваемым корпусом [7], комбинированный шлифовальный инструмент [8]. Использование прерывистого шлифования позволяет уменьшить влияние высоких температур на структуру полученных после обработки поверхностей [5].

2. Связка круга. Одной из новых разработок являются керамические связки на основе силикатных стекол, а также продуктов глубокой деструкции силоксановых полимеров [9]. Высокая открытая пористость (объемная доля пор 35–60 %) в них сочетается с физико-механическими свойствами, характерными горячепрессованным низкопористым композитам на основе стекол. Это позволяет сочетать высокую скорость съема обрабатываемого материала и качество обработанной поверхности, характерное для малопродуктивных доводочных операций. В качестве абразива в данных связках могут использоваться КНБ, алмазы, электрокорунд, карбид кремния и карбид бора.

В институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля в качестве связки применены неорганические полимеры силоксанового строения, что позволило получить абразивные композиты, структура которых обеспечивает сочетание преимуществ, свойственных кругам на керамических и полимерных связках. По износостойкости, равномерности изнашивания рабочего слоя, качеству обрабатываемых поверхностей в условиях высокопроизводительного шлифования на современных станках с ЧПК такие круги не уступают аналогичным фирмы «Gabius», Швеция [10].

3. Зерна. Термостойкость алмазных порошков повышается путем нанесения покрытий из оксидов и хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов, отличающихся повышенной смачиваемостью алмазов. Максимальное повышение термостойкости достигается при трехкратном покрытии борным ангидридом (B_2O_3) [11]. Покрытия хорошо себя проявляют в кругах с металлической связкой.

Проводились исследования по избирательному механическому дроблению массы шлифпорошков на универсальной роторной дробилке и вихревом аппарате с последующей ситовой классификацией на виброситах по специальным программам [12].

На основе математических моделей разработаны компьютеризированные методики определения статической и динамической прочности шлифпорошков синтетических алмазов без их разрушения [13]. Разработан и промышленно освоен новый адгезионно-магнитный способ сортировки (АМС) алмазных порошков по прочности [14].

4. СОЖ. В значительной степени на процесс шлифования влияет смазочно-охлаждающая жидкость [15]. Используются СОЖ как на водной основе [16], и так и на масляной [17]. Применяются различные способы подачи СОЖ в зону обработки, наиболее эффективными являются струйно-напорный внезонный (СНВС), гидроаэродинамический и ультразвуковой [18].

В ряде случаев, когда высокая температура обработки усугубляется невозможностью применения СОЖ (либо применение СОЖ не обеспечивает достижения требуемого технологического эффекта) с целью снижения температуры и уменьшения шероховатости поверхности применяют твердые технологические смазки (ТТС) [19] и пластичные смазочные материалы (ПСМ). Применение ТТС позволяет увеличить работу резания, и увеличивает стойкость инструмента примерно в 3 раза, но в настоящее время, вследствие ограниченной охлаждающей и моющей способности, а также увеличения нормальной составляющей силы резания, ТТС и ПСМ не нашли широкого применения.

5. Правка алмазных кругов. Проникновение шлама в пространство между алмазными зернами и в поры шлифовального круга достигает величины порядка 0,3 мм [18]. Зачастую, существующие методы правки приводят к избыточной потере алмазонасного слоя. Эта потеря максимальна в случае применения непрерывной правки, призванной стабилизировать режущую способность шлифовального круга. Одна из разработок, целью которой было устранение указанной проблемы — Diamond Dressing System (DDS) — правка алмазным правящим роликом под управлением системой контроля CNC, что обеспечивает съем материала на глубину нескольких микрон, сохраняя развитость рельефа [20].

Так же применялся компромиссный вариант: непрерывная очистка роликом в сочетании с периодической правкой для восстановления геометрических параметров инструмента с целью избегания возникновения автоколебаний в технологической системе. Также существуют технологии очистки рабочей поверхности круга струей порошка или абразивной суспензией под давлением. К недостаткам данного способа относятся повышенный расход порошка и износ технологической оснастки [18].

С целью уменьшения интенсивности засаливания инструмента также используется СОЖ с микропорошком окиси алюминия.

Применялась механическая очистка абразивным брусками, но ее недостатком является невозможность удаления с зерен налипавшего металла и неодинаковые условия очистки зерен, выступающих на разную высоту над уровнем связки.

Минимальное воздействие на микрорельеф зерен оказывает правка лазером [18].

Во время правки, силы, что приводят к профилированию поверхности круга, вжимают зерна в связку. Поэтому круги на органической связке не могут правиться алмазными роликами. Эта проблема решена разработкой Q-Flute+Dress структуры для правящих роликов в Нордштатском технологическом центре (NTC) Saint-Gobain Diamantwerkzeuge [21]. Были также разработаны параметры правки новыми роликами.

Продолжаются исследования взаимосвязи параметров правки и подбора абразива в кругах на керамической связке [22].

6. Использование комбинированных технологий. Материалы таких международных конференций, как «1-st International Diamond Conference, 20-21 October, 2005, Barcelona, Spain» и «2-nt International Diamond Conference, 19-21 April, 2007, Rome, Italy» показывают, что развитие процессов алмазно-абразивной обработки с целью повышения их эффективности заключается во внедрении комбинированных технологий [23]. К ним относятся ELID Grinding Process, Combining EDM and Grinding, electrodischarge dressing. Шлифование с наложением электрического тока в первую очередь ориентировано на повышение производительности обработки. Направленный электроэрозионный процесс обеспечивает существенное повышение производительности обработки: безвольфрамовых твердых сплавов — с 400–600 мм³/мин до 1200–1800 мм³/мин, оксидно-карбидной керамики — с 300–500 мм³/мин до 900–1200 мм³/мин. Износостойкость кругов из СТМ повышается до двух раз. [24]. Различные способы электроалмазного шлифования используют импульсные источники технологического тока, источники постоянного и переменного тока. Энергия подается в зону резания, в автономную зону и комбинированно. Электроалмазное шлифование обеспечивает постоянство развитости рабочей поверхности шлифовального круга, понижение сил резания, дает возможность управлять геометрическими параметрами инструмента, сокращает время обработки. Исследованиями в этом направлении занимаются такие ученые, как Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А., Беззубенко Н.К., Матюха П.Г., Полтавец В.В., Любимов В.В, Могильников В.А, Чмыр М.Я., Худобин Л.В., Унянин А.Н. и многие другие.

С развитием электроразрядной правки кругов начались исследования и развитие новых высокопродуктивных связок кругов, пригодных к работе с EDT (electro-discharge trueing) Результаты этих исследований показывают, что понижение точки плавления и теплопроводности новой металлической связки «MB SPARK» являются важными факторами. EDT системы, что используют круги на ее основе, имеют повышенную продуктивность обработки [25]. По утверждению работников Лаборатории станков и технологии производства (WZL) Ахенского университета (Германия), шлифование двойным диском DDG (double disk grinding) в сочетании с EDT обработкой позволяет достичь более высокой точности обработки при меньшей стоимости операции благодаря тому, что при этом методе заготовка обрабатывается с обеих сторон одновременно.

Выводы. На сегодняшний день существует множество направлений развития научных исследований в области алмазного шлифования инструментальных материалов,

как в нашей стране, так и за рубежом. Данный вид обработки все еще имеет большой запас открытых вопросов. В условиях возрастающих требований к производительности обработки существует множество путей ее обеспечения с сохранением качества поверхностей обработанных деталей.

Литература

1. Новіков, М.В. Стан і перспективи розвитку інструментального напрямку в технотурі промисловості України [Текст] / М.В. Новіков // Перспективні напрямки науково-технологічного та інноваційного розвитку України. – К.: Фенікс, 2006. – С. 141–148.
2. Казьміна, О.П. Аналіз динаміки експорту, імпорту та внутрішнього виробництва інструментів верстатних в Україні [Текст] / О.П. Казьміна // Інструментальний світ. – 2007. – № 4 (36) – С. 31–34.
3. Шепелев, А.А. Вибрационно-прецессионное шлифование инструментальных материалов кругами из СТМ: часть 1. Кинематика процесса вибрационно-прецессионного шлифования [Текст] / А.А. Шепелев // Інструментальний світ. – 2004. – № 2 (22) – С. 13–15.
4. Шепелев, А.А. Вибрационно-прецессионное шлифование инструментальных материалов кругами из СТМ: часть 2. Закономерности образования микрорельефа поверхностей резания. Показатели работоспособности алмазных кругов [Текст] / А.А. Шепелев // Інструментальний світ. – 2004. – № 3 (23) – С. 17–20.
5. Чалый, В.Т. Высокопроизводительные круги с переменной характеристикой рабочего слоя из СТМ [Текст] / В.Т. Чалый, Б.К. Руденко // Інструментальний світ. – 2003. – № 4 (20) – С. 10–13.
6. Алихаян, Э.С. Многослойные круги из СТМ для профильного шлифования [Текст] / Э.С. Алихаян // Інструментальний світ. – 2002. – № 2 (14) – С. 6–7.
7. Алиханян, Э.С. Круги специальные с изнашиваемым корпусом для вышлифовки канавок мелкоразмерных спиральных сверл из быстрорежущих сталей [Текст] / Э.С. Алихаян // Інструментальний світ. – 2006. – № 3 (31) – С. 27–29.
8. Бровченко, А.М. Эффективный комбинированный шлифовальный инструмент для торцового одностороннего глубинного алмазно-электрохимического шлифования [Текст] / А.М. Бровченко, В.И. Лавриненко // Інструментальний світ. – 2006. – № 1 (29) – С. 30–32.
9. Пащенко, Е.А. Высокопористые алмазно-абразивные круги на керамической связке: размещение предварительного и доводочного шлифования [Текст] / Е.А. Пащенко, О.В. Лажевская, А.Н. Черненко, Н.Н. Нековаль // Інструментальний світ. – 2007. – № 2 (34) – С. 4–7.
10. Шепельов, А.А. Алмазные круги на основе гибридных силоксановых связок для высокопроизводительного шлифования [Текст] / А.А. Шепельов, Е.А. Пащенко, С.В. Рябченко, Ю.А. Муковоз. // Інструментальний світ. – 2008. – № 2–3 (38–39) – С. 18–21.
11. Богатырева, Г.П. Повышение термостойкости шлифпорошков синтетических алмазов путем нанесения оксидных и хлоридных покрытий [Текст] / Г.П. Богатырева, Ю.И. Никитин, А.Н. Панова, В.Г. Полторацкий // Інструментальний світ. – 2007. – № 2 (34) – С. 27–30.
12. Никитин, Ю.И. Методы получения требуемых зернистостей алмазных порошков из шлифпорошков пониженного спроса [Текст] / Ю.И. Никитин, Г.П. Богатырева, В.Г. Полторацкий, Г.А. Петасюк // Інструментальний світ. – 2004. – № 4 (24) – С. 9–12.
13. Новиков, Н.В. Компьютеризированные методы неразрушающего контроля прочностных свойств алмазных шлифпорошков [Текст] / Н.В. Новиков, Ю.И. Никитин, Г.А. Петасюк // Інструментальний світ. – 2006. – № 2 (30) – С. 9–11.
14. Новиков, Н.В. Адгезионно-магнитная сортировка – способ повышения качества алмазных шлифпорошков [Текст] / Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Г.Ф. Невструев, Г.Д. Ильницкая // Інструментальний світ. – 2005. – № 3 (27) – С. 4–7.
15. Linke, B. Tribological performance of CBN in grinding with different coolants [Text] / B. Linke, A. Roderburg, F. Klocke, C. Zeppenfeld // Industrial diamond review. – № 4 – Lamda Publicity Ltd, Odeon House, 146 College Road, Harrow, Middlesax, HA1 1BH, England – 2007, P. 60–62.
16. Cornbower, B. Developments in high production peel grinding in water based coolants [Text] / B. Cornbower, M. Hitchiner // Industrial diamond review. – № 3 – Lamda Publicity Ltd, Odeon House, 146 College Road, Harrow, Middlesax, HA1 1BH, England – 2008, P. 51–54.

17. Brevern, P. *Deep grinding of different grades of tungsten carbide with oil as lubricant coolant* [Text] / P. Brevern // *Industrial diamond review*. – № 1 – Lamda Publicity Ltd, Odeon House, 146 College Road, Harrow, Middlesax, HA1 1BH, England – 2008, P. 47–48.

18. Худобин, Л.В. *Минимизация засаливания шлифовальных кругов* [Текст] / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.

19. Ларшин, В.П. *Твердые технологические смазки для абразивного инструмента* [Текст] / В.П. Ларшин, А.А. Гречиха, А.В. Якимов // *Инструментальный світ*. – 2002. – № 2 (14) – С. 33–34.

20. Meyer, H.-R. *Dressing of diamond and CBN grinding wheels*. *Technische Mitteilungen* 8, 1980. – P. 663–672.

21. Mackensen, T. *Productive flute grinding with profilable diamond grinding wheels* [Text] / T. Mackensen // *Industrial diamond review*. – №1 – Lamda Publicity Ltd, Odeon House, 146 College Road, Harrow, Middlesax, HA1 1BH, England – 2008, P. 65–69.

22. Tuffy, K. *The effect of dressing parameters and grit size selection for vitrified superabrasive wheels for high specific grinding energy application*. *Industrial diamond review* [Text] / K. Tuffy, B. Linke, M. O'sullivan. – № 2 – Lamda Publicity Ltd, Odeon House, 146 College Road, Harrow, Middlesax, HA1 1BH, England – 2006, P. 59–66.

23. Лавриненко, В.И. *Особенности шлифования кругами из сверхтвердых материалов при дополнительном электрофизическом воздействии на контактные поверхности круга и детали* [Текст] / В.И. Лавриненко, И.В. Лецук, О.О. Пасичный, А.А. Девицкий, В.В. Смоквина // *Инструментальный світ*. – 2012. – № 1 (53) – С. 36–41.

24. Новиков, Н.В. *Инструменты и технологии, разработанные ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины в 2011 г.* [Текст] / Н.В. Новиков, Л.Ф. Головки, Л.Н. Девин, // *Инструментальный світ*. – 2012. – № 1 (53) – С. 4–7.

25. Tanaka, M. *Development of a new metal bond wheel for a double disk grinding* [Text] / M. Tanaka, K. Fukushima, H. Ohshita // *Industrial diamond review*. – №4 – Lamda Publicity Ltd, Odeon House, 146 College Road, Harrow, Middlesax, HA1 1BH, England – 2007, P. 57–62.

© А.Н. Шпилька, Н.Н. Шпилька

А.М. Шпилька, ст. викл., М.М. Шпилька, к.т.н., доц.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуті сучасні напрямки дослідницьких робіт, спрямованих на досягнення високих показників продуктивності алмазного шліфування зі збереженням якісних характеристик оброблених поверхонь.

Ключові слова: алмазне шліфування, висока продуктивність, комбіновані технології, інструментальні матеріали, якість поверхні.

A.N. Shpilka, Senior Lecturer, N.N. Shpilka, Ph.D., Associate Professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

TENDENCIES OF TOOL MATERIALS DIAMOND GRINDING TECHNOLOGIES DEVELOPMENT

There are considered the modern directions of the research works directed on achievement of high rates of diamond grinding productivity with qualitative characteristics of processed surfaces saving.

Keywords: diamond grind, the high efficiency, the combined technologies, tool materials, quality of a surface.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ПЕНЕТРАЦІЇ ТА СТАТИЧНОМУ ЗОНДУВАННІ РОЗШИРЕНИМ НАКОНЕЧНИКОМ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Наведено результати дослідження та числового моделювання напружено-деформованого стану в системі ґрунтоцемент – наконечник зонда при статичному зондуванні розширеним наконечником.

Ключові слова: *контроль якості, ґрунтоцемент, статичне зондування розширеним наконечником, моделювання.*

Постановка проблеми. При будівництві та реконструкції суттєва частина витрат припадає на влаштування фундаментів і підготування ґрунтових масивів, тому необхідно забезпечувати все більш високі вимоги до продуктивності технологічних операцій та якості продукції. Необхідність підвищення темпів вишукувань певним чином пов'язана з економічною роллю яку вони відіграють в будівельному інвестиційному циклі в цілому. Дослідження і проектування представляють етапи, які, не вимагають великих матеріальних витрат, але пов'язані зі значними витратами часу. З цієї причини тривалість вишукувань і проектування в певних випадках може набути навіть більшого економічного значення, ніж їх вартість. Збільшення лише на 1 місяць тривалості інвестиційного циклу викликає подорожчання будівництва приблизно на 1–2 %. Це відбувається за рахунок додаткових платежів за кредитами і зниження темпів оборотності капіталовкладень. Якщо врахувати, що вартість інженерно-геологічних вишукувань у більшості випадків становить лише 0,5...1 % від загальної кошторисної вартості будівництва, стає очевидним виняткове значення збільшення темпів вишукувальних робіт.

Останнім часом для закріплення ґрунтових масивів набуває широкого вжитку метод їх армування ґрунтоцементними елементами (ҐЦЕ), які у сучасному будівництві виготовляються за двома основними технологіями: бурозмішувальною і струменевою. При цьому необхідно мати максимально повну інформацію з будівельних характеристик ґрунтоцементних елементів та ґрунтів всього масиву, як на проектній стадії, так і під час випробувань якості проведених робіт.

Підвищення якості, зменшення термінів і собівартості виготовлення ґрунтоцементних елементів та палів невід'ємно пов'язані з проблемами обрання матеріалів та ефективного використання обладнання для їх виготовлення.

Раціональне застосування швидких і дешевших «експрес-методів» вивчення ґрунту, до яких відноситься статичне зондування розширеним наконечником (СЗРН), є найбільш доцільним засобом скорочення тривалості інженерних вишукувань. Часткова заміна свердловин і дорогих випробувань на статичне зондування, як правило, забезпечує скорочення термінів вишукувальних робіт навіть при значному збільшенні числа точок зондування.

Отже, дослідження аспектів застосування методу статичного зондування розширеним наконечником, як для вихідного ґрунту, так і для ҐЦЕ є актуальною науковою задачею.

Зв'язок з науковими і практичними завданнями та аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвитку швидкісних методів досліджень, до яких відносяться методи пенетрації та зондування, сприяли роботи П.А. Ребіндера, М.А. Цитовича, В.Г. Березанцева. Великий внесок у розвиток цих методів вніс Разорьонов В.Ф., у роботах якого детально розглянуто питання теорії та практики пенетраційних випробувань. Проблеми статичного зондування досліджувались у роботах: Г. Санглера, Т. Лунна, П.К. Робертсона, Д.Д.М. Пауелла,

С.Є. Бернса, П.У. Мейна, Г.К. Бондарика, Ю.Г. Трофімовкова, Л.Н. Воробкова, В.І. Ферронського, М.С. Захарова, М.Л. Зоценка, М.М. Вагідова, І.Б. Рижкова, О.И. Ісаева.

У практиці проектування для ґрунтоцементних елементів за основний показник якості прийнята міцність, що визначається величиною опору зразків одновісному стиску.

Вперше метод статичного зондування для дослідження ґрунтоцементу був використаний у роботі [1]. В цій роботі запропоновано емпіричну формулу для визначення міцності ґрунтоцементу при одновісному стисненні за даними зондування:

$$\sigma_{\text{сж}} = 0,12 + 0,1 \cdot q_3, \quad (1)$$

де q_3 – питомий опір ґрунту під наконечником зонда при статичному зондуванні розширеним наконечником $q_{\text{зр}}$ визначається як опір ґрунту наконечнику зонда віднесений до квадрата висоти конуса $h_{\text{кон}}$.

Для контролю постійності перерізу паль за глибиною була запропонована методика порівняння опорів зондуванню ґрунту в природному стані та тіла ґрунтоцементної палі проведеного через 5 годин після її виготовлення. За цього терміну опір зондуванню тіла ґрунтоцементної палі менший в порівнянні з опором ґрунту в природному стані. Але слід також відзначити такі недоліки вищенаведеної методики як: неврахування на ранньому етапі тужавіння нерівномірної вологості оточуючого ґрунту, що може призвести до невірних висновків; значне зусилля зондування на пізньому етапі тужавіння, що може призвести до руйнування досліджуваного ГЦЕ.

У роботі [2] вперше для дослідження ґрунтоцементу був запропонований метод СЗРН та у лабораторних умовах за допомогою методу пенетрації була встановлена функціональна залежність для визначення міцності ґрунтоцементу від віку тужавіння (T , діб) та температури тужавіння ґрунтоцементу (t , °C):

$$\sigma_{\text{ст}} = 0,576 + 0,0128 \cdot t - 0,7322 \cdot e^{-0,04373 \cdot T}, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Також була встановлена для досліджуваного ґрунтоцементу залежність лінійного характеру між питомими опорами пенетрації та зондування:

$$q_{\text{зр}} = 0,001458 + 1,1458 \cdot R, \quad (3)$$

де $q_{\text{зр}}$ – питомий опір зондуванню розширеним наконечником, що визначається як опір ґрунту наконечнику зонда віднесений до квадрата висоти конуса, МПа; R – питомий опір пенетрації, МПа.

Контроль за якістю ГЦЕ можна виконувати користуючись залежністю:

$$q_{\text{зр}} = 4,538 \cdot 10^{-2} + 1,083 \cdot 10^{-3} \cdot t - 6,153 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-0,04373 \cdot T}. \quad (4)$$

У роботі [3] залежності питомого опору зондуванню розширеним наконечником ГЦЕ підтверджені в умовах будівельного майданчика при реконструкції будівлі ресторану «Іванова гора» у м. Полтава. Також під час досліджень було виявлено явище підвищення міцності у верхніх шарах ГЦЕ, обумовлене підвищенням вмістом цементу і більш високими температурними умовами тужавіння ґрунтоцементної суміші.

Формулювання цілей статті. Питання визначення та прогнозування характеристик міцності ґрунтоцементних елементів на цей час вивчене у недостатньо повному обсязі, особливо при паралельному використанні різних за достовірністю методів досліджень та вихідних компонентів ґрунтоцементу. Можна чекати, що в цьому напрямку існують значні можливості ефективнішого врахування особливостей конкретних майданчиків, вихідних компонентів і достовірності методів, які використовуються для контролю якості. Отже, для вирішення вказаних питань необхідно мати як експериментальний метод визначення характеристик ґрунтоцементного матеріалу виготовленого в лабораторних та польових умовах, так і теоретичний метод чисельного моделювання пенетрації та СЗРН.

Ці методи досліджень повинні давати достовірні дані як вихідного ґрунту, так і ґрунтоцементу протягом часу від моменту його виготовлення до часу набуття проектних па-

раметрів. Метою даної роботи є теоретичне дослідження напружено деформованого стану методом чисельного моделювання penetрації та СЗРН.

Виклад основного матеріалу. Пенетрацією називається метод дослідження фізичних і механічних властивостей матеріалів шляхом визначення їх опору проникненню наконечників різноманітних форм і розмірів. У випадку, коли глибина занурення наконечника не перевищує його висоти, метод має назву penetрації. Якщо глибина занурення наконечника перевищує його висоту він зветься зондуванням [4, 5]. Відмінність в термінології відображає принципову різницю в графіках «зусилля penetрації (зондування) P – глибина занурення наконечника h », що характеризують умови деформації ґрунту в процесі penetрації або зондування (рис. 1). В процесі penetраційних випробувань площа поперечного перетину конічного наконечника при його зануренні в ґрунт безперервно зростає. Тому поки глибина занурення наконечника буде менше його висоти $h < h_{\text{кон}}$, представляє, наприклад в зв'язних ґрунтах, квадратну параболу (рис. 1, а). При глибині занурення наконечника, що перевищує його висоту $h > h_{\text{кон}}$, площа поперечного перетину наконечника залишається незмінною, тому подальше збільшення зусилля зондування в зв'язних однорідних ґрунтах припиняється, тому графік залежності $h = f(P)$ графік залежності $h = f(P)$ отримує різкий перелом.

Замість параболічної залежності (0–1) встановлюється проста залежність P – $P_{\text{макс}}$, тобто зусилля зондування в однорідних зв'язних ґрунтах, що володіють відносно значним зчепленням, виявляється не залежним від глибини занурення наконечника (пряма 2–3 на рис. 1, б). У незв'язних (піщаних) ґрунтах з однорідними характеристиками механічних властивостей по глибині зондування за умови $h > h_{\text{кон}}$ і $d_{\text{кон}} \gg d_{\text{шт}}$ призводять до лінійного збільшення зусилля зондування з глибиною занурення наконечника (пряма 2–3' на рис. 1, б). У якості об'єктивної характеристики результатів penetраційних випробувань прийнята величина «питомого опору penetрації R » яка визначається як величина прикладеного зусилля P віднесена до квадрата глибини занурення конуса h^2 .

Для досліджуваного стану ґрунтоцементу, як і для вихідного матеріалу — однорідних глинистих ґрунтів, питомий опір penetрації має властивість інваріантності, тобто не залежить від величини зусилля penetрації, що можна бачити на рис. 2, де показані графіки залежності глибини занурення наконечника від прикладеного зусилля в координатах P – h^2 і які мають вигляд прямих. Отже, питомий опір penetрації визначається як тангенс кута нахилу θ цих прямих до вісі ординат:

$$R = \text{tg } \theta = (P \pm P_0) / h^2, \quad (5)$$

Для теоретичного дослідження напружено деформованого стану методом чисельного моделювання penetрації та СЗРН доцільно використати метод скінченних елементів (МСЕ), який набув останнім часом широкого вжитку. МСЕ є основою розрахункового механізму багатьох програмних продуктів для комп'ютерного моделювання, які використовують для оцінювання НДС ґрунтових масивів: Plaxis, CONCORD, Основа–1 (розробка ПолтНТУ), Start–2, Нелінійний Поліфем, GeoStab, LANDSLIP07, Lira, тощо.

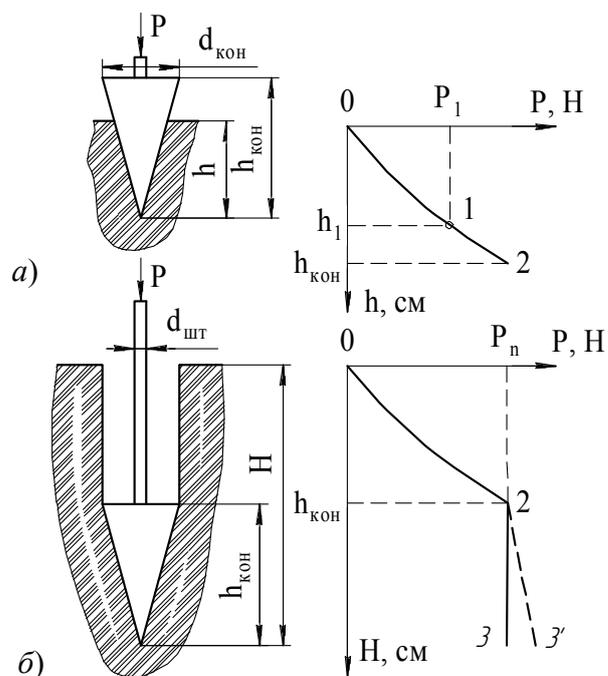


Рис. 1. Схеми дослідження методами:
а – penetрації, б – зондування

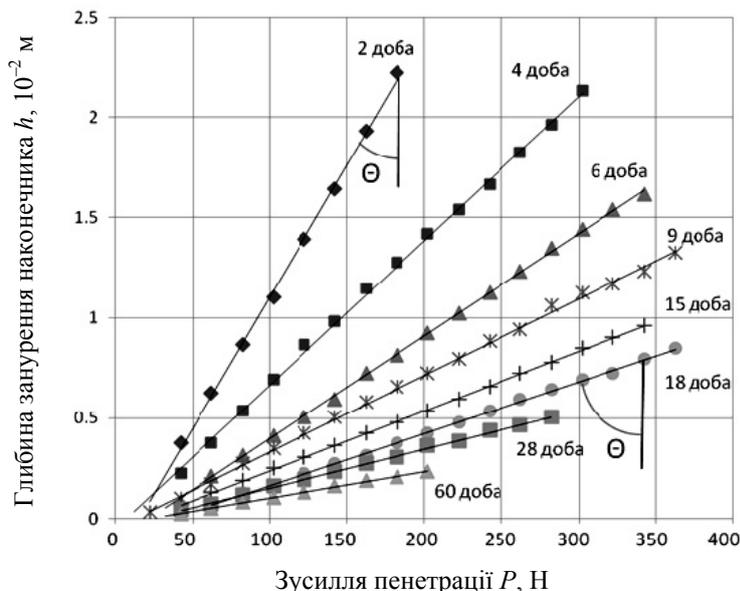


Рис. 2. Графіки інваріантності питомого опору penetрації зразків ґрунтоцементу різного терміну тужавіння

Для моделювання був обраний програмний комплекс Plaxis, що призначений для аналізу деформацій та стійкості геотехнічних споруд і використовується для розв'язання різноманітних задач в галузі традиційної та нелінійної механіки ґрунтів.

Автор висловлює подяку заступнику директора з наукової роботи НДІ «БашНІІ» м. Уфа (Росія) д.т.н., професору А.Л. Готману за надану можливість користуватися ліцензійними розрахунковими комплексами «Plaxis 8.2».

Згідно з ДБН В.2.1-10-2009 були складені скінченно-елементні моделі для пенерації (для глибин занурення від 10 до 60 мм, з кроком 5 мм) і СЗРН (для глибин занурення від 80 до 1000 мм) у двовимірній вісесиметричній постановці задачі, призначені властивості матеріалів та вказані граничні умови (рис. 1, 2).

Для дослідження, як вихідний матеріал, був обраний суглинок лесований, світло-жовтий, високопористий, карбонатний, просадочний, в природному заляганні твердий, а у водонасиченому — м'якопластичний, що має наступні міцнісні характеристики: питома вага $\gamma = 18,0 \text{ кН/м}^3$; модуль деформації $E = 5 \text{ МПа}$; питоме зчеплення $c = 11,8 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя $\phi = 6^\circ$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,35$; кут дилатансії $\psi = 0^\circ$.

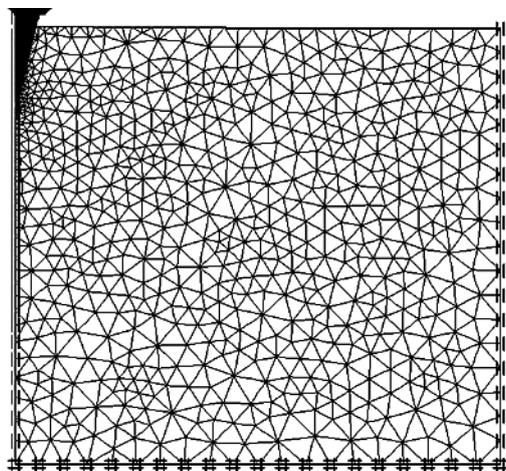


Рис. 3. Скінченно-елементна модель penetрації

Для моделювання процесів penetрації та СЗРН доцільним є застосування традиційної моделі ґрунту Мора – Кулона у вигляді пружно-пластичного середовища, яка потребує наступних вихідних даних: модуля деформації, питомого зчеплення, кута внутрішнього тертя, коефіцієнта Пуассона, кута дилатансії.

Приклад побудови скінченно-елементної моделі для визначення опору penetрації показаний на рис. 3.

Ґрунтоцемент виготовлений з цього ґрунту, з вмістом 10 % від ваги скелету ґрунту портландцементу ПЦ ІІ/Б-Ш-400 та водо-цементним відношенням В/Ц = 2,7, має наступні міцнісні характе-

ристки: питома вага $\gamma = 18,2 \text{ кН/м}^3$; модуль деформації $E = 100 \text{ МПа}$; питоме зчеплення $c = 130 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя $\varphi = 35^\circ$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$; кут дилатансії $\psi = 0^\circ$.

При моделюванні процесу СЗРН для врахування напружень, що виникають від тиску ґрунту витисненого при утворенні свердловини, використовувався режим «поетапного будівництва». Після генерації початкових напружень від ваги ґрунту (рис. 4, а) на другому етапі ґрунтові кластери конусу та свердловини вимкнені, а до межі свердловини прикладене переміщення, що імітує витискання ґрунту при утворенні свердловини (рис. 4, б). Наприкінці цього етапу переміщення кінцевих елементів із збереженням напружень приводяться в початкове положення відповідною опцією. На третьому етапі межа основи конуса фіксується нульовим переміщенням і моделюється напружений стан «розвантаження» ґрунту вздовж свердловини з частковим витисканням його у порожнину свердловини (рис. 4, в). Четвертий етап для penetрації та зондування має однаковий принцип: до основи конуса прикладається задане вертикальне переміщення (рис. 4, г).

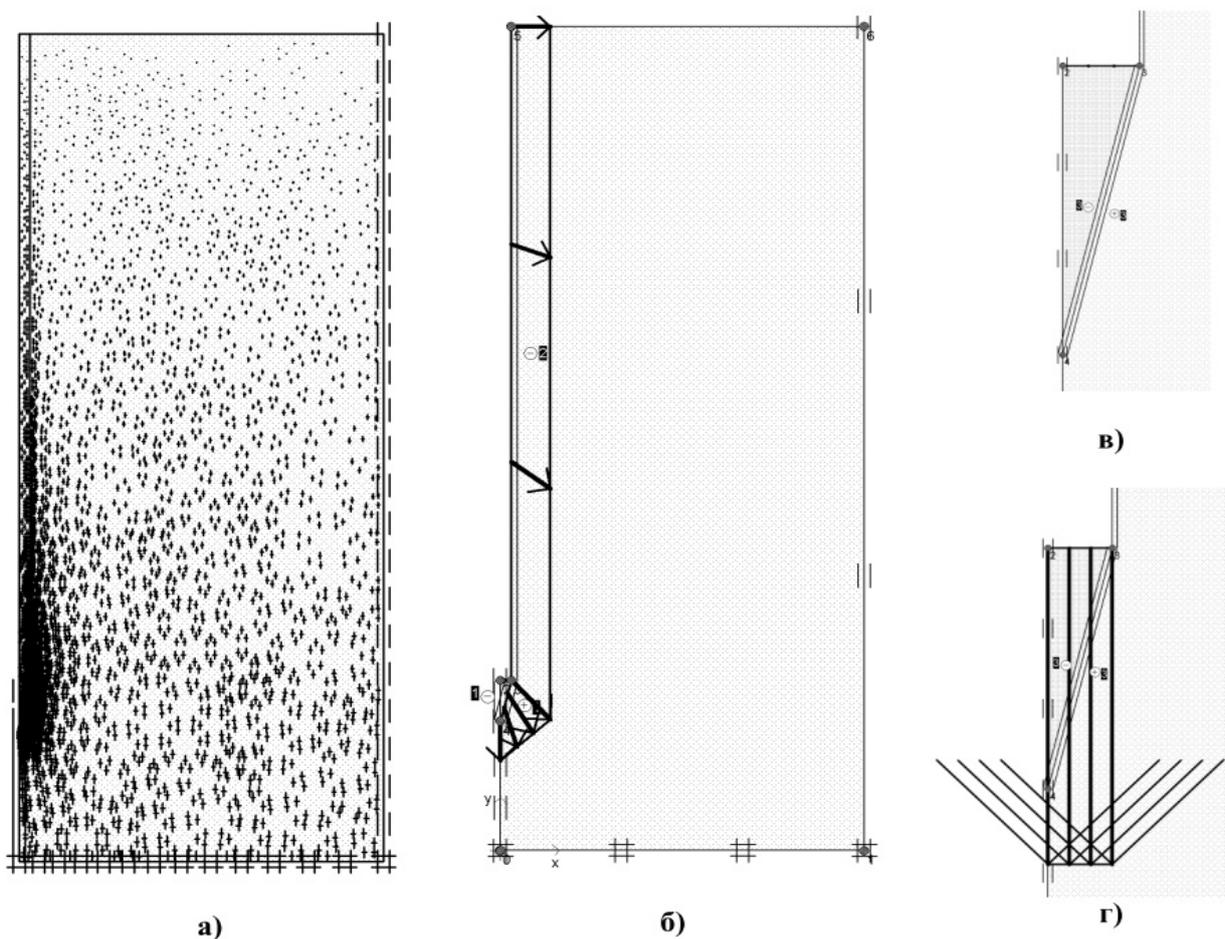


Рис. 4. Фази моделювання:

а – генерація початкових напружень від ваги ґрунту; б – розрахункова схема для генерації напружень від ґрунту витисненого при утворенні свердловини; в – фіксація конуса нульовим переміщенням та «розвантаження»; г – розрахункова схема для визначення зусилля опору зондуванню

Результатами моделювання penetрації та СЗРН в «Plaxis» є значення переміщень точки в центрі основи конуса та відповідні вертикальні зусилля, за якими далі будуються графіки залежностей «переміщення – зусилля» у логарифмічних координатах. Аналогічні графіки будуються при обробці результатів випробувань в лабораторних умовах на одноплосинний зріз при визначенні міцнісних характеристик.

Приклад одного із графіків залежності сили опору ґрунту penetрації від збільшення глибини занурення наконечника за результатами моделювання наведено на рис. 5. Побудова графіків в логарифмічних координатах дозволяє точніше виявити значення зусилля, які відповідають втраті структурної міцності, що визначається довготривалою межею міцності.

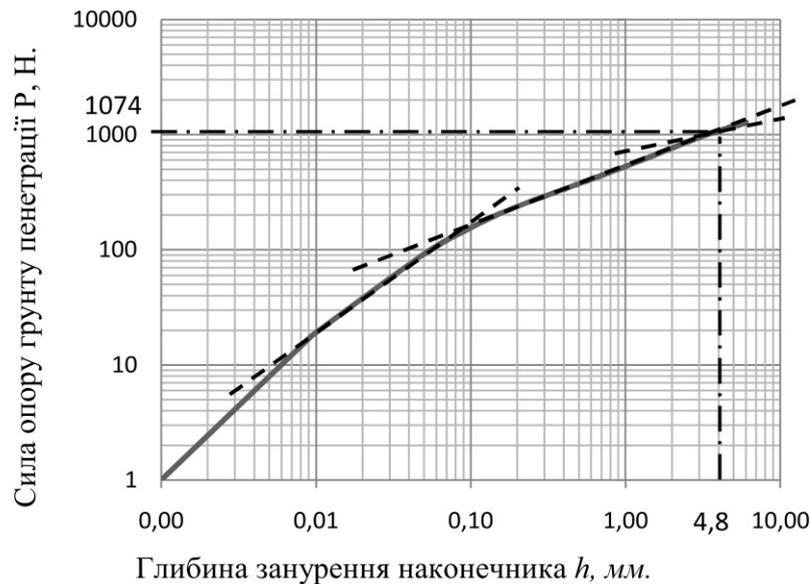


Рис. 5. Графік залежності сили опору ґрунту penetрації $\lg P$ від збільшення глибини занурення наконечника $\lg \Delta h$

Таблиця 1. Результати моделювання процесу penetрації

| h , мм | P , Н | R_b , МПа |
|----------|-----------|-------------|
| 10 | 283 | 2,83 |
| 15 | 503 | 2,23 |
| 20 | 798 | 1,99 |
| 25 | 1074 | 1,72 |
| 30 | 1539 | 1,71 |
| 35 | 2174 | 1,77 |
| 40 | 2752 | 1,72 |
| 45 | 3236 | 1,60 |
| 50 | 3946 | 1,58 |
| 55 | 4725 | 1,56 |
| 60 | 5969 | 1,66 |
| | R , МПа | 1,85 |

Таблиця 2. Результати моделювання процесу СЗРН

| H , мм | P , Н | $q_{зр}$, МПа |
|----------|---------|----------------|
| 80 | 7093 | 1,97 |
| 100 | 7370 | 2,05 |
| 120 | 7476 | 2,08 |
| 140 | 7954 | 2,21 |
| 160 | 7985 | 2,22 |
| 180 | 8199 | 2,28 |
| 200 | 8230 | 2,29 |
| 250 | 8218 | 2,28 |
| 300 | 8287 | 2,30 |
| 350 | 8771 | 2,44 |
| 400 | 8915 | 2,48 |
| 500 | 8953 | 2,49 |
| 600 | 9079 | 2,52 |
| 800 | 9738 | 2,71 |
| 1000 | 9801 | 2,72 |

На рис. 6. наведені картини розподілу повних векторних переміщень, напружень, що знаходяться на поверхні обвідної руйнування Кулона та повних середніх напружень.

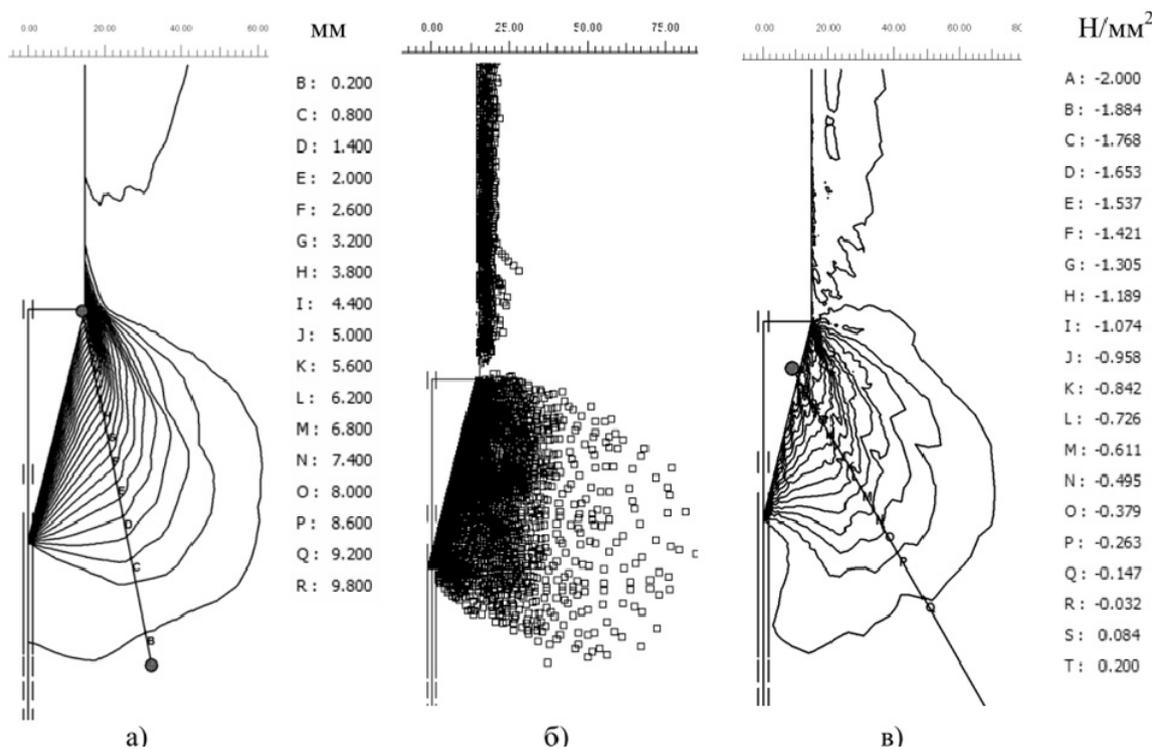


Рис. 6. Картини розподілу:
повних векторних переміщень (а), напружень, що знаходяться на поверхні
обвідної руйнування Кулона (б), повних середніх напружень (в)

На рис. 7. наведений графік змодельованої залежності сили опору penetрації та зондуванню від глибини занурення наконечника.

Порівняння результатів лабораторних та польових досліджень ґрунтоцементних елементів методом СЗРН із результатами моделювання дозволяє стверджувати, що побудована модель має достатній рівень адекватності, оскільки коефіцієнт варіації при польових дослідженнях сягає значень 7...9 % внаслідок неоднорідності як вихідного ґрунту, так і отриманої ґрунтоцементної суміші.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблена у пакеті кінцево-елементного аналізу Plaxis модель дозволяє досліджувати напружено-деформований стан системи ґрунтоцемент – наконечник зонда.

У подальших дослідженнях необхідно встановити залежності зміни під час тужавіння таких показників як модуль деформації, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя, а також дослідити вплив збіднених прошарків ґрунтоцементу або ґрунту.

Сила опору ґрунту penetрації та зондуванню P, H .

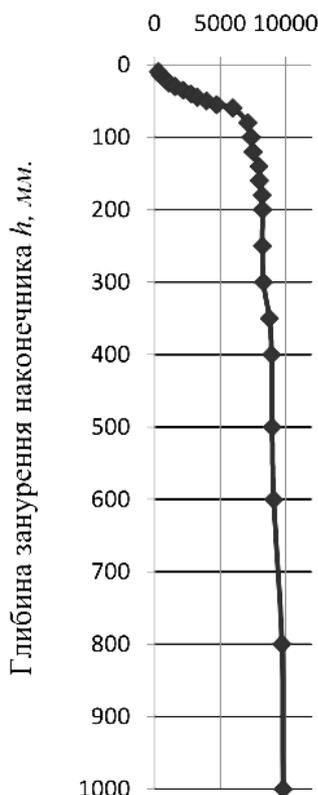


Рис. 7. Графік залежності сили опору ґрунту penetрації та зондуванню від глибини занурення наконечника

Література

1. Коган, В.В. Применение статического зондирования для контроля качества свай при струйной технологии [Текст] / В.В. Коган, Б.В. Гончаров, Н.Б. Гареева // Эффективные фундаменты, сооружаемые без выемки грунта: тр. II Укр. науч.-техн. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – Полтава: ПолтНТУ. – 1995. – Ч. 1. – С. 100–103.

2. Зоценко, М.Л. Пенетрационные исследования процесса твердения грунтоцемента [Текст] / М.Л. Зоценко, С.Г. Ясько // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ГВУЗ «Приднепровская гос. акад. строительства и архитектуры», 2012. – №65. – С. 245–252.

3. Ясько, С.Г. Контроль якості грунтоцементних елементів методом статичного зондування розширеним наконечником [Текст] / С.Г. Ясько, В.М. Зоценко // Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. пр. Полтавського нац. техн. ун-ту ім. Ю.Кондратюка. – Вип. 4 (34). – Т. 2. – ПолтНТУ, 2012. – С. 149–156.

4. Разоренов, В.Ф. Определение строительных свойств грунтов методами пенетрации и вращательного среза [Текст] / В.Ф. Разоренов. – Киев: Будівельник, 1967. – 136 с.

5. Зоценко, Н.Л. Исследование особенностей определения физико-механических свойств песчаных грунтов методами пенетрации и зондирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Николай Леонидович Зоценко; Воронежский инж.-строит. ин-т. – Воронеж, 1969. – 36 с.

© С.Г. Ясько

С.Г. Ясько, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ЧИСЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ И СТАТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ РАСШИРЕННЫМ НАКОНЕЧНИКОМ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведены результаты исследования и числового моделирования напряженно-деформированного состояния в системе грунтоцемент – наконечник зонда при статическом зондировании уширенным наконечником.

Ключевые слова: контроль качества, грунтоцемент, статическое зондирование расширенным наконечником, моделирование.

S.G. Yasko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

NUMERICAL MODELING OF SOIL CEMENT ELEMENTS DEFLECTED MODE DURING CONE PENETRATION TEST WITH AN EXPANDED

The results of the research and numerical simulation of soil cement – probe tip system's deflected mode during static probing with an expanded tip are provided.

Keywords: quality control, soil cement, static probing with an expanded tip, modeling.

НОВОЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Представлены информационно-аналитические сведения и теоретические предпосылки проектирования технологического оборудования для виброобработки сложнопрофильных деталей. Разработана принципиальная схема нового вибростанка, изложена методика его запуска и описан технологический регламент выполнения операций отделочно-зачистной обработки.

Ключевые слова: *сложнопрофильные детали, виброобработка, мелкодисперсная рабочая среда, вибростанок, предпосылки проектирования, методика запуска, технологический регламент.*

Введение. Номенклатура деталей отраслей сельхозмашиностроения, авиастроения и производства аэрокосмических летательных аппаратов, станков и установок технологического назначения и других исполнительных систем, связанных с использованием газотурбинных двигателей (ГТД), насчитывает большое количество деталей типа тела вращения, таких как диски, втулки, катушки, зубчатые колеса и другие, имеющие симметричную форму и центральные сквозные отверстия.

Отделочно-зачистная обработка упомянутых деталей является неотъемлемым процессом производственного цикла, внедрение которого сопряжено с решением совокупности производственных, экономических и социальных задач, имеющих функциональные, эргономические и эстетические корни.

1. Характеристика деталей и методов отделочно-зачистной обработки

Согласно классификации форма упомянутых сложнопрофильных деталей образуется сочетаниями цилиндрических, конических и других лекальных плоскостных и объемных поверхностей, имеют место малые радиусы сопряжения, а также глухие и сквозные отверстия различного диаметра [1].

При получении заготовок деталей ГТД, как правило, применяются такие технологические способы как точное литье и штамповка. Дальнейшее формообразование связано с операциями обработки лезвийным инструментом на металлорежущих станках. В связи с возрастающим объемом изготовления заготовок, соответственно, возрастает объем отделочно-зачистных операций по удалению облоя и заусенцев, возникающих как при производстве заготовок, так и при их дальнейшей механообработке. Процесс удаления дефектов поверхности на заготовках представляет определенные трудности вследствие большого многообразия форм контуров, а также необходимости удаления дефектного слоя металла на небольших участках поверхности, что требуется согласно условиям последующей сборки и эксплуатации. Кроме того, повышение безотказности и ресурса механизмов во многом зависит от качества обработки поверхностей, входящих в них деталей [2, 3].

Вполне понятно, что качество механизмов, зависящее от микрогеометрии и физико-механических свойств поверхностей входящих в них деталей, в значительной мере определяется уровнем выполнения финишных отделочных операций. В данном случае отделочно-зачистная обработка закрепленным лезвийным или абразивным инструментом, а также струйными методами является затруднительной, а при недоступном расположении обрабатываемых поверхностей — невозможной.

Априорные экспериментальные исследования, проведенные в НИЛ «ОСА» ВНУ им. В. Даля, указывают на принципиальную возможность проведения отделочно-

зачистных операций деталей ГТД с использованием виброобрабатывающей техники и технологии. Однако, для применения традиционного метода виброобработки необходимо корректировка его технологического процесса и конструкции оборудования. Предполагается, что использование мелкодисперсных рабочих сред с размером гранул 1,5...2,0 мм, а также шлифзерна 200...40 мкм и шлифпорошков 32...16 мкм обеспечит возможность доступа к затененным элементам конструкции сложнопрофильных деталей, что абсолютно исключено для гранул 5...30 мм, обычно применяемых в традиционной виброобработке.

2. Теоретические предпосылки проектирования нового технологического оборудования

Исходя из теории перемещения сыпучих сред известно, что характер вибрационного воздействия на них в значительной степени зависит от дисперсности гранул, а также газовой и жидкой составляющей. В частности, из-за низкой воздухопроницаемости в мелкодисперсной среде возникают дополнительные нагрузки. Это происходит вследствие того, что между пульсациями давления газовой составляющей и движением твердой абразивной составляющей среды наблюдается сдвиг фаз. Такое явление приводит к возникновению аэродинамических сил, препятствующих движению твердой составляющей рабочей среды. Так, в пространстве между рабочими поверхностями резервуара вибростанка и прилегающим к ним слоем рабочей среды при подбрасывании ее вверх возникает разрежение, а при падении вниз — повышение давления, что при обработке в мелкодисперсных средах аналогично «насосному» эффекту. Выравнивание периодических колебаний аэродинамического давления происходит вследствие компенсации между избыточным и недостаточным количеством воздуха в сыпучей среде. При этом на фракции среды действует пульсирующий напор воздуха со сдвигом по фазе в направлении, противоположном ее перемещению [4, 5].

Упомянутые аэродинамические силы, действующие на фракции среды, определяются массой загрузки резервуара вибростанка, ее удельной воздухопроницаемостью и режимами колебаний. При воздействии колебаний на мелкодисперсные среды вследствие значительных сил сцепления между их фракциями требуется более интенсивный режим колебаний, чем для крупнодисперсных сред. Таким образом, для перевода мелкодисперсной среды в состояние виброкипения, ускорения ее колебаний должны в несколько раз превышать ускорение свободного падения. Требуемые условия виброобработки теоретически могут быть созданы при значительном, до 9 мм и выше, увеличении амплитуды колебаний, однако при этом значительно снижается надежность подшипниковых узлов инерционных вибровозбудителей, работающих в условиях больших знакопеременных нагрузок.

Исходя из практики внедрения технологий отделочно-зачистной обработки известно, что мелкодисперсные рабочие среды, загруженные в колеблющийся резервуар вибростанка, обладают пассивной кинематикой и динамикой, что не свойственно для создания эффекта виброкипения рабочей среды при виброобработке. Скорости циркуляционного и осциллирующего движения гранул среды минимальны и недостаточны для реализации основного принципа виброобработки, состоящего в относительном перемещении и взаимном давлении рабочей среды и обрабатываемых деталей [6].

В этой связи напрашивается проектирование новой технологии и оборудования, в основу которых поставлена задача усовершенствования традиционной виброобработки, ее управления и расширения функциональных возможностей. С этой целью обработку проводят при одновременном использовании энергии вибрационных сил, воздействующих на рабочую среду и детали, а также энергии, возникающей от действия силы струйного движения потоков жидкости. Такой характер комбинированного энергетического воздействия создает условия, при которых формообразующие свойства находящейся в состоянии виброкипения мелкодисперсной рабочей среды, обеспечивают микрорезание и упругопластическое деформирование при равномерном и стабильном контакте с обрабатываемой поверхностью любой сложности [7, 8].

3. Описание конструкции нового вибростанка

Учитывая вышеуказанные технологические принципы, авторы настоящей статьи предлагают новую конструкцию вибростанка (принципиальная схема – рис. 1) для обработки сложнопрофильных деталей в мелкодисперсных рабочих средах [9].

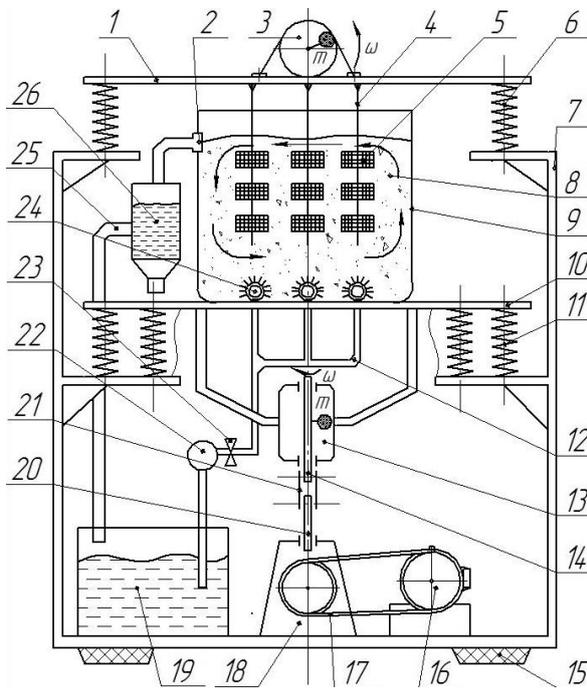


Рис. 1. Принципиальная схема новой конструкции вибростанка

Станок для отделочно-зачистной виброобработки деталей содержит резервуар 9 цилиндрической формы с большей вертикальной осью, жестко связанный с виброплатформой 10. Резервуар 9, загруженный на 80 % геометрического объема мелкодисперсной рабочей средой 8 с размером гранул не более 2,0 мм, и установленный с помощью упругой подвески 11 из карусельно расположенных цилиндрических пружин на основании 7, смонтированном на амортизаторах 15. Вибровозбудитель 13 инерционного типа, создающий колебательные движения в горизонтальной плоскости, связанный с виброплатформой 10, расположен у дна резервуара 9, соосно с ним. Вал 14 вибровозбудителя 13 с помощью гибкой муфты 21 сообщается с валом 20 конического редуктора 18, связанного клиноременной передачей 17 с электродвигателем 16. В днище резервуара 9 с помощью гибкого трубопровода 12 смонтировано гидродинамическое устройство 24, приводящее рабочую среду 8 в псевдосжиженное состояние. Данное состояние поддерживается непрерывной циркуляцией жидкости, подаваемой насосом 22 и регулируемой приводом 23 ее подачи. Магистраль 25, в цепь которой включена сливная воронка 2 и безнапорный гидроциклон 26 для очистки от микростружки и частиц абразива, используется для отвода жидкости из резервуара 9 в отстойник 19 для последующей циркуляции или регенерации. Детали 5, подлежащие отделочно-зачистной обработке базируются и закрепляются на установочных пальцах 4 станочного приспособления 1. При обработке приспособление 1 помещают в рабочую среду 8 резервуара 9 и с помощью упругой подвески 6 совместно с инерционным электромеханическим вибратором 3, создающим колебательные движения в вертикальной плоскости, монтируют на основании 7. Рабочие поверхности резервуара 9 облицованы полиуретановым покрытием, что позволяет проводить технологические процессы виброобработки с применением химически-активных растворов.

Детали 5, подлежащие отделочно-зачистной обработке базируются и закрепляются на установочных пальцах 4 станочного приспособления 1. При обработке приспособление 1 помещают в рабочую среду 8 резервуара 9 и с помощью упругой подвески 6 совместно с инерционным электромеханическим вибратором 3, создающим колебательные движения в вертикальной плоскости, монтируют на основании 7. Рабочие поверхности резервуара 9 облицованы полиуретановым покрытием, что позволяет проводить технологические процессы виброобработки с применением химически-активных растворов.

4. Методика запуска вибростанка

Перед началом эксплуатации проводилась технологическая отладка вибростанка, методика запуска которого состояла в следующих мероприятиях.

Обоснование необходимости разжижения мелкодисперсной рабочей среды. Для проверки необходимости непрерывной циркуляции рабочей жидкости, обеспечивающей стабильный процесс виброобработки, была проведена сухая обработка и мокрая обработка с непрерывной циркуляцией рабочей жидкости. В процессе сухой обработки наблюдалось оседание абразива в нижнюю часть резервуара. При этом статические силы сопротивления среды превышали силы вибрации приспособления с деталями, что приводило к его «выталкиванию» из абразивной среды. Стабильность и надежность работы вибрационной установки была достигнута при непрерывной подаче рабочей жидкости в резервуар, когда происходило постоянное разжижение рабочей среды, обеспечивающее

ее постоянные колебания с заданной амплитудой. В качестве абразивной среды использовался электрокорунд нормальный, зернистостью 32 ТУ УЗ.02-00222226-5994.

Определение рационального расстояния от гидродинамического устройства до обрабатываемых деталей. Расстояние от источника подачи рабочей жидкости выбиралось исходя из максимального использования объема резервуара, минимального количества абразива, а также расхода рабочей жидкости, и находилось в пределах $(0,1 \dots 0,3)h$, где h – максимальная высота загрузки резервуара абразивом.

Оценка влияния расхода жидкости на эффективность обработки. При определении рационального расхода жидкости устанавливалось пять значений расходов: 0,5; 1,0; 1,3; 1,6; 2,0 л/мин. Производительность процесса оценивалась по удельному съему металла и шероховатости поверхности. Обработка производилась при амплитуде 1,0...3,0 мм,

Оценка влияния высоты засыпки деталей на эффективность обработки. Под высотой засыпки деталей следует понимать толщину слоя абразивной среды, находящегося над обрабатываемыми деталями. При этом устанавливалось пять значений: 20, 40, 60, 80, 100 мм. Обработка производилась при амплитуде колебаний 1,0...3,0 мм.

Оценка влияния времени обработки на эффективность процесса. Производительность процесса обработки оценивалась по удельному съему металла и шероховатости поверхности. Амплитуда колебаний составляла 1,0...3,0 мм при контролируемом времени не менее 30 мин.

Оценка влияния амплитуды колебаний на эффективность обработки. Устанавливалось пять значений амплитуд колебаний: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм. Контролируемое время составляло не менее 30 мин.

Оценка влияния зернистости абразивной среды на эффективность обработки. Применялся электрокорунд нормальный, зернистостью 12, 20, 32. Производительность процесса оценивалась по шероховатости поверхности. Время обработки – не менее 30 мин.

5. Технологический регламент работы вибростанка

Предлагаемый станок для отделочно-зачистной виброобработки деталей работает следующим образом. Резервуар на 80 % своего геометрического объема загружают мелкодисперсной рабочей средой, размер гранул которой не превышает 2,0 мм. Детали, подлежащие обработке, по отдельности или пакетами базируют и механически закрепляют на установочных пальцах станочного приспособления. Режимы работы станка, необходимые для обработки, устанавливают при регулировке вибровозбудителя инерционного типа, электромеханического вибратора, а также клиноременной передачи. Далее, последовательно включают электродвигатель и приводят в рабочее положение вибровозбудитель. С помощью насоса и привода посредством гидродинамического устройства из отстойника в резервуар подают жидкость. Циркуляция жидкости совместно с колебаниями резервуара приводит рабочую среду в псевдосжиженное состояние. Установочные пальцы с деталями, подлежащими обработке, помещают в рабочую зону резервуара. Станочное приспособление с помощью упругой подвески устанавливают на основании станка. Включают электромеханический вибратор и проводят обработку. При достижении требуемой шероховатости и удалении дефектов поверхности обрабатываемых деталей выключают все исполнительные механизмы станка. Далее извлекают из резервуара станочное приспособление, снимают обработанные детали с установочных пальцев и проводят контроль качества отделочно-зачистной обработки.

Заключение. Новая конструкция вибростанка предназначена для снятия заусенцев, скругления острых кромок, шлифования и полирования мелко- и среднегабаритных сложнопрофильных деталей общемашиностроительного применения. Материал деталей: углеродистые стали; алюминиевые сплавы; латунь; и др. Операция виброшлифование обеспечивает шероховатость поверхности не хуже $Ra = 0,63 \dots 0,32$ мкм. Возможно выполнение операций чистового и тонкого шлифования, а также специальные операции мойки и очистки поверхностей деталей.

Литература

1. *Определитель деталей общемашиностроительного применения. Руководящий технический материал Общесоюзного классификатора промышленной и сельскохозяйственной продукции / Под ред. Е.А. Панфилов, Ю.И. Блохин, Л.М. Кулик, Б.А. Погодин, Г.М. Шнайдман. – М.: Изд-во стандартов, 1977.*
2. Gillespie, LaRoux, *Deburring and Edge Finishing Handbook, SME, Dearborn, MI, 1999.*
3. *Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технология изготовления деталей машин Т. III – 3 / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др. Под общ. ред. А.Г. Сулова, 2006. – 840 с.*
4. Бабичев, А.П. *Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д.: Изд. Центр ДГТУ, 2008. – 694 с.*
5. Гончаревич, И.Ф. *Теория вибрационной техники и технологии [Текст] / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.*
6. Мицык, А.В. *Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали [Текст] / А.В. Мицык, В.А. Федорович // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – № 6 (83). – С. 26–34.*
7. Пат. 78281 U, МПК В24В 31/06. *Спосіб віброобробки деталей / Т.Г. Захаров, В.Я. Міцик (Україна). – № 201211423; заявл. 03.10.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.*
8. Захаров, Т.Г. *Эффективность технологии для отделочно-зачистной обработки сложно-профильных деталей мелкодисперсной псевдосжизненной рабочей средой [Текст] / Т.Г. Захаров, В.Я. Мицык // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XI Міжнародна наук.-техн. конф., 4–6 червня 2013 р. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – С. 88–95.*
9. Пат. 79695 U, МПК В24В 31/06. *Верстат для оздоблювально-зачищувальної віброобробки деталей / Т.Г. Захаров, В.Я. Міцик (Україна). – № 201213360; заявл. 23.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.*

© Т.Г. Захаров, В.Я. Мицык

Т.Г. Захаров, асп., В.Я. Міцик, к.т.н., доц.

Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

НОВЕ У ПРОЕКТУВАННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗАЧИЩУВАЛЬНОЇ ВІБРООБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ

Представлено інформаційно-аналітичні відомості та теоретичні передумови проектування технологічного обладнання для віброобробки складнопрофільних деталей. Розроблено принципову схему нового віброверстата, викладено методика його запуску та описано технологічний регламент виконання операцій оздоблювально-зачищувальної обробки.

Ключові слова: складнопрофільні деталі, віброобробка, дрібнодисперсне робоче середовище, віброверстат, передумови проектування, методика запуску, технологічний регламент.

T.G. Zakharov, Post-graduate student, V.Ya. Mytsik, Ph.D., Associate Professor

Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University

A NEW IN DESIGNING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR FINISHING-GRINDING VIBRATION TREATMENT OF COMPLEX-PROFILED PARTS

The informative-analytical data and theoretical prognosis of designing of technological equipment for finishing-grinding vibration treatment of complex-profiled parts are presented. The principal chart of the new vibration machine is developed, the methodology of its starting and the technological regulations of executing the operations of finishing-grinding vibration treatment are described.

Keywords: complex-profiled parts, vibration treatment, fine-grained working medium, vibration machine, prognosis of designing, methodology of starting, technological regulations.

УДК 621.7

А.В. Кащевский, студ., М.Ю. Силаев, зав. лаб., Е.Ю. Ремшев, зав. лаб., А.В. Титов, к.т.н., доц.

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург

С.Г. Ясько, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ «ПАМЯТНЫЙ ЗНАК» МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В статье рассматривается один из способов изготовления изделия «Памятный знак» путем создания модели в системе САПР и последующего воплощения ее в реальности путем холодной штамповки. Представлены этапы проектирования математической модели в системе ArtCAM, а затем последовательное воплощение системы пуансон-матрица для изготовления памятных медалей Балтийского Государственного Технического Университета «ВОЕНМЕХ».

Ключевые слова: Математическая модель, технологический процесс, фотошаблон, фотополимер, пуансон-матрица, штамповка.

Введение. Технологическая подготовка производства является сложным и энергоемким процессом, требующим тщательного подхода к выбору инструментария для создания изделия. Но с появлением новых способов воплощения математических моделей в жизнь производство продукции становится намного проще и быстрее. Один из таких способов применен при создании памятных медалей для федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова». История университета ведет свое начало от основанного по распоряжению Великой княгини Елены Павловны ремесленного училища Цесаревича Николая. 300 учеников готовились к работам по холодной обработке металлов для заводов в Санкт-Петербурге. 26 февраля 1932 года в соответствии с приказом № 100 по Народному Комиссариату тяжелой промышленности СССР был преобразован в Военно-механический институт Народного Комиссариата тяжелой промышленности. В его составе было два факультета — артиллерийский и боеприпасов. С 1934 года открыт факультет морского оружия. Указом Президиума Верховного Совета СССР от 18 ноября 1944 года институт награжден орденом Красного Знамени. Приказом Министерства общего и профессионального образования Российской Федерации от 11 сентября 1997 года № 1868 Балтийский государственный технический университет имени Д.Ф. Устинова переименован в Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова. Кафедра «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» (Е-4) готовит специалистов по двум специальностям: «Машины и технология обработки металлов давлением» и «Высокоэнергетические устройства автоматических систем». В рамках первой специальности реализуется специализация «Художественная обработка материалов». Научная школа кафедры, основы которой заложены в трудах Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора Г.А. Смирнова-Аляева и др.

Анализ последних исследований и публикаций. ArtCAM — это программный пакет для пространственного моделирования механообработки, который позволяет автоматически генерировать пространственные модели из плоского рисунка и получать по ним изделия на станках с ЧПУ [1–6]. ArtCAM содержит мощный, легкий в использовании набор средств моделирования, который предоставляет дизайнеру свободу при создании сложных пространственных рельефов.

Отметим основные особенности и преимущества ArtCAM.

При создании 2D элементов:

– Импорт 2D векторов или растровых изображений, созданных в любом графическом редакторе, поддерживаются форматы DXF, DWG, EPS, AI, BMP, TIF, JPEG, GIF.

– Разнообразные инструменты векторного редактора позволят быстро создать проект любой сложности.

– Создание и позиционирование текста вдоль любой кривой (позволяет легко редактировать положение текста, управлять расстоянием между буквами, словами и предложениями.)

– Библиотека векторов для сохранения и поиска часто используемых элементов, символов и логотипов.

– Инструменты поиска и исправления ошибок импортированных векторов.

– Создание массива элементов копированием или вращением, вставка элементов.

– Инструмент интерактивной деформации (позволяет произвольно растягивать вектора или текст для придания им эффекта перспективы или скорректировать нужным образом).

При создании 3D элементов:

– Развитые инструменты моделирования позволяют создать 3D модель, используя «Растр» или «Вектора», создавать сложные профили вытяжки, гладкую стыковку и наклонные плоскости.

– Инструменты «Интерактивного скульптора» позволяют «вручную» редактировать модели в ArtCAM. Сглаживание, удаление и добавление материала, размытие позволяют получить эффект ручной работы.

– Мастер работы с текстурами позволяет декорировать модель, используя стандартные текстуры из библиотеки ArtCAM, либо создавая собственные из произвольных растровых изображений или фотографий.

– Мастер создания рельефа лица позволяет конвертировать цифровую фотографию лица (только в профиль) в 3D модель. Удобно для создания памятных и заказных сувениров.

– Позволяет добавлять красивые текстуры в проект импортируя растровые изображения или фотографий или используя стандартные текстуры ArtCAM'a.

– Инструмент интерактивной деформации рельефа позволяет свободно манипулировать существующими моделями. Можно растянуть/сжать или выгнуть рельеф вдоль произвольных кривых. Позволяет также вырезать и вставлять небольшие участки рельефа из любой части модели.

– Импорт 3D моделей (STL, 3DS, 3D DXF) из других программ напрямую в ArtCAM.

– Реалистичная визуализация моделей. Используются все доступные цвета, различные схемы расположения источников света для получения фотореалистичного изображения.

Стратегии механообработки:

– Быстрые и эффективные 3D стратегии обработки, включая черновую выборку и финишную обработку.

– Мастер компоновки векторов позволит сократить расход материала при раскрое. Эффективная компоновка множества векторов и/или текста в заданной области, описанной вектором, или на листе с заданными размерами.

– 3D гравировальные стратегии с автоматической подчисткой углов и гравировка по средней линии.

– 2D профильная обработка с опциями управления формой и позицией подвода и отвода инструмента. Автоматический или заданный пользователем порядок.

– Реалистичная имитация обработки помогает визуально оценить качество обработки и исправить возможные ошибки до обработки на станке.

– Редактируемая база инструмента с большим количеством готового инструмента.

– Автоматическая разбивка траекторий на зоны заданного размера для обработки большого проекта по частям или при ограниченных габаритах материала.



Рис. 1. Герб БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и памятный знак кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем»

медали для визуализации конечного продукта. Пользуясь теми же средствами построения, создаем тыльную сторону медали университета. Используя тот же алгоритм действий что и в случае с медалью БГТУ «ВОЕНМЕХ», построим векторный эскиз и рельефный макет медали кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем». Для изготовления пуансон-матриц мы воспользуемся методом электроэрозионной обработки. Для изготовления двухмерного фотошаблона по разработанному эскизу был выбран негативный фотошаблон на основе фотографической эмульсии.

Основной материал и результаты. Опираясь на существующие памятные знаки мы создали векторные двухмерные модели памятных медалей и их ориентировочные макеты в системе ArtCAM. В программе ArtCAM используя векторные примитивы, построили модель лицевой и тыльной части памятной медали. Используя стандартные методы построения рельефа, строим макет медали для визуализации конечного продукта. Пользуясь теми же средствами построения, создаем тыльную сторону медали университета. Используя тот же алгоритм действий что и в случае с медалью БГТУ «ВОЕНМЕХ», построим векторный эскиз и рельефный макет медали кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем». Для изготовления пуансон-матриц мы воспользуемся методом электроэрозионной обработки. Для изготовления двухмерного фотошаблона по разработанному эскизу был выбран негативный фотошаблон на основе фотографической эмульсии.

Экспонирование — это процесс облучения светочувствительного материала активным электромагнитным излучением. При экспонировании изменяются физико-химические свойства материала. Например, в фотоэмульсии происходит образование металлического серебра. Для получения модели на фотополимерной пластине в первую очередь из фотополимерного листа был вырезан прямоугольник необходимых размеров. Затем имеющийся фотошаблон был наложен на вырезанный фотополимерный прямоугольник и отправлен в экспонирующее устройство. При попадании ультрафиолетового излучения на фотошаблон, прозрачное изображение пропускает ультрафиолетовые лучи, которые попадают на фотополимер и способствуют его затвердеванию, в отличие от участков куда лучи не попали, он остается мягким и легко смывается мыльным раствором воды. После окончания экспонирования на фотополимерной пластине был получен отпечаток интересующего нас рисунка. Затем пластина была промыта мыльным раствором в воде. Процесс изготовления каучуковой формы начинается с приклеивания двусторонним скотчем фотополимерной модели медали (приклеивается та сторона, на которой нет рельефа) к ровной прозрачной поверхности типа стекла, оргстекла. Затем по периметру фотополимерной пластины была сделана опалубка. Для опалубки использовались твердые пластиковые бруски высотой 10 мм и шириной 5 мм. Опалубка так же приклеивается двусторонним скотчем к оргстеклу.

– Поддерживается большинство распространенных настольных гравировально-фрезерных станков.

Постановка цели и задачи разработки. Используя существующую атрибутику Балтийского Государственного Технического Университета (рис. 1), необходимо создать трёхмерные модели изделий и разработать технологические процессы изготовления памятных знаков «80 лет БГТУ «ВОЕНМЕХ» и «80 лет кафедре «Высокоэнергетические устройства автоматических систем».

Основной материал и результаты. Опираясь на существующие памятные знаки мы создали векторные двухмерные модели памятных медалей и их ориентировочные макеты в системе ArtCAM. В программе ArtCAM используя векторные примитивы, построили модель лицевой и тыльной части памятной медали. Используя стандартные методы построения рельефа, строим макет



Рис. 2. Фотошаблоны

Следующий шаг это заливка полученной опалубки жидким каучуком, смешенным с катализатором для затвердевания смеси. Для того что бы получить медное покрытие на каучуковой поверхности, его тщательно покрывают графитным порошком. Графит в свою очередь является отличным проводником и подсоединив покрытую графитом поверхность каучуковой формы к источнику постоянного тока мы получаем медное покрытие (рис. 3).

Полученным электродом в электроэрозионном оборудовании прожигаем рельеф на заготовках пуансон-матриц (рис. 4).



Рис. 3. Медный электрод



Рис. 4. Пуансон-матрицы

Для штамповки памятных медалей используем гидравлический пресс усилием 2000 т. Исходной заготовкой для штамповки медалей являются латунные кружки. Штампованные изделия представлены на рис. 5.



Рис. 5. Штампованные изделия «Памятный знак»

Выводы. С помощью ArtCAM изготовлены памятные медали БГТУ «ВОЕНМЕХ» и кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем». В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, успешно реализуется программа сотрудничества DELCAM с образовательными учреждениями, результатом этой работы является успешное освоение сту-

дентами современных программных комплексов и их практическое применение. Использование оборудования лаборатории кафедры Е4, а также сотрудничество с ООО «Полиформ» позволило отработать технологические процессы изготовления медалей диаметром 60 и 40 мм и изготовить опытные партии готовой продукции.

Литература

1. *Delcam plc [Electronic resource]: official website.* – Mode of access: www.delcam.com. Дата обращения: 20.09.2013.
2. *ArtCAM Pro. Руководство пользователя [Текст] / Delcam plc.* – 2009. – 469 с.
3. *ArtCAM 2010. Руководство пользователя [Текст] / Delcam plc.* – 2010. Вып. SP2 (build 423). – 360 с.
4. *ArtCAM Pro. Справочное руководство [Текст] / Delcam plc.* – 2006. – 421 с.
5. *ArtCAM Pro. Training Course [Text] / Delcam plc.* – 2010. – 254 p.
6. *ArtCAM JewelSmith. Руководство пользователя [Текст] / Delcam plc.* – 2008. Вып. 143. – 407 с.

© А.В. Кащевский, М.Ю. Силаев, Е.Ю. Ремшев, А.В. Титов, С.Г. Ясько

А.В. Кащевский, студ., М.Ю. Силаев, зав. лаб., Е.Ю. Ремшев, зав. лаб., А.В. Титов, к.т.н., доц.

Балтійський державний технічний університет «ВОЕНМЕХ» ім. Д.Ф. Устинова,
м. Санкт-Петербург

С.Г. Ясько

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ДОСВІД РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ «ПАМ'ЯТНИЙ ЗНАК» МЕТОДОМ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

У статті розглядається один із способів виготовлення виробу «Пам'ятний знак» шляхом створення моделі в системі САПР і подальшого втілення її в реальності шляхом холодного штампування. Наведено етапи проектування математичної моделі в системі ArtCAM, а потім послідовне втілення системи пуансон-матриця для виготовлення пам'ятних медалей Балтійського Державного Технічного Університету «ВОЕНМЕХ».

Ключові слова: тривимірна модель, технологічний процес, фотошаблон, фотополімер, пуансон-матриця, штампування.

A.V. Kashchevsky, student, M.Yu. Silaev, chief of laboratory, Ye.Yu. Remshev, chief of laboratory, A.V. Titov, Ph.D., Associate Professor

Baltic State Technical University «Voenmech» D.F. Ustinov, St. Petersburg

S.G. Yasko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

EXPERIENCE IN DEVELOPING PRODUCTS MANUFACTURING TECHNOLOGY «MEMORABLE SIGN» METHOD OF METAL FORMING

The articles describes one of the ways of making «The memorial sign» by creating a model in CAD system and then implement it in reality by cold forming. We look at the steps of designing a mathematical model of the system ArtCAM, and then punch the consistent implementation of the system matrix for the production of commemorative medals Baltic State Technical University «VOENMECH».

Keywords: mathematical model, manufacturing process, photo mask, photopolymer, punch-die, stamping.

АНАЛИТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОПЕРАЦИЯХ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ОБЩЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Представлен аналитический обзор обработки деталей методом поверхностного пластического деформирования. Приведены статистические данные повышения твердости различных сталей, а также графические зависимости для определения глубины наклепанного слоя, остаточных напряжений, микротвердости углеродистых сталей с различными структурами. Указана целесообразность и возможности применения виброобработки на операциях ударного упрочнения поверхностного слоя деталей.

Ключевые слова: аналитика, упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, твердость, остаточные напряжения, виброобработка, амплитуда колебаний, технология виброупрочнения.

1. Введение и обзор исследований

В современном машиностроении актуальна проблема повышения ресурса, надежности и работоспособности машин, а так же, экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Вместе с тем, применяемая в механообрабатывающих производствах финишная обработка, как правило, обеспечивает геометрическую точность, форму и расположение поверхностей, а требуемому качеству поверхностного слоя уделяется меньшее внимание. Особую роль для повышения прочности деталей машин играют технологические процессы упрочнения. Известны следующие методы упрочнения: термические, криогенные; химико-термические; физико-химические; физические; методы поверхностного пластического деформирования [1].

Упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяет создать поверхностный слой с заданными геометрическими, точностными, физико-механическими и прочностными свойствами. Упрочнение ППД реализуется за счет многократного поверхностного локального пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Наряду со снижением высотных параметров шероховатости поверхности упрочнение ППД обеспечивают образование наклепа и формирование сжимающих остаточных напряжений, вызывают благоприятные структурные изменения и частичную релаксацию ранее образованных технологических напряжений.

В настоящее время широко используются различные методы отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД), а именно: обкатка шариками и роликами, алмазное выглаживание, галтовка в барабанах, пневмодинамический наклеп, дробеструйная и дробеметная обработка, вибронакатывание и вибровыглаживание, обработка щетками, шарико-стержневое упрочнение. Методы обработки ППД получают дальнейшее развитие: разработаны новые методы гидродробеструйного упрочнения, экструзионной обработки, ультразвукового упрочнения, комбинированные методы местного упрочнения, виброударной обработки, включающей в себя виброабразивную обработку, виброударное упрочнение и виброполирование, виброгалтовку [2, 3, 4, 5].

Теория ударных процессов является основой для изучения виброударного процесса [6, 7, 8]. При этом на основе теории вибрационного перемещения рабочих сред иссле-

дуются процессы виброобработки, которые представляют интерес для проектирования виброударных технологий и оборудования.

Как известно, упругопластическое деформирование осуществляется двумя способами, состоящими в воздействии твердых тел или концентрированных потоков энергии, направленных на поверхности деталей. ППД твердыми телами наиболее распространенный способ упрочнения. Его осуществляют воздействием на обрабатываемую поверхность деформирующих элементов. Взаимодействие деформирующего элемента с поверхностью можно разделить на две группы: квазистатическую и динамическую. Квазистатическая группа предполагает создание деформирующего усилия от непрерывного контакта инструмента с деталью. В динамической группе пластическое деформирование поверхностного слоя осуществляется многократным ударным воздействием гранул рабочей среды на обрабатываемую поверхность детали.

2. Характер изменения параметров поверхностного слоя под действием пластического деформирования

Известно, что у не закаленных сталей при их поверхностном деформировании наблюдается увеличение твердости более чем на 100 %, а у закаленных — только на 10...15 % [3, 9, 10]. Прирост твердости определяется структурой деформируемой стали. Наибольшее повышение твердости наблюдается у сталей с аустенитной, ферритной и мартенситной структурами, наименьшее — с перлитной и сорбитной структурами. Абсолютный прирост твердости в результате наклепа составляет: для мартенситных структур 180...320 НВ; для сталей, содержащих избыточный феррит, 60...120 НВ. Структурные составляющие имеют различную способность упрочнения. Для структуры мартенсита глубина наклепанного слоя больше, чем при тех же условиях для других структур. Структуры сорбита имеют наименьшую глубину наклепанного слоя (рис. 1).

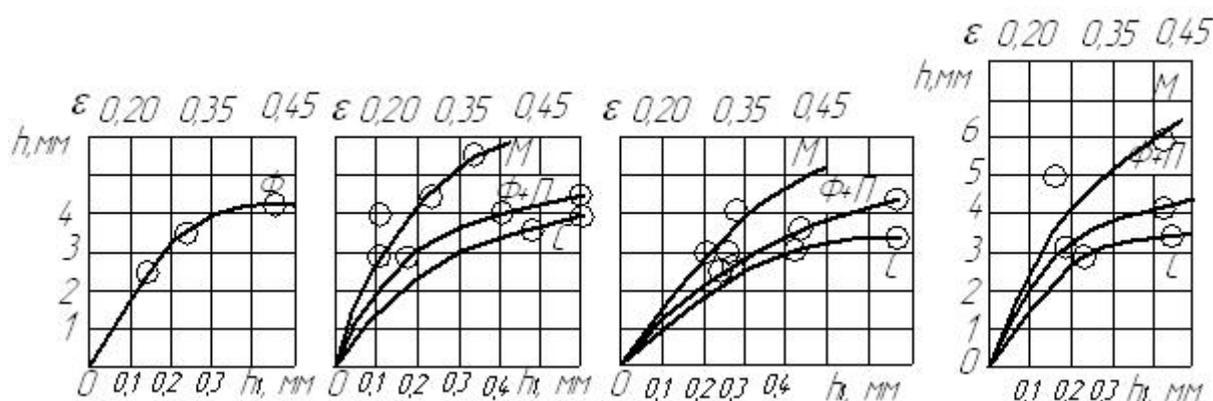


Рис. 1. Зависимость глубины наклепанной зоны h от глубины отпечатка h_1

для углеродистых сталей с различными структурами:

a – железо армко; b – сталь 35; v – сталь 45; z – сталь 50;

Ф – феррит; М – мартенсит; П – перлит; С – сорбит [3]

Установлено, что деформационное упрочнение характеризуется увеличением пределов текучести, твердости, хрупкости и снижением пластичности. Также претерпевают изменения эффекты ползучести, внутреннего трения, электросопротивления, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости, остаточной индукции. Эти изменения физико-механических свойств поверхностного слоя металла зависят от степени пластического деформирования, и их необходимо учитывать при выборе режимов ППД на операциях обработки деталей различного назначения.

Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, как правило, имеет характерный вид (рис. 2) [11, 12]. Различные технологические режимы, позволяют варьировать глубину распределения остаточных напряжений, которая в основном

пропорционально возрастает с ростом размеров очага деформации. Что касается интенсивности сжимающих напряжений, то основное влияние на нее оказывает скорость пластического деформирования и продолжительность обработки.

Так же исследовано распределение микротвердости в поверхностном слое после ППД [11, 12]. Форма кривой распределения микротвердости по толщине поверхностного слоя до некоторого момента не имеет подслоного максимума (рис. 3). Зависимость глубины и интенсивности прироста микротвердости от технологических режимов такое же, как и остаточных сжимающих напряжений. Однако, при длительном времени упрочнения рост микротвердости на поверхности прекращается. Несмотря на дальнейший рост микротвердости под поверхностью, явление поверхностного перенаклепа отрицательно сказывается на контактной выносливости и усталостной прочности.

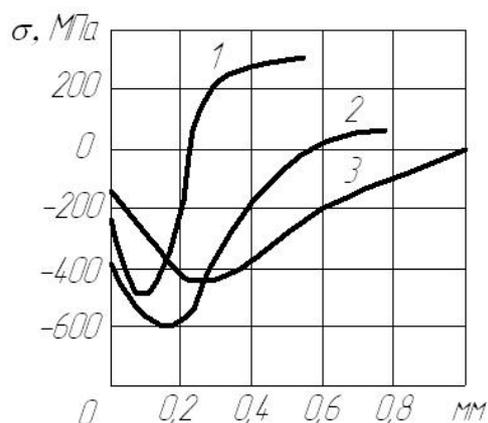


Рис. 2. Остаточные напряжения по глубине упрочненного слоя в образцах из стали 18Х2Н4ВА после:

1 – наклепа дробью; 2 – центробежно-шариковой обработки; 3 – раскатывания [13]

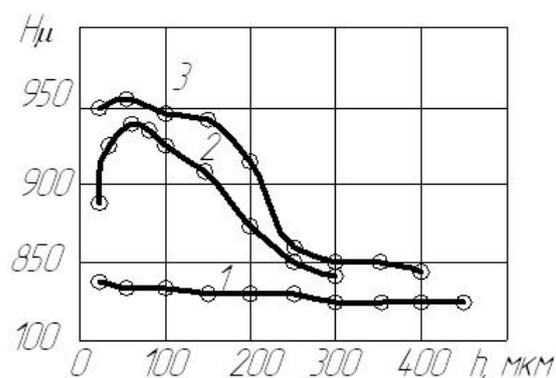


Рис. 3. Изменение микротвердости эвольвенты зуба шестерни из стали 20ХЗВМФ в зависимости от продолжительности обработки твердосплавными шарами:

1 – исходная; 2 – $T = 300$ мин; 3 – $T = 180$ мин [14]

При завышенных силовых параметрах ударной обработки происходит перенаклеп, в результате которого в поверхностном слое появляются микротрещины, намечается образования отслаивающегося металла, поверхностные зерна сплющиваются и становятся неразличимыми, увеличивается шероховатость поверхности. Наклеп металла можно снять путем отжига. Перенаклеп — необратимый процесс, при котором нагрев не восстанавливает исходную структуру металла и его механические свойства.

Таким образом, методы ППД являются наиболее эффективными и универсальными способами упрочнения деталей. Перечень методов разнообразен, но при этом явления, происходящие в поверхностном слое, имеют общий характер. Проведенный анализ закономерностей процесса ППД показал, что схема деформации остается практически неизменной. Влияние методов ППД на физико-механические и эксплуатационные свойства деталей определяется не столько методом, сколько технологическими режимами, которые возможно обеспечить. Глубина упрочнения, прирост микротвердости поверхностного слоя, а также усталостная прочность, износостойкость, контактная выносливость полностью связаны с условиями энергетического воздействия, которое обеспечивают методы ППД. Различные методы ППД рассматривают с единых позиций, что позволяет выработать методику оценки эффективности упрочнения.

3. Общность отделочно-зачистных и упрочняющих операций виброобработки

В отличие от отделочно-зачистной вибрационной обработки, где съем металла является главным показателем производительности процесса, при виброупрочняющей обработке

ударного характера этот показатель отсутствует и задачей обработки является создание слоя с повышенной микротвердостью достаточной толщины.

Из графиков (рис. 4–7) очевидна зависимость результатов упрочнения от амплитуды колебаний рабочей среды в контейнере вибростанка. При этом временные зависимости носят экстремальный характер, а это значит, что процесс упрочнения за определенное время достигает насыщения, после чего следует разупрочнение, сопровождающееся ухудшением состояния поверхности. Экспериментами установлено, что роль частоты колебаний при упрочнении отличается от таковой при отделочно-зачистной виброобработке. А именно, частота определяет общее количество ударов гранул среды, воспринятых упрочняемой поверхностью детали, а амплитуда формирует силу удара, необходимую для процесса упрочнения.

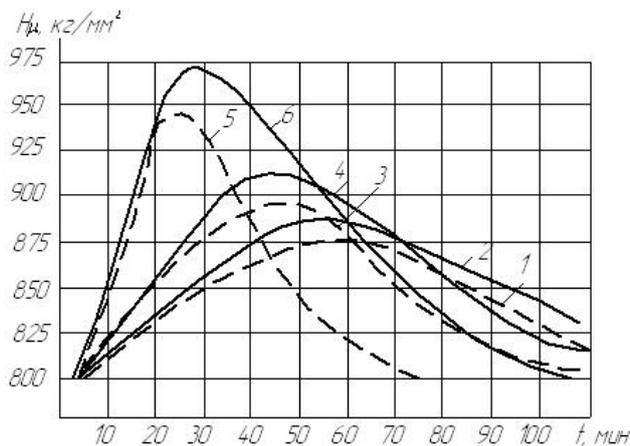


Рис. 4. Влияние времени обработки (t), амплитуды вибрации (A), диаметра шарика на значение поверхностной микротвердости сталей X12M и P18 ($f = 35$ Гц):

1, 2 – $A = 2$ мм; 3, 4 – $A = 2,5$ мм; 5, 6 – $A = 3,5$ мм;
1, 3, 5 – $d = 8$ мм; 2, 4, 6 – $d = 14$ мм [10, 15]

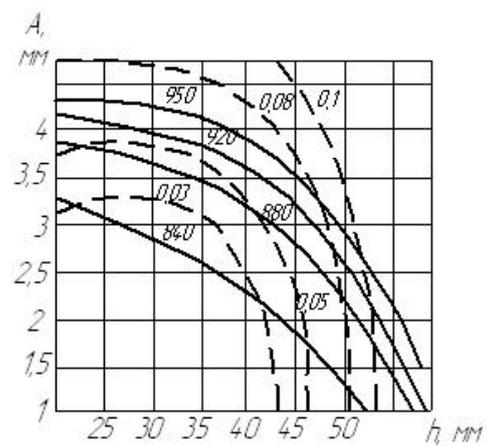


Рис. 5. Зависимость поверхностной микротвердости H_{μ} ($\text{кг}/\text{мм}^2$) и глубины упрочнения h (мм) от амплитуды A и частоты f вибрации:

$d = 11$ мм, $t = 50$ мин [10, 15]

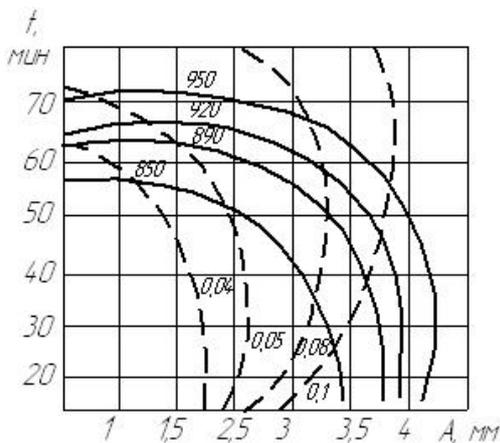


Рис. 6. Зависимость поверхностной микротвердости H_{μ} ($\text{кг}/\text{мм}^2$) и глубины упрочнения h (мм) от времени обработки t и амплитуды вибрации:

$d = 11$ мм [10, 15]

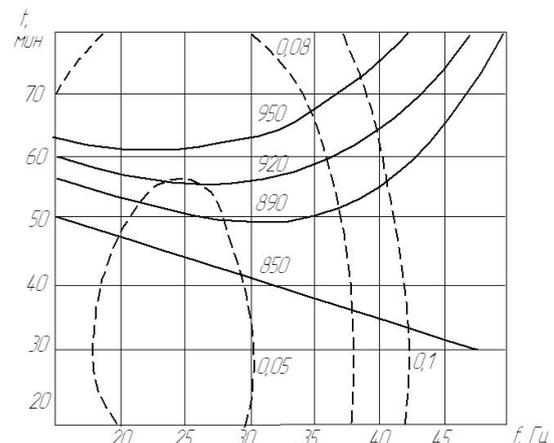


Рис. 7. Зависимость поверхностной микротвердости H_{μ} ($\text{кг}/\text{мм}^2$) и глубины упрочнения h (мм) от времени t и частоты f вибраций [10, 15]

Таким образом, при виброударном упрочнении обеспечивается равномерность обработки, исключается перенаклеп, отсутствует вредное тепловое воздействие. Вместе с тем снижается шероховатость, волнистость и пористость, локализуется воздействие поверхностных микродефектов деталей, изготовленных прессованием из порошков, релаксируются технологические напряжения.

Перечисленные результаты виброупрочнения обеспечиваются выбором оптимальных режимов обработки для соответствующих условий эксплуатации деталей и изделий в целом. Необходимо уточнить, что процессы виброударного упрочнения сохраняют точность линейных размеров, расположение и формы поверхностей, достигнутые на предыдущей операции [16].

Виброударное упрочнение применяется в производстве деталей сложной формы после механической обработки или абразивной зачистки. При этом обрабатываемые детали, с помощью специальных приспособлений устанавливаются в контейнере вибростанка. Контейнер на 70–80 % объема заполняется рабочей средой, состоящей из стальных шариков и технологической жидкости. Под действием колебаний контейнера с амплитудой, соответствующей виброскорости 80–160 см/с, рабочая среда приобретает способность сопрягаться с поверхностью детали, и периодически соударяясь с ней, образует множество пластических отпечатков, которые по мере обработки образуют упрочненный поверхностный слой.

4. Характеристики параметров технологии виброударного упрочнения

Основными параметрами технологического процесса виброударного упрочнения являются: амплитуда и частота колебаний; форма траектории движения контейнера; скорость циркуляции деталей; диаметр гранул рабочей среды и состав технологической жидкости; объем загрузки и продолжительность упрочнения. Для виброударного упрочнения выбираются следующие значения параметров: амплитуда колебаний 5...12 мм, частота колебаний 24...100 Гц; форма траектории: от круговой до эллипсной и линейной. Скорость вращения детали составляет до 5 об/мин. Диаметр шариков выбирается в зависимости от радиуса галтелей и сопряжений поверхностей деталей, а также требуемой глубины наклепа, величины и глубины формирования остаточных напряжений: в пределах от 1,5 до 20 мм. Объем загрузки рабочей среды в контейнер незамкнутой формы составляет 70–75 %.

Продолжительность упрочнения 45...90 мин определяется опытным путем исходя из величины прогиба образцов свидетелей. В этом случае гарантируется равномерное упрочнение детали сложной формы со следующими технологическими показателями: шероховатость поверхности $Ra = 0,63...0,4$ мкм при исходной не более $Ra = 1,25$ мкм; остаточные напряжения 600...650 МПа; наклеп 8–10 %; глубина наклепа 0,32...0,35 мм [16, 17].

При виброупрочняющей обработке сталей типа 30ХГСНА, ВНС малоцикловая усталостная долговечность повышается в 2,5...3 раза, сталей типа ВКС в 4 раза, а последующее виброударное упрочнение их повышает малоцикловую усталостную долговечность соответственно в 2,8...3,5 раза и 4,7...5,5 раза. Для алюминиевых сплавов типа Д16Т виброударное упрочнение повышает усталостную долговечность в 3...5 раз. Коррозионно-усталостная долговечность при виброударном упрочнении также повышается: для стали 30ХГСНА в 1,5...2 раза, для Д16Т в 3...3,5 раза. При анодировании образцов из Д16Т и последующем виброударном упрочнении коррозионно-усталостная долговечность возрастает в 1,2...1,5 раза; в то время как анодирование без упрочнения снижает ее в 1,7...2,3 раза. Коррозионная стойкость при образовании наклепа, предшествующему по величине перенаклепу, возрастает: для стали 30ХГНА, при испытании в 5-процентном водном растворе соли NaCl — в 2,5...3 раза в сравнении со шлифованными образцами. При совмещении виброударного упрочнения с нанесением коррозионно-стойких покрытий, например, дисульфида молибдена, коррозионная стойкость возрастает в 3...8 раз. Контактная прочность при виброударном упрочнении возрастает до 1,5...2 и более раз, микротвердость повышается до 1,25...1,8 раза, радиус выступов микронеровностей увеличивается в 3...5 раз. В этой связи износостойкость виброупрочненных деталей на этапе приработки возрастает, например, для стали Х12Ф1 с исходной шероховатостью поверхности $Ra 1,25...0,8$ мкм в 1,3...1,8 раза, в сравнении со шлифованной поверхностью [16]. Данные результаты говорят о перспективном использовании данного метода виброударного упрочнения.

Рассмотрев результаты теоретических и экспериментальных исследований виброобработки, и применение её для ППД, можно отметить ряд общих закономерностей и особенностей.

1. Процесс виброобработки характеризуется отсутствием жесткой кинематической связи между вибростанком, инструментом и деталями. При этом инструмент (рабочая среда) представляет собой совокупность гранул, движущихся под действием силового импульса, передаваемого от вибровозбудителя через стенки контейнера.

2. Удаление металла осуществляется выступами абразивных зерен путем микрорезания. Профиль шероховатости обработанной поверхности формируется за счет многократного наложения и пересечения абразивных царапин. Изменение шероховатости поверхности имеет экспоненциальный характер с достижением установившегося значения. С возрастанием времени обработки пропорционально увеличивается съём металла и снижается микрошероховатость.

3. Поверхностное пластическое деформирование, как и формирование профиля микрошероховатости обработанной поверхности, осуществляется в результате многократного наложения и пересечения отпечатков, полученных от силового воздействия металлических гранул, в виде стальных или чугунных шариков.

4. Наличие рабочих растворов, их свободный подвод в зону обработки, возможность ввода химически активных и поверхностно-активных веществ.

5. Низкотемпературный характер обработки. Отсутствие на обработанной поверхности температурных дефектов в виде прижогов и микротрещин.

6. Возможность обработки деталей сложной формы из любых материалов.

7. Общие технологические возможности: осуществление шлифования, полирования, упрочнения, очистки, мойки, удаление заусенцев и облоя.

Выводы. Аналитика исследований, виброударного упрочнения, проведенных в НИЛ «ОСА» ВНУ им. В. Даля [18] показывает, что такая технология является эффективным средством снижения высотных параметров шероховатости поверхности, улучшения структуры микронеровностей, формирования сжимающих остаточных напряжений и наклепа в деталях сложной формы. Технологические процессы виброударного упрочнения позволяют улучшить эксплуатационные свойства изделий, а именно: повысить усталостную, контактную, коррозионную прочность и долговечность; увеличить коррозионную и температурную стойкость.

Литература

1. Кулаков, Ю.М. *Отделочно-зачистная обработка деталей [Текст]* / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
2. *Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах [Текст]* / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
3. *Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст]: справ. / Под ред. А.Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
4. *Абразивные материалы и инструменты. Каталог-справочник.* – М.: НИИ по машиностроению, 1981. – 360 с.
5. Димов, Ю.В. *Обработка деталей свободным абразивом [Текст]* / Ю.В. Димов. – Иркутск: ИрГТУ, 2000. – 292 с.
6. Байкалов, А.К. *Введение в теорию шлифования материалов [Текст]* / А.К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 270 с.
7. Королев, А.В. *Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки [Текст]* / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1989. – 320 с.
8. Маслов, Е.Н. *Теория шлифования материалов [Текст]* / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
9. *New ways to grind and finish // Metalwork. Prod* – 1994. – 38, № 5. – 138 с.
10. Бабичев, А.П. *Основы вибрационной технологии [Текст]* / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2008. – 694 с.

11. Якимов, А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
12. Вибрационные станки для обработки деталей [Текст] / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
13. Бойко, М.А. Повышение технологических характеристик абразивных гранул для виброабразивной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Ростов-на-Дону, 2000. – 165 с.
14. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом [Текст] / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. – Ростов н/Д: изд. центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
15. Негруб, С.Л. Повышение эффективности финишной обработки эластичными полимер-абразивными инструментами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Днепрпетровск, 2008. – 210 с.
16. Вибрационные машины и технологии. Часть 1 / С.Ф. Яцун, Д.Н. Сафаров, В.Я. Мищенко и др.: Элм, 1999. – 142 с.
17. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей [Текст] / А.П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1974. – 134 с.
18. Волков, И.В. Повышение производительности процесса вибрационной обработки деталей на отделочных и упрочняющих операциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Одесса, 2008. – 174 с.

© И.В. Волков

І.В. Волков, к.т.н., доц.

Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

АНАЛІТИКА ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДА ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ОПЕРАЦІЯХ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗАГАЛЬНОБУДІВНИХ ВИРОБНИЦТВ

Представлено аналітичний огляд обробки деталей методом поверхневого пластичного деформування. Наведено статистичні дані підвищення твердості різних сталей, а також графічні залежності, щодо визначення глибини наклепаного шару, залишкових напруг, мікротвердості вуглецевих сталей з різноманітними структурами. Вказано можливості використання віброобробки на операціях ударного зміцнення поверхневого шару деталей.

Ключові слова: аналітика, зміцнення, поверхневе пластичне деформування, твердість, залишкові напруги, віброобробка, амплітуда коливань, технологія віброзміцнення.

I.V. Volkov, Ph.D., Associate Professor

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

ANALYTICS OF APPLYING METHOD OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION ON THE OPERATIONS OF HARDENING OF PARTS IN GENERAL MACHINE-BUILDING INDUSTRIES

An analytical review of processing of parts by surface plastic deformation is presented. The statistical data of increase of the hardness of various steels, and the graphical dependence for determining depth of the cold-hardened layer, residual stresses, micro-hardness of carbon steels with different structures are given. Advisability and possibility of applying of vibration treatment on operations of hardening of surface layer of parts are shown.

Keywords: analytics, hardening, surface plastic deformation, hardness, residual stresses, vibration treatment, the amplitude of oscillation, the technology of vibrational hardening.

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ARTCAM PRO ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ГЕРБА ПОЛТНТУ

Стаття присвячена застосуванню в навчальному процесі можливостей геометричного моделювання дизайну декоративного рельєфу з подальшим розрахунком траєкторії фрезерної обробки на верстатах із ЧПК із застосуванням програми ArtCAM Pro від компанії Delcam plc.

Ключові слова: вектор, декоративний 3D рельєф, комбінований рельєф, импорт, візуалізація.

Постановка проблеми. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка включено до мережі освітніх закладів України в рамках єдиного проекту компанії Delcam plc «Передові комп'ютерні технології для університетів України». Студенти електромеханічного факультету вивчають новітнє ліцензоване програмне забезпечення одного з світових лідерів геометричного тривимірного моделювання, приймають участь в міжнародних олімпіадах та конкурсах з використання можливостей програмного комплексу PowerSolution, складовою частиною якого є ArtCAM Pro — сучасний комплекс проектування дизайну декоративного 3D рельєфу по двомірному зображенню з подальшим розрахунком траєкторії фрезерної обробки на верстатах із ЧПК [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нові можливості програми є новаторським ноу-хау компанії Delcam plc, що дає змогу швидко проектувати вироби за індивідуальними параметрами.

Постановка задачі. В навчальний процес студентів напряму підготовки «Технологія машинобудування» введено дисципліну «Комп'ютерне моделювання», об'єкт вивчення — комп'ютерний комплекс PowerSolution, складовою якої є програма ArtCAM Pro. Попередньо студенти вивчали комплекс КОМПАС-3D. Студенти виконують проекти, які мають подальше впровадження у виробництво.

Основна частина. Герб Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка створений викладачем архітектурного факультету в 1994 році відомим Полтавським архітектором В.О. Трегубовим. Формат зображення — Windows Metafile (розширення файлу .wmf), тобто оригінал має векторну структуру з тінями (рис. 1).

Підготовка початкового зображення виключила тіні, а також було передбачено групування складових об'єктів у десять основних складових: малий герб України, малий герб ПолтНТУ, ліва та права гілки, стрічки, написи, листя 1,5 мм, листя 2 мм, листя 3 мм. В подальшому дане структурування перейшло на відповідні векторні шари рельєфу проекту ArtCAM Pro [2].

Шари рельєфу складають комбінований рельєф, який представляє деталь, яку потрібно обробити. Векторні дані більш пристосовані (порівняно з растровими) для створення гладких елементів, крім того, їх можна використовувати безпосередньо для завдання траєкторії інструменту, що покращує фінішну поверхню.

У процесі підготовки векторного зображення особливо трудомісткими виявилися процеси ручного редагування «петель» (мініатюрних замкнутих просторів у вуз-



Рис. 1. Герб ПолтНТУ

лах контуру, що з'являються після імпорту векторного зображення, наприклад з формату Windows Metafile). Через їх мініатюрні розміри вони є непомітними і тому при побудові рельєфу вникають помилки. Щоб виявити ці «петлі» ми скористались функцією «Сгрупувати вектор», яка допомогла нам у їх виявленні [3].

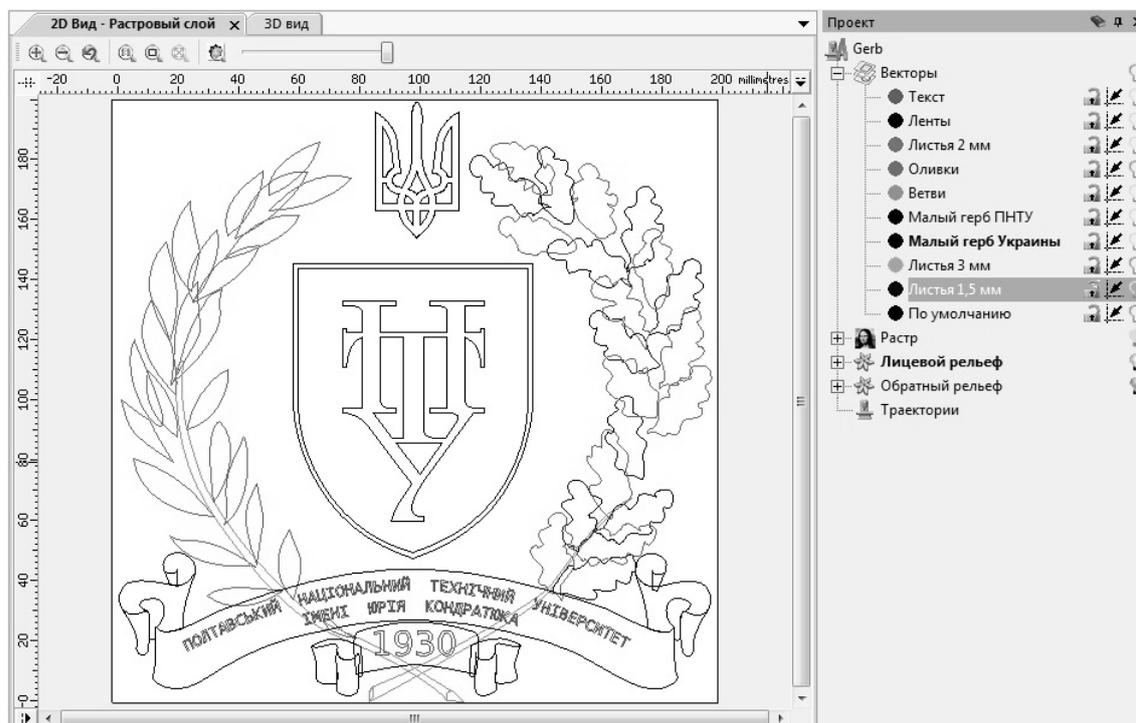


Рис. 2. Процесс підготовки векторних шарів

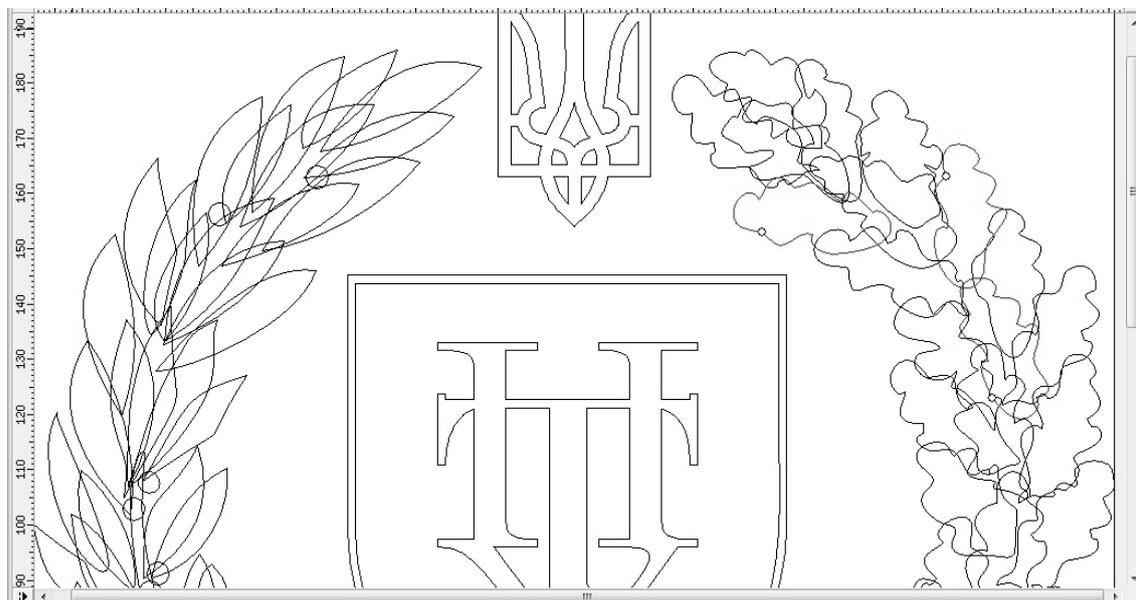


Рис. 3. Виявлення «петель»

Видалення «петель» виконуємо за допомогою команди «обрезка», яка видаляє вибрану нами частину вектора до перетину з вектором який знаходиться поруч.

Побудову рельєфу було розпочато з побудови малих гербів України та ПолтНТУ. За допомогою редактора форми задаємо для даних векторів певні параметри (початкова висота і кут профілю рельєфу) та видавлюємо дані об'єкти [4].

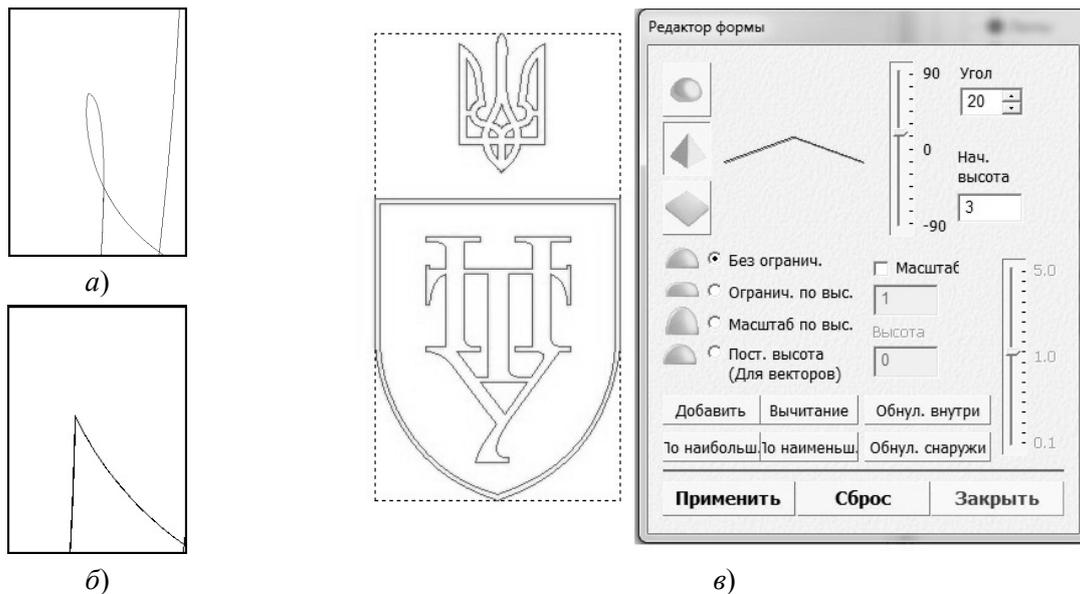


Рис. 4. Редагування «петель» (а і б – відповідно до і після видалення) та редактор форми (в)

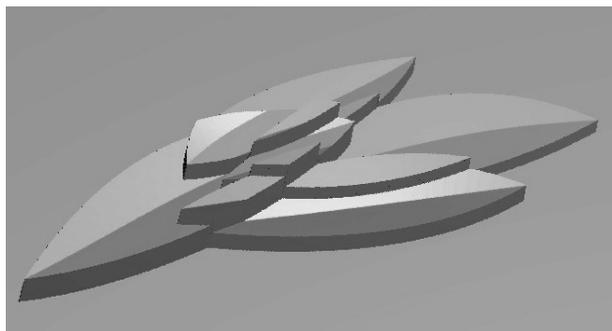


Рис. 5. Накладання шарів

Наступним етапом була побудова листя з лівої та правої гілки нашого герба. Складнощі в побудові на цьому етапі були викликані тим що для більшої реалістичності це листя потрібно було розмістити на висотах і так щоб поверхні не накладались одна на одну.

Для вирішення цієї проблеми ми розташували наше листя в різних векторних шарах та в редакторі форми при введенні параметрів для наших векторів вказуємо, що нам потрібно видавлювати поверхню по найбільшій або найменшій частині вектора в залежності від його положення (рис. 6) [5].

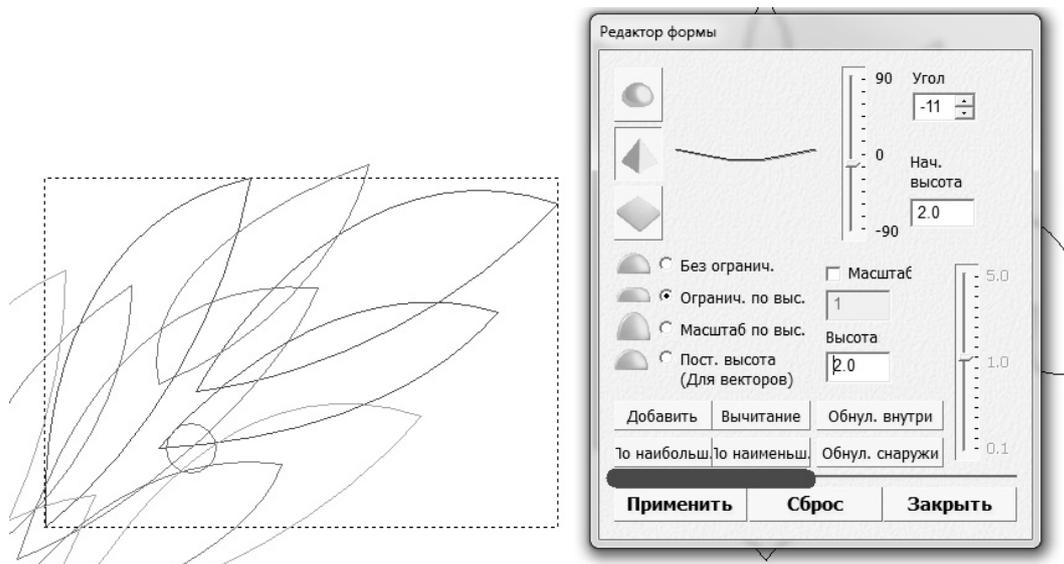


Рис. 6. Побудова листя

Аналогічним методом будемо стрічку з написом та отримуємо вже готову модель нашого герба.

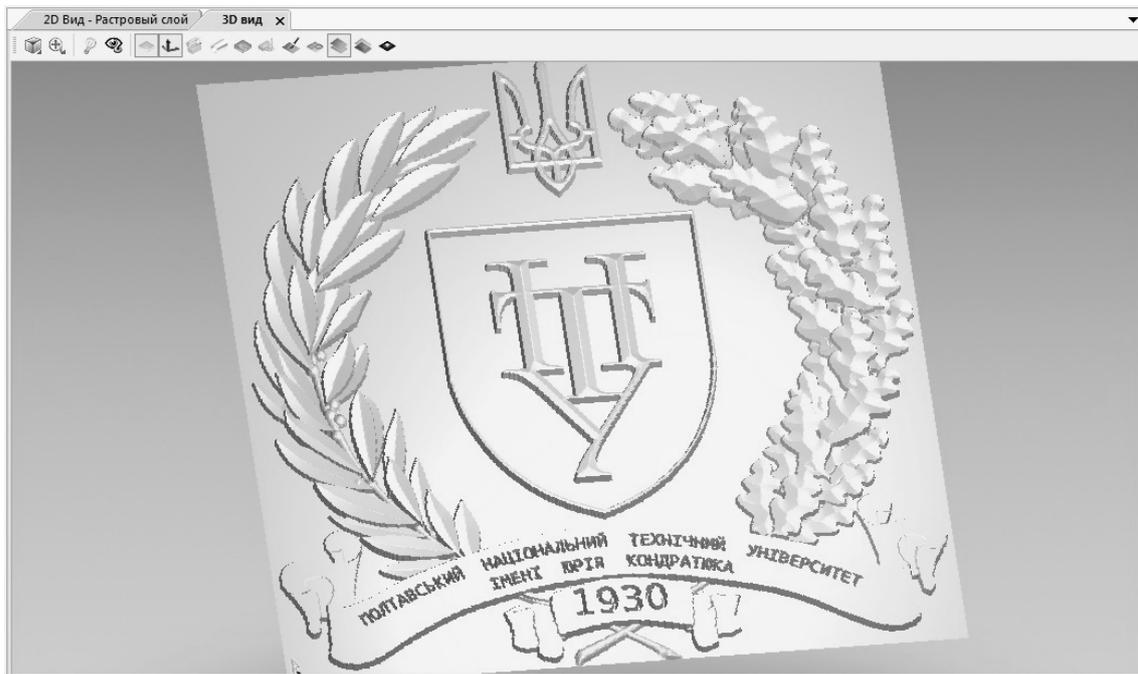


Рис. 7. Трьохвимірний вигляд рельєфу

Наступним і останнім етапом є побудова траєкторій обробки рельєфу. В розділі траєкторії вибираємо метод обробки «Обработка рельефа» та задаємо параметри (межі обробки, інструмент та режими різання, а також параметри заготовки).

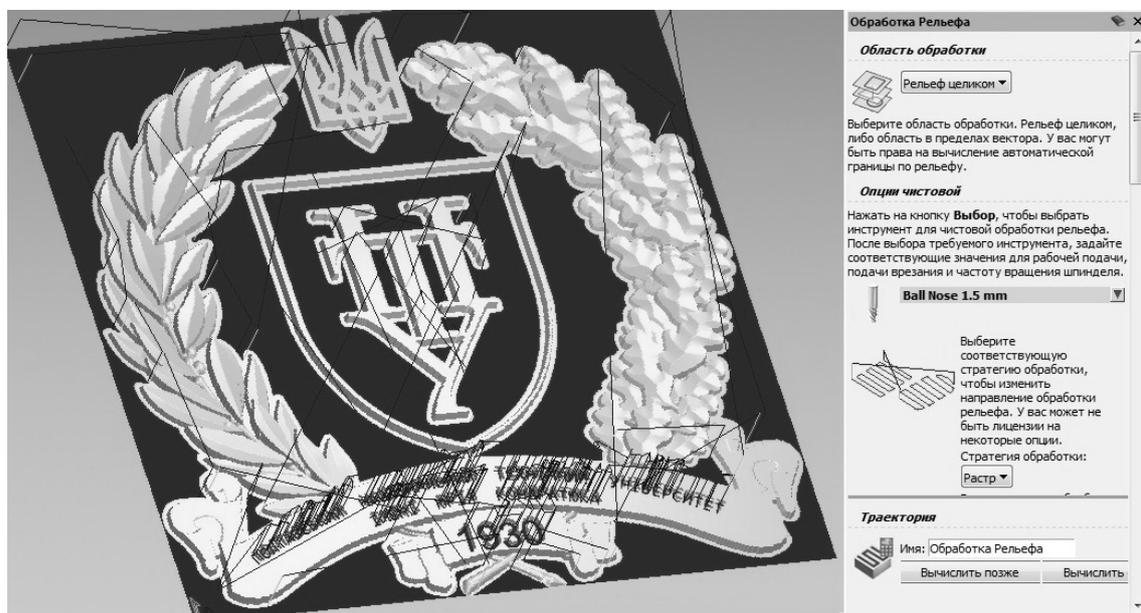


Рис. 8. Обработка рельефу

Виконавши візуалізацію траєкторії бачимо, що з інструментом який використали не може обробити напис. Тому вибираємо інший метод обробки «Гравировка» задаємо параметри. Після візуалізації всіх траєкторій зберігаємо їх у вигляді УП-кода.



Рис. 9. Імітація обробки рельєфу

Висновки. Використання програмного продукту ArtCAM Pro у навчальному процесі для студентів напрямку підготовки «Інженерна механіка» дозволяє їм отримати практичні навички з розробки тривимірних моделей, що мають складні художні поверхні та керуючих програм для їх обробки. Отримані студентами навички з програмування верстатів з ЧПК з використанням комплексу Delcam Solution дозволяють їм впевнено конкурувати на ринку праці.

Литература

1. Delcam plc [Electronic resource]: official website. – Mode of access: www.delcam.com.
2. ArtCAM Pro. Руководство пользователя [Текст] / Delcam plc. – 2009. – 469 с.
3. ArtCAM 2010. Руководство пользователя [Текст] / Delcam plc. – 2010. Вып. SP2 (build 423). – 360 с.
4. ArtCAM Pro. Справочное руководство [Текст] / Delcam plc. – 2006. – 421 с.
5. ArtCAM Pro. Training Course [Text] / Delcam plc. – 2010. – 254 p.
6. ArtCAM JewelSmith. Руководство пользователя [Текст] / Delcam plc. – 2008. Вып. 143. – 407 с.

© О.І. Сороковий, С.Г. Ясько, Д.М. Здыхальський

А.И. Сороковой, к.т.н., доц., С.Г. Ясько, ст. преп., Д.М. Здыхальский, студ.
Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ARTCAM ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕРБА ПОЛТНТУ

Статья посвящена применению в учебном процессе возможностей геометрического моделирования дизайна декоративного рельефа с последующим расчетом траектории фрезерной обработки на станках с ЧПУ с применением программы ArtCAM Pro от компании Delcam plc.

Ключевые слова: Вектор, декоративный 3D рельеф, комбинированный рельеф, импорт, визуализация.

O.I. Sorokovyy, Ph.D., Associate Professor, S.G. Yasko, Senior Lecturer, D.M. Zdyhalskyy, student

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

APPLICATION OF COMPUTER SYSTEMS ARTCAM TO DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGICAL TRAINING OF COAT OF ARMS POLTNTU

The article focuses on the application in the teaching process capabilities of geometric modeling design decorative relief then calculating the trajectory milling on CNC machines using ArtCAM Pro software from the company Delcam plc.

Keywords: Vector, decorative 3D relief, combined relief, import, visualization.

АЛФАВІТНИЙ ВКАЗІВНИК

| <i>Автор</i> | <i>стор.</i> | <i>Автор</i> | <i>стор.</i> |
|--------------------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| <i>Аргат Р.Г.</i> | 29 | <i>Левинская И.М.</i> | 115 |
| <i>Бабенко Є.О.</i> | 118 | <i>Ляшук О.Л.</i> | 73 |
| <i>Бондарь О.В.</i> | 22 | <i>Маковей В.А.</i> | 61 |
| <i>Бородий Ю.П.</i> | 61 | <i>Мельник О.М.</i> | 149 |
| <i>Боцман І.Ю.</i> | 158 | <i>Мицьк В.Я.</i> | 181 |
| <i>Васильєв А.В.</i> | 124 | <i>Мовшович А.Я.</i> | 7, 18 |
| <i>Верезуб Н.В.</i> | 66 | <i>Мороз Н.Н.</i> | 79 |
| <i>Вовк В.</i> | 25 | <i>Муравлев В.В.</i> | 3 |
| <i>Волков И.В.</i> | 191 | <i>Николенко Р.С.</i> | 57 |
| <i>Гайдар В.А.</i> | 162 | <i>Новосад І.Я.</i> | 53 |
| <i>Гайкова Т.В.</i> | 33 | <i>Носенко О.Г.</i> | 25 |
| <i>Геворкян Э.С.</i> | 149 | <i>Павленко В.Н.</i> | 3 |
| <i>Григоренко С.А.</i> | 25 | <i>Пижов І.М.</i> | 118 |
| <i>Дерябкина Е.С.</i> | 7, 48 | <i>Пімонов Г.Г.</i> | 140 |
| <i>Дзюра В.О.</i> | 143 | <i>Пімонов І.Г.</i> | 140 |
| <i>Долматов А.И.</i> | 18 | <i>Плеснецов Ю.А.</i> | 94 |
| <i>Драгобецкий В.В.</i> | 79 | <i>Попов С.В.</i> | 124 |
| <i>Дюкобю Ф.</i> | 66 | <i>Пузырь Р.Г.</i> | 33, 37 |
| <i>Жигуц Ю.Ю.</i> | 111 | <i>Рей Р.И.</i> | 88 |
| <i>Жолткевич А.Я.</i> | 18 | <i>Ремшиев Е.Ю.</i> | 186 |
| <i>Забара А.С.</i> | 94 | <i>Силаев М.Ю.</i> | 186 |
| <i>Запорожченко А.С.</i> | 99 | <i>Симонова А.А.</i> | 66 |
| <i>Захаров Т.Г.</i> | 181 | <i>Сороковий О.І.</i> | 198 |
| <i>Здихальський Д.М.</i> | 198 | <i>Суглобов Р.В.</i> | 11 |
| <i>Здор В.А.</i> | 22 | <i>Титов А.В.</i> | 186 |
| <i>Зінов'єв Г.С.</i> | 129 | <i>Федорович В.О.</i> | 118 |
| <i>Зуев А.С.</i> | 115 | <i>Филиппи Э.</i> | 66 |
| <i>Калашиников А.В.</i> | 41, 158 | <i>Фролов Е.А.</i> | 22, 25 |
| <i>Калашиникова І.А.</i> | 41 | <i>Хоменко І.В.</i> | 129 |
| <i>Калюжний В.Л.</i> | 99 | <i>Черная Ю.А.</i> | 7 |
| <i>Калюжний О.В.</i> | 105 | <i>Черныш А.А.</i> | 79 |
| <i>Кащевский А.В.</i> | 186 | <i>Шлык С.В.</i> | 134 |
| <i>Клименко В.Г.</i> | 118 | <i>Шпилька А.Н.</i> | 168 |
| <i>Коваленко И.В.</i> | 84 | <i>Шпилька Н.Н.</i> | 168 |
| <i>Корытко Ю.Н.</i> | 66 | <i>Явтушенко А.В.</i> | 88 |
| <i>Кравченко С.И.</i> | 3 | <i>Ясуник С.Н.</i> | 115 |
| <i>Кухарь В.В.</i> | 11, 57 | <i>Ясько С.Г.</i> | 162, 173, 186, 198 |

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| <i>В.Н. Павленко, В.В. Муравлев, С.И. Кравченко</i> ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ | 3 |
| <i>А.А. Мовшович, Ю.А. Черная, Е.С. Дерябкина</i> ВЫБОР СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ КОЛОНОК ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ ШТАМПОВ | 7 |
| <i>В.В. Кухарь, Р.В. Суглобов</i> УЧЕТ СИЛЫ ИНЕРЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗАХВАТНЫХ ОРГАНОВ ГРЕЙФЕРНЫХ ПЕРЕКЛАДЧИКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ШТАМПОВКИ НА ПРЕССАХ | 11 |
| <i>А.И. Долматов, А.А. Мовшович, Н.Д. Жолткевич</i> ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ МАШИН | 18 |
| <i>В.А. Здор, Е.А. Фролов, О.В. Бондарь</i> УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫЕ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ | 22 |
| <i>Е.А. Фролов, О.Г. Носенко, В. Вовк, С.А. Григоренко</i> МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ ОСОБО ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ | 25 |
| <i>Р.Г. Аргат</i> АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА | 29 |
| <i>Т.В. Гайкова, Р.Г. Пузырь</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКЛАДКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ НИЗКИХ КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ | 33 |
| <i>Р.Г. Пузырь</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОБОДЬЕВ КОЛЕС | 37 |
| <i>І.А. Калашикова, А.В. Калашиников</i> ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ БАГАТОСТУПІНЧАСТИХ СВЕРДЛОВИННИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ ОБРОБІТКУ ПОВЕРХНІ | 41 |
| <i>Е.С. Дерябкина</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СТРУКТУРЫ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ | 48 |
| <i>І.Я. Новосад</i> ВПЛИВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕННЯ ГВИНТОВИХ СЕКЦІЙ ГНУЧКИХ КОНВЕЄРІВ | 53 |
| <i>В.В. Кухарь, Р.С. Николенко</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ОСАДКЕ ВЫПУКЛЫМИ ПЛИТАМИ С ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ НАГРУЗКИ | 57 |
| <i>Ю.П. Бородий, В.А. Маковей</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО СЛОЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ | 61 |
| <i>А.А. Симонова, Э. Филиппи, Ф. Дюкобю, Н.В. Везуб, Ю.Н. Корытко</i> УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ | 66 |
| <i>О.Л. Ляшук</i> ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ ГНУЧКИХ ТРУБЧАСТИХ СКРЕБКОВИХ КОНВЕЄРІВ ДВОВИМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ | 73 |
| <i>Н.Н. Мороз, В.В. Драгобецкий, А.А. Черныш</i> УЧЕТ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА СЛОЖНОЙ ВЫТЯЖКИ | 79 |
| <i>И.В. Коваленко</i> МОДЕЛЬ НАГРЕВА ДЕТАЛИ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ | 84 |
| <i>А.В. Явтушенко, Р.И. Рей</i> НАДЕЖНОСТЬ КЛИНОРЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕССОВ | 88 |
| <i>Ю.А. Плеснецов, А.С. Забара</i> АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ | 94 |

| | |
|---|-----|
| В.Л. Калюжний, А.С. Запорожченко ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КУТА ВХІДНОГО КОНУСА ДВОКОНУСНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ КОМБІНОВАНОГО ВИТЯГУВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ | 99 |
| О.В. Калюжний ХОЛОДНЕ ШТАМПУВАННЯ ВИРОБУ З ДВОМА ФЛАНЦЯМИ ІЗ ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАЦІЙ ВИТЯГУВАННЯ, РОЗДАЧІ І ОСАДЖУВАННЯ..... | 105 |
| Ю.Ю. Жигуц ТЕХНОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ХРОМОМАРГАНЦЕВОНІКЕЛЕВОЇ ТЕРМІТНОЇ СТАЛІ Х14Г14Н3Т | 111 |
| С.Н. Ясунік, І.М. Левинская, А.С. Зуев ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ АБРАЗИВА | 115 |
| В.О. Федорович, І.М. Піжов, Є.О. Бабенко, В.Г. Клименко ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОЛКРИСТАЛІЧНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ..... | 118 |
| С.В. Попов, А.В. Васильєв ДОСЛІДЖЕННЯ ЕПІЦИКЛОЇДАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ЗАДАНОГО РУХУ РОБОЧОГО ОРГАНА | 124 |
| Г.С. Зінов'єв, І.В. Хоменко АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИВЧЕННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ..... | 129 |
| С.В. Шлык ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ГИБКЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК С ЛОКАЛИЗОВАННЫМ ОЧАГОМ ДЕФОРМАЦИИ..... | 134 |
| І.Г. Пімонов, Г.Г. Пімонов ОБРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ГІДРОФІКОВАНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН..... | 140 |
| В.О. Дзюра ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПІДНІМАННЯ НА ЗУБ ПРОТЯЖКИ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ НАПІВКРУГЛИХ КАНАВОК ЗА УМОВИ РІВНОМІРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗУБІВ..... | 143 |
| Э.С. Геворкян, О.М. Мельник МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКА ZrO_2 | 149 |
| І.Ю. Боцман, А.В. Калашиников ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОЛКРИСТАЛІЧНИМИ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ..... | 158 |
| В.А. Гайдар, С.Г. Ясько РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ КОНЦЕВЫМИ И ТОРЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ С ПОСТОЯННЫМ ВО ВРЕМЕНИ КОЛИЧЕСТВОМ СНИМАЕМОГО МАТЕРИАЛА | 162 |
| А.Н. Шпилька, Н.Н. Шпилька ТЕНДЕНЦІИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ | 168 |
| С.Г. Ясько ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ПЕНЕТРАЦІЇ ТА СТАТИЧНОМУ ЗОНДУВАННІ РОЗШИРЕНИМ НАКОНЕЧНИКОМ ІРУНТОЦЕМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ | 173 |
| Т.Г. Захаров, В.Я. Мицык НОВОЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОТДЕЛОЧНО- ЗАЧИСТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ | 181 |
| А.В. Кацеский, М.Ю. Силаев, Е.Ю. Ремшев, А.В. Титов, С.Г. Ясько ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ | 186 |
| И.В. Волков АНАЛИТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОПЕРАЦИЯХ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ОБЩЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ | 191 |
| О.І. Сороковий, С.Г. Ясько, Д.М. Здихальський ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ARTCAM PRO ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ГЕРБА ПОЛТНТУ | 198 |
| АЛФАВІТНИЙ ВКАЗІВНИК..... | 203 |

Збірник наукових праць
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка
Серія: ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ, БУДІВНИЦТВО
Випуск 2 (37)

| | |
|--|--------------------|
| Комп'ютерна верстка | <i>О.В. Бондар</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 08.10.2013
Формат 60×84 ¹/₈. Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. – 17,17. Тираж 300 прим. Ціна за домовленістю.

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.