

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр
«МашиноСтроение»**



Севастопольский государственный университет

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Белорусский государственный экономический университет

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

ISSN 2658-6185

МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ. НАУКА И ПРАКТИКА

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№8

Санкт-Петербург, 2025

УДК 531 : 621.01
ББК 34.4
М55

М55 **Механика и машиностроение. Наука и практика:**
Материалы международной научно-практической конференции.
– Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2025. – №8. – 85 с. – DOI:
10.26160/2658-6185-2025-8.

Представлены материалы VIII международной научно-практической конференции «Механика и машиностроение. Наука и практика» (27 ноября 2025г.). Направления работы конференции: 1) Проблемы высшей школы в области машиностроения; 2) Механика деформируемого твердого тела; 3) Теория механизмов и машин; 4) Динамика и прочность машин; 5) Мехатроника и робототехника; 6) Технология машиностроения; 7) Машины, агрегаты и процессы; 8) Аддитивные технологии и производство; 9) Экономика и организация машиностроительного производства; 10) Инновационные проекты в машиностроении.

Материалы могут быть полезными для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов и студентов, занятых исследованием машин и механизмов различного технологического назначения.

Учредитель: *Жукова Елена Валерьевна.*

Ответственный редактор:

Жуков Иван Алексеевич – заведующий кафедрой машиностроения Горного университета; директор НИЦ «МашиноСтроение» (г. Санкт-Петербург), д.т.н., доцент.

Редакционная коллегия:

Бохонский Александр Иванович – профессор кафедры «Цифровое проектирование», СевГУ (г. Севастополь), д.т.н., профессор;

Евграфов Александр Николаевич – заведующий кафедрой теории механизмов и машин СПбПУ (г. Санкт-Петербург), к.т.н., доцент;

Кравчук Александр Степанович – профессор кафедры экономической информатики БГЭУ (г. Минск), д.ф.-м.н., доцент;

Либерзон Марк Романович – профессор кафедры 902 «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин» МАИ (г. Москва), д.ф.-м.н., профессор;

Максаров Вячеслав Викторович – декан механико-машиностроительного факультета Горного университета (г. Санкт-Петербург), д.т.н., профессор.

ISSN 2658-6185

© Авторы, 2025
© НИЦ МС, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Механика деформируемого твердого тела

Ишутин А.Г., Веригин А.Н. Механохимический активатор вихревого типа.....	5
Сидельников С.Б., Парубок А.В., Голосов Д.Р. Построение реологической модели магния для компьютерного моделирования процессов горячей обработки металлов давлением	8
Колошенко Ю.Б. Исследование влияния предварительного нагрева и высокого внутрiformенного газового давления на напряженно-деформированное состояние литейной металлической формы сферической конфигурации	12

Теория механизмов и машин

Абдраимов Э.С., Аракеев М.У., Wei Qin Guan, Fu Gui Chen. Типы шарнирных механизмов с мгновенной статической неопределимостью и их структурные свойства	17
---	----

Мехатроника и робототехника

Лицин К.В., Коротаев А.К., Сосновских Д.М. Разработка робототехнического комплекса с адаптивным алгоритмом работы станков в тяжёлых промышленных условиях.....	24
---	----

Технология машиностроения

Сергеева В.М. Сравнительный анализ систем охлаждения в металлообработке: эффективность и области применения	27
Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б. Исследование качества слитков титанового сплава Ti-6Al-4V, выплавленных с использованием отходов	31
Теряев Н.С., Левко В.А. Основные проблемы обработки абразивным потоком закрытых каналов литых заготовок и пути их решения.....	34
Ворошилова М.В., Сидельников С.Б., Бер В.И., Ворошилов Д.С. Современное техническое решение для изготовления обечаек из алюминиевого сплава 1580	37
Жулдыбин А.А., Владимиров А.А., Шаповалов А.И. Оценка сплошности электроискровых покрытий сформированных в аргоновой межэлектродной среде.....	40

Тищенко И.В., Харченко А.О. Анализ частоты использования терминов, обозначающих инструмент, в статьях и материалах конференций по теме внутренней резьбообработки метчиками методом пластической деформации	44
Кудинов Е.А., Владимиров А.А., Скляр В.А., Шаповалов А.И. Определение эффективных режимов выглаживания электроискровых покрытий	48
Новоточинов А.П., Кудинов Е.А., Владимиров А.А. Определение режимов резания при фрезеровании наплавленных поверхностей.....	51
Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Бундин М.В., Парубок А.В., Лопатин В.В. Моделирование процесса совмещенной термомодеформационной обработки для изготовления прутков из вторичных отходов алюминиевого сплава 6063	55
Синюков М.С. Численное моделирование тепловой эффективности оребренных труб после магнитно-абразивной обработки	58
Сорокопуд Н.И., Филипенко И.А., Овсянников Д.А. Технологический инструмент магнитно-абразивной обработки плоских изделий из алюминиевого сплава.....	61
Ефимова М.В. Влияние магнитно-абразивного полирования на качество обрабатываемых поверхностей из алюминиевых сплавов	66

Машины, агрегаты и процессы

Ефимов Д.А. Исследование абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов	69
---	----

Инновационные проекты в машиностроении

Муравьев Д.В. Роботизированная установка для закалки тонкостенных деталей на оправке	74
Войку И.П. Рыночные перспективы инновационного комплекса оборудования для формирования градиентных покрытий	81

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ АКТИВАТОР ВИХРЕВОГО ТИПА

Ишутин А.Г., Веригин А.Н.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург*

Ключевые слова: дефектность твердого тела, механохимия, механическая активация, дисперсный материал, вихревой активатор, реакционная способность.

Аннотация. Описаны механизмы пластического течения при нагрузке на частицы твердого дисперсного материала. Рассмотрено влияние дефектности твердого тела на реакционную способность. Специфика механохимических реакций состоит в создании избыточной концентрации дефектов. Предложен эффективный аппарат для механической активации и измельчения дисперсных материалов в вихревом потоке. Механохимический активатор вихревого типа является эффективным химическим реактором.

VORTEX-TYPE MECHANOCHEMICAL ACTIVATOR

Ishutin A.G., Verigin A.N.

Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg

Keywords: solid defectiveness, mechanochemistry, mechanical activation, dispersed material, vortex activator, reactivity.

Abstract. The mechanisms of plastic flow under load on particles of solid dispersed material are described. The influence of defectiveness of a solid body on reactivity is considered. The specificity of mechanochemical reactions consists in creation of an excessive concentration of defects. An effective device for mechanical activation and grinding of dispersed materials in a vortex flow is proposed. The vortex-type mechanochemical activator is an effective chemical reactor.

Интенсивное механическое воздействие на твердое вещество характеризуется целым спектром явлений, сопровождающих разрушение и деформацию твердых частиц.

Если релаксационные процессы в твердом теле протекают достаточно медленно, то создаются предпосылки для изменения реакционной способности твердых веществ за счет изменения их исходного состояния на момент вступления в реакцию. Если в результате механической обработки скорость последующих химических процессов возрастает, то говорят о механической активации вещества. Механическая активация не является универсальным явлением: одна и та же механическая обработка вещества может ускорять одни химические процессы и быть безразличной или замедлять другие.

Хрупкому разрушению предшествует деформация частиц твердого вещества, при этом доля пластической деформации зависит от тех же параметров: предельной нагрузки и скорости нагружения. Если упругая деформация не приводит к разрушению и образованию новой поверхности, то она полностью обратима.

Пластическое течение определяется обычно как изменение формы поликристаллического твердого тела под воздействием приложенной к нему нагрузки. Считают пластическое течение достаточно медленным процессом.

Однако, во-первых, скорость деформации зависит от нагрузки, а в механохимических аппаратах они могут достигать существенно больших значений, чем в опытах по статическому нагружению. Во-вторых, при очень малых размерах частиц масштаб пластической деформации может оказаться сравним с размерами самих частиц.

Для механохимии наибольшее значение имеют два механизма пластического течения: дислокационный и диффузионный.

При дислокационном механизме пластической деформации важнейшим условием является наличие систем скольжения. Если таковые имеются, то скорости движения дислокаций могут достигать значительных величин уже при умеренных нагрузках. Например, в CaCO_3 уже при нагрузке $70\text{--}80\text{ г/мм}^2$ скорость скольжения дислокаций достигает 10^2 см/с [1]. При размере частицы 1 мкм дислокация пройдет путь от края до края за 10^{-6} с , что сравнимо со временем существования нагрузки на частице.

Если к какому-либо участку твердого тела приложена неоднородная сила, то возникающий при этом градиент упругих напряжений создает дополнительную подвижность вакансий. При этом вакансии стремятся в область сжатия. Именно такого рода неоднородные напряжения, в том числе внутренние, сохраняющиеся длительное время, имеют место при обработке в механохимических аппаратах.

Существует значительное отличие процессов деформации, протекающих в механических активаторах. В активаторах каждая частица твердого вещества многократно подвергается нагрузке и разгрузке. При этом время между такими циклами может быть столь малым, что частица не успеет релаксировать к своему начальному или равновесному состоянию. Это приведет к тому, что в каждом новом цикле упругие характеристики частицы будут иными и, следовательно, ее реакция на нагрузку будет постоянно меняться.

Общая дефектность твердого тела вносит решающий вклад в их реакционную способность. Специфика механохимических реакций состоит как раз в создании избыточной концентрации дефектов. Пластическая деформация, обусловленная скольжением дислокаций, приводит к генерации точечных дефектов. А вот диффузионная ползучесть ускоряет диффузию этих дефектов, причем, создает направленные потоки, определяемые конфигурацией поля напряжений. Это мощный фактор ускорения химических реакций.

В процессе механической обработки твердые вещества подвергаются воздействиям, которые в состоянии разрушить структуру исходного вещества. В результате появляются девиации параметра решетки, может возникнуть рентгеноаморфное состояние [2]. В результате их релаксации могут возникать различные явления разупорядочения – разная избыточная дефектность. Химические следствия многообразны: от общего повышения реакционной способности до возникновения новых химических свойств.

Рассмотренные выше факторы вместе с активным измельчением реагентов в активаторе создают основу для интенсификации уже известных процессов и для осуществления таких, которые обычными способами не всегда удается осуществить.

Вихревой активатор [3], представленный на рисунке 1, реализует принцип обработки в роторных вертикальных центробежно-вихревых камерах с механическим завихрителем. Он позволяет активировать и измельчать кристаллические дисперсные материалы с исходным размером частиц до 1 мм.

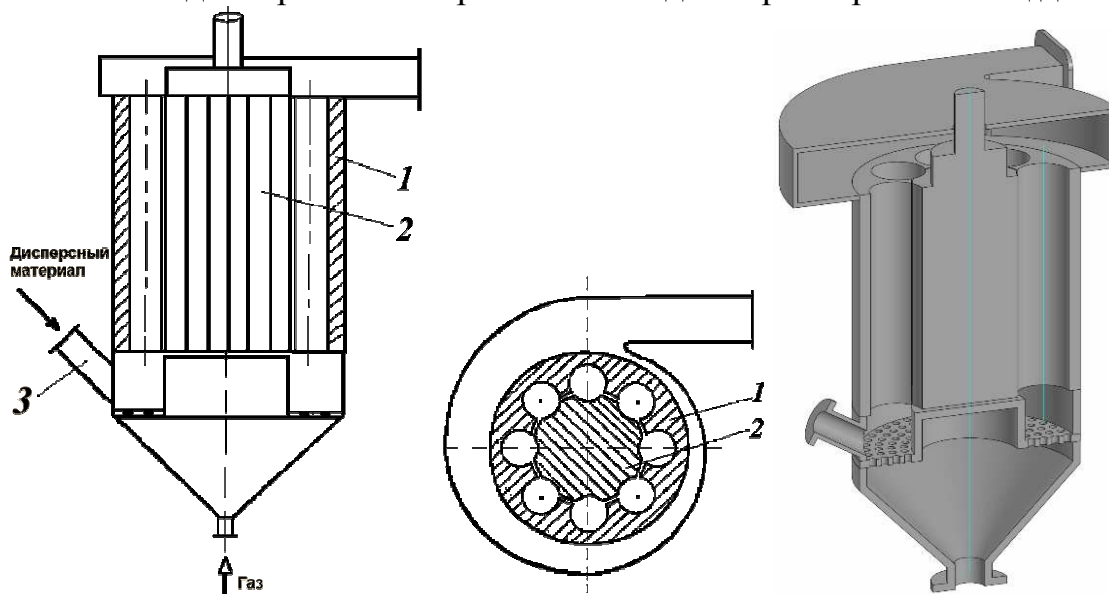


Рис. 1. Вихревой активатор: 1 – статор, 2 – ротор, 3 – патрубок загрузки

Профилированный ротор 2 инициирует в пазах статора 1 быстро вращающиеся вихри, где и происходит механическая активация дисперсного материала.

Механохимический активатор вихревого типа можно рассматривать как химический реактор, хотя и со специфичным способом осуществления химической реакции за счет подводимой извне механической энергии.

Список литературы

1. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Строительные материалы, 1972. – 309 с.
2. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 254 с.
3. А.с. №1618440 СССР. Роторно-вихревая мельница / В.И. Кочерга, А.Н. Веригин, А.Г. Ишутин, И.А. Шупляк, В.Ф. Гридковец, Л.В. Гришечкин, В.Г. Джангириян. – Заявка №4643964 от 30.01.1989; опубл. 07.01.1991.

Сведения об авторах:

Ишутин Алексей Георгиевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры мехатронных технологических комплексов

Веригин Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой мехатронных технологических комплексов

ПОСТРОЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАГНИЯ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

*Сидельников С.Б., Парубок А.В., Голосов Д.Р.
Сибирский федеральный университет, Красноярск*

Ключевые слова: магний, QForm, реологическая модель Хензеля–Шпиттеля; модель сопротивления деформации, моделирование обработки металлов давлением, Gleeble.

Аннотация. В данной работе представлен процесс создания реологической модели магния для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением. С помощью испытаний на одноосное сжатие на установке Gleeble 3500 получены зависимости сопротивления деформации от температуры и скорости деформации. По эмпирической модели Хензеля – Шпиттеля рассчитаны коэффициенты, определяющие зависимость напряжения течения от термомеханических параметров. Полученная реологическая модель обеспечивает высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

DEVELOPMENT OF A RHEOLOGICAL MODEL OF MAGNESIUM FOR COMPUTER SIMULATION OF HOT METAL FORMING PROCESSES

*Sidelnikov S.B., Parubok A.V., Golosov D.R.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

Keywords: magnesium, QForm, Hensel–Spittel rheological model, flow stress model, modeling of metalworking by pressure, Gleeble.

Abstract. This paper describes the development of a rheological model of magnesium for the computer simulation of metal forming processes. The flow stress dependence on temperature and strain rate was determined by uniaxial compression tests on a Gleeble 3500 system. The coefficients defining the relationship between flow stress and thermomechanical parameters were calculated using the Hensel-Spittel empirical model. The developed rheological model demonstrates a high correlation between the calculated and experimental data.

Магний является очень перспективным материалом благодаря своей низкой плотности, высокой удельной прочности и биосовместимости с человеческим организмом [1]. В последние годы значительное внимание уделялось различным вариантам применения магниевой проволоки, например, в качестве шовного материала, материала для стентов и конструкций для фиксации переломов [2].

Развитие инновационных методов обработки давлением чистого магния позволило получать изделия с высокими механическими характеристиками, что является важным критерием для медицинских материалов. Традиционными методами производства проволоки является волочение и прессование. Недостатком волочения является большое количество проходов и промежуточных отжигов, а также сильная базисная текстура, что делает процессы прессования более предпочтительными [3]. Кроме того, развиваются методы совмещенных процессов обработки металлов давлением, которые позволяют значительно повысить эффективность производства проволоки [4].

Применение инновационных методов обработки металлов давлением, в том числе и совмещенных процессов, требует всесторонних исследований. Для сокращений трудозатрат на реализацию прямых экспериментов часто применяют программы компьютерного моделирования, которые позволяют достаточно точно устанавливать различные зависимости процессов обработки металлов давлением, а также помогают в поиске наилучших технологических параметров и подборе необходимого оборудования. Так как точность модели зависит от качества реологической модели деформируемого материала, актуальной задачей является построение качественной реологической модели магния в широком температурном и скоростном диапазонах для моделирования различных процессов обработки металлов давлением. Для построения реологических моделей наиболее распространенным является проведение опытов на сжатие при различных температурах и скоростях деформации, и последующая обработка результатов для создания математической модели напряжения текучести [5].

Для получения качественной реологической модели магния проводили испытания на сжатие на установке «GLEEBLE® 3500» на базе НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Цилиндрические образцы из магния марки Мг90 деформировали по схеме одноосного сжатия до достижения истиной деформации равной 0,8 в диапазоне температур 200-400°C при скоростях деформации от 10 с⁻¹ до 50 с⁻¹. Испытания при высоких скоростях деформации обусловлено тем, что совмещенные и инновационные методы обработки металлов давлением реализуют интенсивную пластическую деформацию, в ходе которой высокие степени деформации достигаются за один или несколько проходов. Сжатие образцов проводилось в условиях, близких к изотермическим. Для снижения коэффициента трения между образцами и твердосплавными круглыми бойками использовалась никелевая паста и молибденовая фольга, размещенные между образцом и наковальней с обеих сторон.

В качестве математической модели была выбрана формула Хензеля – Шпиттеля (формула) с девятью неизвестными коэффициентами. Эта формула часто используется для описания деформационного поведения металлов и основана на теории упрочнения–разупрочнения.

$$\sigma = A e^{m_1 T} T^{m_2} \epsilon^{m_3} e^{\frac{m_4}{\epsilon}} (1 + \epsilon)^{m_5 T} e^{m_7 \epsilon} \dot{\epsilon}^{m_3} \dot{\epsilon}^{m_8 T},$$

где σ – напряжение течения; T – температура, °C; ϵ – степень деформации; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹; A , m_1 - m_5 и m_7 - m_9 – эмпирические коэффициенты.

Данные, полученные в ходе испытаний на сжатие, были сформированы в массив и загружены в специально созданную программу на языке Python, реализующую поиск оптимальных коэффициентов. В качестве первого приближения использовалось несколько наборов коэффициентов в физически осмысленном диапазоне. Затем проводилась оптимизация с помощью алгоритма Trust-Region-Reflective. Целью оптимизации является минимизация суммы квадратов невязок, где невязки были определены как разница между прогнозируемым сопротивлением деформации ($\sigma_{\text{пред}}$) и экспериментальным сопротивлением деформации ($\sigma_{\text{эксп}}$). Оптимизация проводилась до достижения

коэффициента детерминации R^2 выше 0,9. Затем из всех рассчитанных вариантов первого приближения выбирался вариант с наименьшей средней относительной ошибкой. Коэффициенты, полученные в процессе оптимизации, представленные в таблице 1.

Табл. 1. Значения коэффициентов в формуле Хензеля – Шпиттеля для магния марки Мг90

A	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
117,336	-0,0047	0,2245	0,039	-0,0006	-9,6332	-0,6774	-3,3226	0,2508

Кривые, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле, представлены на рисунке 1.

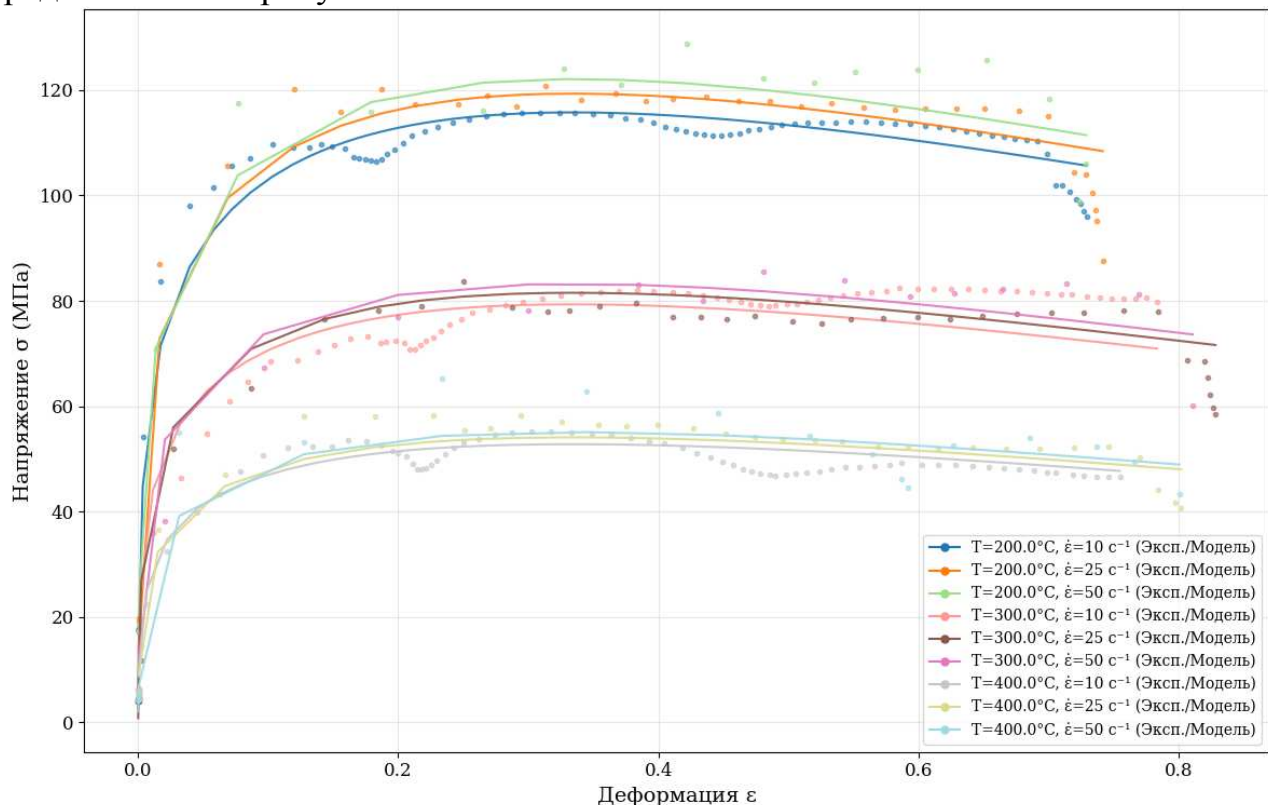


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и рассчитанных по формуле напряжений текучести при сжатии образцов со скоростями деформации 10, 25 и 50 с⁻¹ при 200, 300 и 400 °C

Средняя относительная ошибка составила 10%, при чем ошибка у более 55% данных не превышает 5%, что является высоким показателем. Значения коэффициента детерминации равно 0,979, что указывает на высокую сходимость, свидетельствуют о высокой сходимости результатов и возможности применения полученной реологической модели.

Для проверки адекватности модели проводили моделирование осадки цилиндрических образцов в программном комплексе QForm. Кривые напряжения – текучести заданы с помощью формулы Хензеля – Шпиттеля с 9 неизвестными коэффициентами, физические свойства заданы на основе справочных данных. В качестве критерия оценки качества была выбрана относительная ошибка значений силы прессования при эксперименте и моделировании. Анализ

результатов моделирования показал высокую сходимость экспериментальных и расчетных данных, а относительная ошибка не превышала 10%.

Таким образом, с помощью экспериментальных исследований и последующей обработки их с помощью методов оптимизации нелинейных зависимостей была получена качественная реологическая модель магния, позволяющая моделировать процессы обработки металлов давлением, реализующие интенсивную пластическую деформацию в диапазоне температур от 200 до 400°C, что является важным этапом на пути разработки и совершенствования термомодеформационной обработки магния.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

Список литературы

1. Azadi A., Ebel T., Wolff M., O’Cearbhaill E., Celikin M. Additive Manufacturing of Magnesium Alloys for Biomedical Applications: Critical Review on Sinterability and Alloy Development // Journal of Materials Research and Technology. 2025, vol. 35, p. 6986-7007. doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.018.
2. Tesař K., Luňáčková J., Jex M., Žaloudková M., Vrbová R., Bartoš M., Klein P., Vištejnová L., Dušková J., Filová E., Sucharda Z., Steinerová M., Habr S., Balík K. et Singh A. In vivo and in vitro study of resorbable magnesium wires for medical implants: Mg purity, surface quality, Zn alloying and polymer coating // Journal of Magnesium and Alloys. 2024, vol. 12(6), pp. 2472-2488. doi.org/10.1016/j.jma.2024.06.003.
3. Nienaber M., Yi S., Kainer K.U., Letzig D., Bohlen J. On the Direct Extrusion of Magnesium Wires from Mg-Al-Zn Series Alloys // Metals. 2020, vol. 10(9), p. 1208. doi.org/10.3390/met10091208.
4. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Parubok A.V., Voroshilov D.S., Konstantinov I.L., Mansurov Y.N., Galiev R.I., Ber V.I., Voroshilova M.V., Belokonova I.N., Lopatin V.A. Determination and structural analysis of process parameters for combined rolling and extrusion of rods from magnesium ingots // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 134(5), pp. 2623-2636. doi.org/10.1007/s00170-024-14294-0.
5. Павел П.А., Нгок Ф.В., Бурлаков И.А., Матвеев А.Г., Сапрыкин Б.Ю., Петров М.А. Построение кривых текучести алюминиевого сплава АМг5 на основе натурного и вычислительного экспериментов // Технология легких сплавов. – 2022. – №2. – С. 65-74. – doi.org/10.24412/0321-4664-2022-2-65-74.

Сведения об авторах:

Сидельников Сергей Борисович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Обработка металлов давлением» института цветных металлов;

Парубок Андрей Васильевич – аспирант;

Голосов Данила Романович – студент.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА И ВЫСОКОГО ВНУТРИФОРМЕННОГО ГАЗОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТЕЙНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СФЕРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Колошенко Ю.Б.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре

Ключевые слова: литейная форма, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, напряжение, перемещение, сферическая отливка.

Аннотация. В работе моделируется процесс затвердевания и охлаждения стальной отливки сферической формы под влиянием предварительного нагрева и высокого внутриформенного газового давления. Подтверждается эффективность использования новых конструкций литейных форм, выдерживающих высокое газовое давление. Результатом численного моделирования служат эпюры нормальных напряжений, перемещений и температур по сечениям сферической формы.

RESEARCH ON THE EFFECT OF PREHEATING AND HIGH INTERNAL GAS PRESSURE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A SPHERICAL METAL CASTING MOLD

Koloshenko Yu.B.

Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur

Keywords: casting mold, stress-strain state, numerical modeling, stress, displacement, spherical casting.

Abstract. The paper simulates the process of solidification and cooling of a spherical steel casting under the influence of preheating and high internal gas pressure. The paper confirms the effectiveness of using new casting molds that can withstand high gas pressure. The results of numerical modeling include diagrams of normal stresses, displacements, and temperatures along the cross-sections of the spherical casting.

Величина создаваемого внутриформенного высокого газового давления зависит, главным образом, от стойкости литейных оболочечных форм, моделирование которых проведено в работе [1]. Влияние всестороннего газового давления на затвердевание и свойства стальных отливок представлено в экспериментальной работе [2].

На рисунке 1, а изображена схема ЛФ [3], представляющая собой металлическую разборную конструкцию сферической конфигурации, установленную в сферическую разборную матрицу 2, нагретую до определенной температуры. После установки ЛФ матрицу охлаждают до комнатной температуры.

В результате охлаждения матрицы в ЛФ 1 реализуется напряженное состояние всестороннего сжатия. Затем в ЛФ 1 заливается жидкий металл, герметизируют ЛФ и впрыскивают в нее (дозированно) воспламеняющую жидкость, которая, сгорая, создает в ЛФ внутриформенное газовое давление. Под этим давлением и происходит кристаллизация жидкого металла до требуемого значения толщины сферической формы.

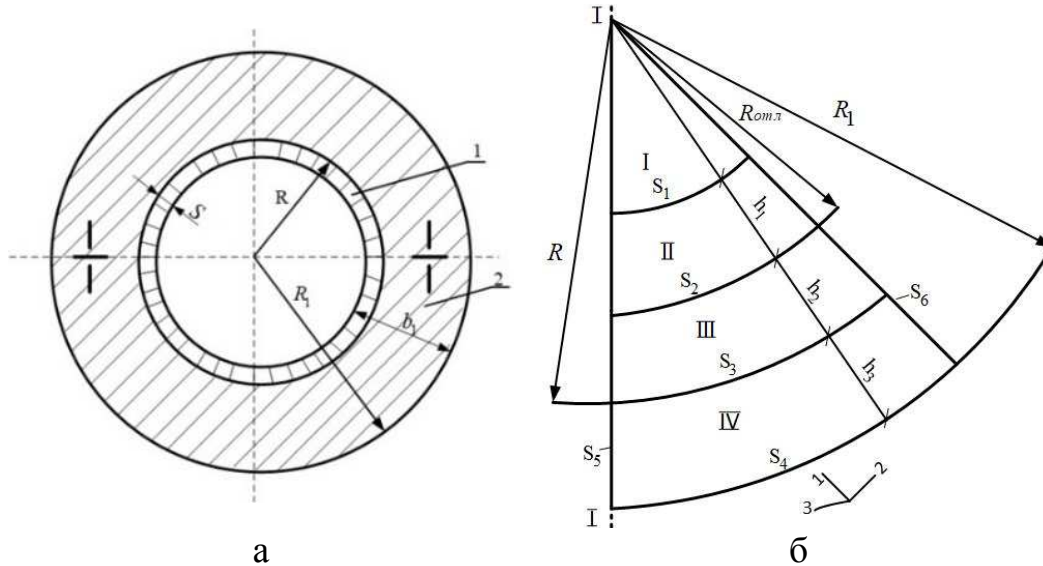


Рис. 1. Схема металлической разборной конструкции устройства (а): 1 – затвердевшая корочка отливки; 2 – литейная форма; расчетная схема (часть шарового сегмента) конструкции (б): $R_1 = R + h_3$; $R_{отл} = R - h_2$; $S = h_1$; $b_1 = h_2 + h_3$

В результате заливки жидкого металла в сборную металлическую конструкцию сферической формы будем иметь: I – область жидкого металла; II – область закристаллизовавшегося металла (корочка); III – область ЛФ; IV – область матрицы.

Для рассматриваемых областей, запишем в декартовой системе координат систему уравнений линейной теории упругости:

Область I:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = -P; \dot{\theta} = \bar{a}_1 \Delta \theta. \quad (1)$$

Область II, III, IV

$$\sigma_{ij,j} = 0; \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G_p \epsilon_{ij}^*; \epsilon_{ij}^* = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \epsilon \delta_{ij}; \epsilon = \epsilon_{ii}; \quad (2)$$

$$\epsilon_{ii} = 3k_p \sigma + 3\alpha_p (\theta_n - \theta_p^*); \epsilon_{ij} = 0,5 (U_{i,j} + U_{j,i}); \dot{\theta} = \bar{a}_p \Delta \theta.$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, U_i – перемещения; ϵ_{ij} – компоненты тензора упругих деформаций; σ – гидростатическое напряжение; $G_p(\theta)$ – модуль сдвига оболочки (p); $p = \text{II, III, IV}$; δ_{ij} – символ Кронекера; k_p – коэффициент объемного сжатия в области (p), α_p – коэффициент линейного расширения в области (p); γ – удельный вес разливаемого металла; $\bar{a}_p$ – коэффициент

температуропроводности в области (p); $a_p = \frac{\lambda}{c\gamma}$; c – удельная теплоемкость; λ –

коэффициент теплопроводности; θ_n – текущая температура; θ_p^* – начальная температура в области (p). В системе (2) используется суммирование по повторяющимся индексам.

Для решения уравнений теории упругости в системе (2), использовался численный метод [4], суть которого заключается в разбиении исследуемой области семействами ортогональных поверхностей на элементы, для каждого из которых записывается в разностном виде сформулированная система уравнений через

значения напряжений и перемещений по граням элемента. Решение полученной алгебраической системы уравнений осуществляется с учетом граничных условий и с использованием алгоритмов и программных комплексов [5, 6].

В результате численного моделирования были получены эпюры нормальных напряжений, перемещений и температур по сечениям сферической формы в разные временные интервалы.

По мере охлаждения (рис. 2-6) довольно значительно изменяются значения σ_{22} в ЛФ (область III). Без предварительного сжатия напряжения в ЛФ за счет резких температурных перепадов, вызывающих сжимающие напряжения в контактных слоях ЛФ, изменят знак σ_{22} , переходя от растягивающих (рис. 2) в сжимающие (рис. 3-6).

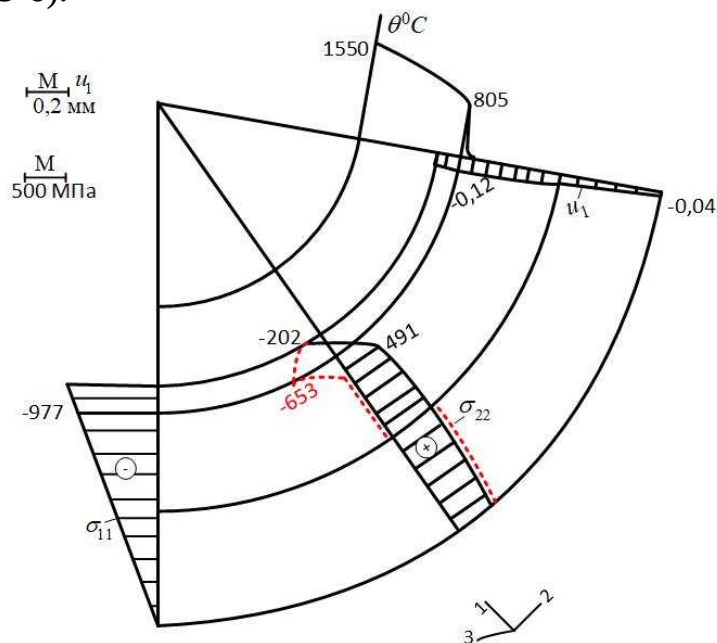


Рис. 2. Эпюра нормальных напряжений σ_{11} , σ_{22} , перемещений u_1 и температуры θ при $P=1000\text{МПа}$; $\theta = 20^\circ\text{C}$ (сплошная линия); $\theta = 200^\circ\text{C}$ (пунктирная линия); $S = 0,17\text{ мм}$; $\tau = 0,06\text{ с}$

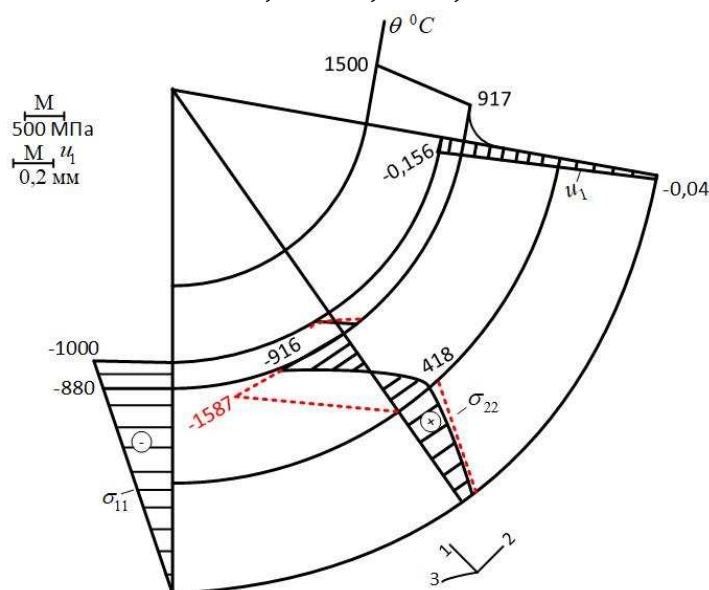


Рис. 3. Эпюра нормальных напряжений σ_{11} , σ_{22} , перемещений u_1 и температуры θ при $P=1000\text{МПа}$; $\theta = 20^\circ\text{C}$ (сплошная линия); $\theta = 200^\circ\text{C}$ (пунктирная линия); $S = 1,34\text{ мм}$; $\tau = 0,45\text{ с}$

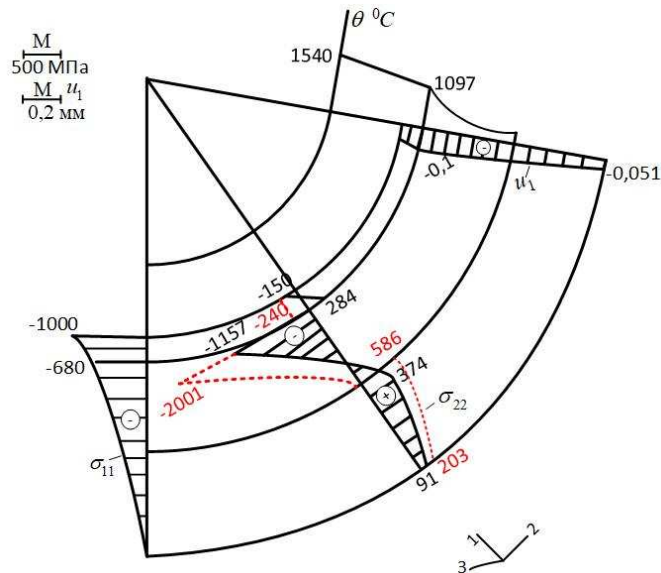


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений σ_{11} , σ_{22} , перемещений u_1 и температуры θ при $P=1000\text{ МПа}$; $\theta=20^\circ\text{C}$ (сплошная линия); $\theta=200^\circ\text{C}$ (пунктирная линия); $S=2,86\text{ мм}$; $\tau=1,65\text{ с}$

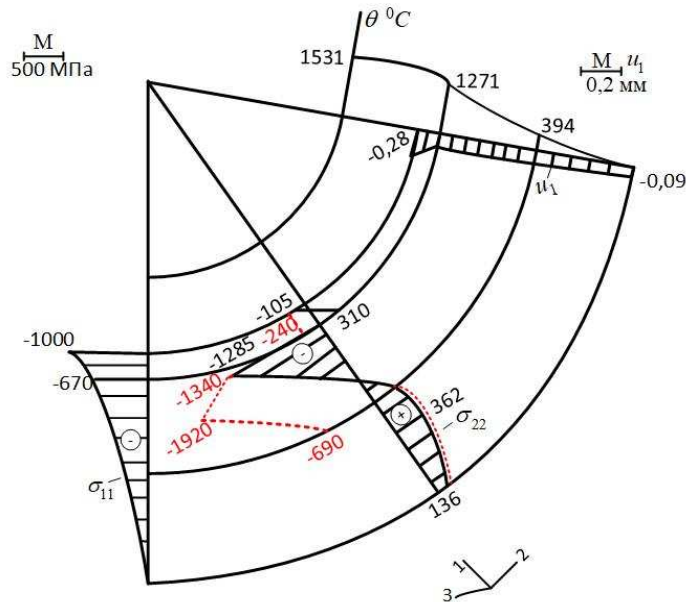


Рис. 5. Эпюры нормальных напряжений σ_{11} , σ_{22} , перемещений u_1 и температуры θ при $P=1000\text{ МПа}$; $\theta=20^\circ\text{C}$ (сплошная линия); $\theta=200^\circ\text{C}$ (пунктирная линия); $S=5,3\text{ мм}$; $\tau=7,56\text{ с}$

Приведенные результаты показывают, что при внутреннем газовом давлении $P=1000\text{ МПа}$ и предварительном напряженном состоянии ЛФ (охлаждение сжимающей матрицы от $\theta=200^\circ\text{C}$), вся область ЛФ (область II) находится в состоянии всестороннего сжатия в процессе кристаллизации жидкого металла $0 \leq \tau \leq 22,6\text{ с}$. Толщина закристаллизовавшейся корочки при этом $S=22,6\text{ мм}$. Дальнейшее охлаждение и кристаллизация металла ведет к выравниванию полей температур как в ЛФ, так и в матрице, а следовательно, и падению эффекта от предварительного сжатия ЛФ.

По полученным результатам можно полагать, что под действием газового давления (1000-2000 МПа) можно получать качественные сферические оболочки толщиной до 10 мм.

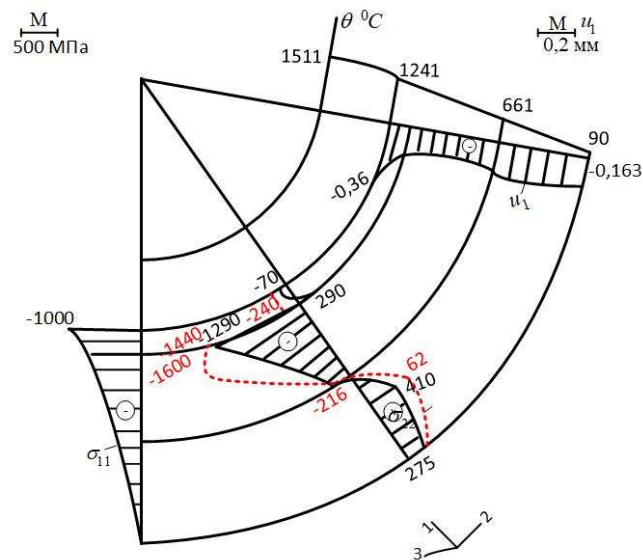


Рис. 6. Эпюра нормальных напряжений σ_{11} , σ_{22} , перемещений u_1 и температуры θ при $P=1000\text{ МПа}$; $\theta=20^\circ\text{C}$ (сплошная линия); $\theta=200^\circ\text{C}$ (пунктирная линия); $S=8,27\text{ мм}$; $\tau=22,6\text{ с}$

Результаты вычислительных расчетов по разработанной методологии моделирования позволит значительно сократить объем экспериментальных исследований по доработке и доводке технологии литья сферических отливок под высоким внутриформенным газовым давлением.

Список литературы

1. Одинок В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Колошенко Ю.Б., Евстигнеева А.А., Петров В.В. Моделирование стойкости литейных оболочечных форм, находящихся под действием внешней силовой и тепловой нагрузки // Математическое моделирование и численные методы. – 2024. – №4. – С. 31-51.
2. Лившиц В.Б., Кушнир А.П., Мамедова И.Ю., Зябнева О.А. Влияние всестороннего газового давления на затвердевание и свойства стальных отливок // Литейное производство. – 2021. – №5. – С. 21-23.
3. Патент №2841324 РФ. Способ подготовки литейной металлической формы к заливке металлом / А.И. Евстигнеев, В.И. Одинок, Э.А. Дмитриев, Ю.Б. Колошенко, Д.А. Потянихин. – Заявка №2024134045 от 12.11.2024; опубл. 06.06.2025, Бюл. №16.
4. Одинок В.И., Каплунов Б.Г., Песков А.В., Баков А.В. Математическое моделирование сложных технологических процессов. – М.: Наука, 2008. – 178 с.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012111389 РФ. Одиссей / В.И. Одинок, А.Н. Прокудин, А.М. Сергеева, Г.М. Севастьянов. – Зарег. 13.12.2012.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021616121 РФ. Программа математического моделирования оптимизации выбора температуры опорного наполнителя, физических свойств материала и структуры оболочковой формы по выплавляемым моделям для повышения ее трещиностойкости при охлаждении в ней отливки / В.И. Одинок, Э.А. Дмитриев, А.И. Евстигнеев, Е.П. Иванкова – Зарег. 16.04.2021.

Сведения об авторах:

Колошенко Юлия Борисовна – старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и механика».

ТИПЫ ШАРНИРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С МГНОВЕННОЙ СТАТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛИМОСТЬЮ И ИХ СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА

Абдраимов Э.С.¹, Аракеев М.У.², Wei Qin Guan², Fu Gui Chen³

¹*Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики*

Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек;

²*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек;*

³*Профессионально-технический колледж Лайу, Лайу, КНР*

Ключевые слова: четырёхзвенная шарнирно-рычажная схема, кинематическая цепь, особое положение звеньев, неопределённость движения, «мёртвое» положение, развязка мгновенная кинематическая, подвижность.

Аннотация. В работе рассматриваются плоские шарнирно четырёхзвенные схемы с особым (singularity) положением звеньев, в котором все или часть звеньев выстраиваются в линию (соосно). Особое положение, создаёт мгновенную кинематическую развязку (неопределённость движения) выходному звену, создавая статически неопределимое положение для схемы. В четырёхзвенных шарнирных схемах, в момент, когда все звенья выстраиваются в линию, обеспечивается условие для подмены структур (одной структуры на другую), при минимальном воздействии технологической нагрузки на элементы конструкции участвующих в подмене (минимальных энергозатратах). Помимо этого, формируется условие для создания рычажного ударного механизма. Предлагается разделять шарнирные механизмы на семейства из условия подвижности. Схемы у которых все звенья выстраиваются в линию выделены в общее семейство – с развязкой мгновенной кинематической с дополнительной подвижностью (R_{mk}^{+W}) или механизмы Абдраимова Самудинова. В этих механизмах в положении звеньев с R_{mk}^{+W} степень подвижности увеличивается на один. «Мёртвого» положения в таких механизмах (с R_{mk}^{+W}) не возникает. Механизмы с «мёртвым» положением, возникающее когда два звена, включая ведомое звено, оказываются в соосном положении, а направление усилия развиваемого ведущим звеном вдоль этого положения, выделены в отдельное семейство – с развязкой мгновенной кинематической с уменьшением подвижности, или R_{mk}^{-W} . В этих механизмах, в положении звеньев с R_{mk}^{-W} подвижность уменьшается на один. Например, в кривошипно-шатунной схеме двигателя внутреннего сгорания в двух крайних точках подвижность (W) равна 0. Их принято называть: верхней и нижней «мёртвой» точкой. Предлагается более не использовать термин: «особое» положение звеньев, как не отражающее свойства присущих механизмам с мгновенной кинематической развязкой.

TYPES OF HINGE MECHANISMS WITH INSTANTANEOUS STATIC INDETERMINACY AND THEIR STRUCTURAL PROPERTIES

Abdraimov E.S.¹, Arakeev M.U.², Wei Qin Guan², Fu Gui Chen³

¹*Institute of Mechanical Engineering, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek;*

²*Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek;*

³*Laiwu Vocational and Technical College, China*

Keywords: four-link articulated linkage, kinematic chain, special position of links, uncertainty of motion, “dead” position, instantaneous kinematic junction, mobility.

Abstract. This paper examines flat, four-link articulated link systems with a singularity position, in which all or some of the links are aligned (coaxial). This singularity creates instantaneous kinematic decoupling (motion uncertainty) for the output link, creating a statically indeterminate state for the system. In four-link articulated systems, at the moment when all the links are aligned, a condition is provided for the replacement of structures (one structure for another), with minimal impact of the technological load on the structural elements involved in the replacement (minimal energy consumption). In addition, a condition for creating a lever-type impact mechanism is established. It is proposed to divide articulated mechanisms into families based on the condition of mobility. Schemes in which all links are aligned are classified into a common family—with instantaneous kinematic decoupling with additional flexibility ($Pmk+W$) or Abdraimov-Samudin mechanisms. In these mechanisms, the degree of flexibility increases by one when the links are aligned with $Pmk+W$. A "dead" position does not occur in such mechanisms (with $Rmk+W$). Mechanisms with a "dead" position, which occurs when two links, including the driven link, are in a coaxial position, and the direction of the force developed by the driving link is along this position, are classified into a separate family—with instantaneous kinematic decoupling with decreasing mobility, or $Pmk-W$. In these mechanisms, the mobility of the links decreases by one in the $Pmk-W$ position. For example, in the crank-connecting rod diagram of an internal combustion engine, the mobility (W) is equal to 0 at the two extreme points. These are commonly referred to as the upper and lower dead centers. It is proposed to no longer use the term "special" link positions, as they do not reflect the properties inherent to mechanisms with instantaneous kinematic decoupling.

Синтез механизма, который позволил бы получить функциональную схему, обладающую оптимальным числом звеньев и кинематических пар, остаётся одной из актуальных задач. Возникновение терминологии стало основой для появления первых подходов синтеза механизмов. По сути, термины формируются как следствие анализа элементов составляющих механизм, понимания свойств, сопутствующих рабочему циклу механизма. Появляется представление о структуре, в последующем, подходы к структурному синтезу – первому этапу на пути создания механизмов.

К концу XX столетия в вопросе структурного синтеза достигнуты значительные успехи. Разработаны эффективные методы структурного синтеза, увязывающие число звеньев с числом и разновидностью кинематических пар, со степенью свободы кинематической цепи и степенью подвижности механизма. Не смотря на многообразие предложенных методов, все авторы, получившие широкую известность, ориентировались на кинематические цепи, состоящие из статически определимых структурных групп. Методы распространены не только для так называемых «плоских» или «пространственных» схем.

В данной работе сделана попытка выделить особенности, присущие механизмам в тех случаях, когда свойство статической определимости теряется (оказываются статически неопределимыми), на примерах плоских шарнирных кинематических цепей. Такие случаи можно разделить на два типа. Первый тип (тип I), когда шарниры звеньев оказываются соосно расположенными. Второй тип, когда оси шарниров подвижных звеньев параллельны и лежат на одной плоскости, а звенья в одну линию. Причем второй тип может быть двух подтипов: Первый подтип (тип II-I) для случая, где рассматриваются шарниры двух подвижных звеньев, и второй подтип (тип II-II) для случая, где рассматриваются более двух звеньев. Учитывая, что в схемах принято звено обозначать отрезком между шарнирами, то в случае с типом II-II у четырёхшарнирного механизма (2го класса) все звенья оказываются сложенными на одной линии.

К первому типу (тип I) можно отнести механизмы Х. Галлоуея, у которых ближайшие звенья равны. Так называемые ромбоидные механизмы. На рисунке 1 представлен случай, когда у ромбоидного механизма размеры звеньев соответствуют условию: $L1 = L2 < L3 = L4$, что позволяет отнести схему также ко второму типу второго подтипа (тип II-II). Статическая неопределимость возникает, когда звенья складываются в линию, при этом шарниры оказываются соосными.

Примером второго типа первого подтипа (тип II-I) может служить схема двигателя внутреннего сгорания, где в качестве ведущего звена – ползун (поршень), рисунок 2. Статическая неопределимость имеет место в двух крайних положения звеньев так называемых мёртвых положениях.

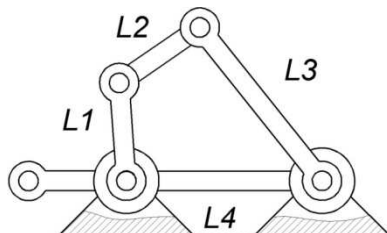


Рис. 1. Ромбоидный механизм, где $L1 = L2 < L3 = L4$

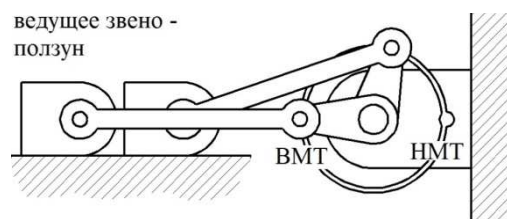


Рис. 2. Схема двигателя внутреннего сгорания

К типу II-II можно отнести четырёхзвенную шарнирно-рычажную схему параллельных кривошипов, представленную на рисунке 3. Этот рисунок использовал Решетов Л.Н в работе [1] для демонстрации особенностей схемы с «двойным мёртвым положением». Созданный на её основе механизм двойного шарнирного параллелограмма был востребованным в отдельный исторический период, когда являлся единственным механизмом, передававшим равномерное движение с вала на вал. В паровозостроении такой механизм носил название «Спарника» (рис. 4).

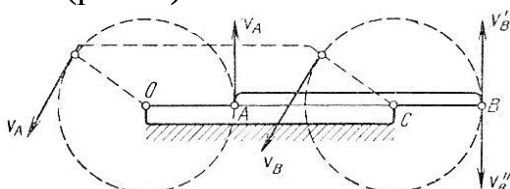


Рис. 3. Схема параллельных кривошипов

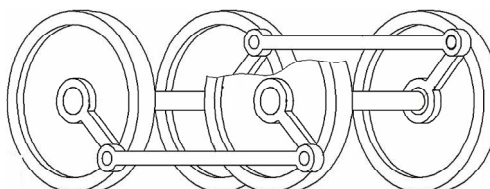


Рис. 4. Спарник колёс паровоза

Представления о свойствах, присущих таким механизмам, формировались в момент их возникновения, передаваясь из столетия в столетие. Как результат того исторического периода возник термин – механизмы с особым (singularity) положением звеньев оказавшихся на одной линии, где возникает мгновенная статическая неопределимость, препятствующая определённости движения выходного звена. Иначе говоря, механизм «вырождается» в особом положении, требуя дополнительных усилий для сохранения определённости движения выходного звена.

Новые механизмы стали возникать в последние два десятилетия XX века благодаря в том числе творческой деятельности С. Абдраимова, его соратников, учеников, сформировавших научную школу и новое направление в Теории механизмов и машин.

Первый этап деятельности школы характеризовался совместным использованием шарнирно-четырёхзвенного механизма типа II-II с диадой Абдраимова-Невенчанной [2] (рис. 5). Данная диада состоит из конверсионного звена 6, по своей природе не отличающегося от обычных звеньев и звена восстановления 5, обладающего переменной жесткостью, включая три одноподвижных кинематических пар. На рисунке 5 штрих-пунктиром обозначена линия, на которой оказываются звенья в особом положении, где 1 стойка, 2 кривошип, 3 шатун, 4 коромысло. Принцип его работы почти аналогичен принципу работы ударного механизма Алабужева П.М, рассмотренного в работе [3].

Сочетание четырёхзвенного механизма с дополнительной диадой Абдраимова-Невенчанной позволил создать новый подход синтеза шарнирных механизмов скачкообразно меняющих закон движения выходного звена без разрыва кинематической цепи и несиловом управляющем воздействии на движение (обездвижение) звеньев. Возник новый класс механизмов переменной структуры [4]. Благодаря чему были созданы различные типы прессов типа «Уста» с безмуфтовой схемой включения рабочего и холостого режимов (рис. 6). Пресса типа «Уста» продемонстрировали на практике как новизну подхода в синтезе механизма, так и преимущества технических данных нового оборудования.

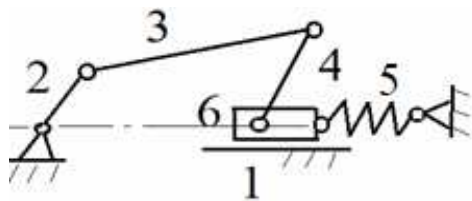


Рис. 5. Схема безмуфтового пресса «Уста»



Рис. 6. Пресс «Уста», усилием 10кН

В настоящее время развивается следующий этап работ, на котором применяется только шарнирно четырёхзвенная схема, у которого все звенья складываются в линию (типа II-II), для создания ударных машин. Накоплен определённый опыт создания и эксплуатации ударных машин различного назначения, что позволило сформировать новые представления о свойствах присущих им.

Следует напомнить известное свойство присущее этим схемам в особом положении – мгновенную статическую неопределимость, при котором выходное звено оказывается «развязанным» в кинематической цепи. Именно поэтому все разновидности рассматриваемых схем не подпадают под определение механизма, которое должно обладать определённой движением выходного звена. Чтобы обеспечить определённость движения выходного звена (L_3) необходимо дополнительное условие. Условие предполагает включение дополнительной обобщённой координаты для возникшей лишней степени свободы в сингулярном положении, что в общем то, широко известно, в частности отмечалось в работах [1, 5]. Это поясняет схема на рисунке 7.

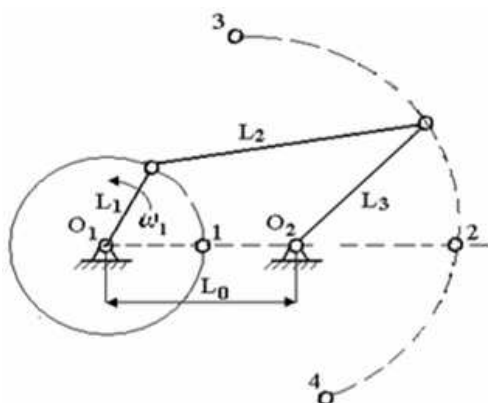


Рис. 7. Кинематическая цепь с мгновенной кинематической развязкой

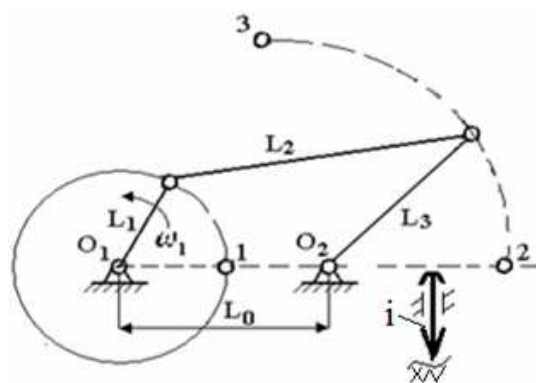


Рис. 8. Механизм ударный

На рисунке 7 представлена *кинематическая цепь* схемы с наибольшим шатуном, у которой выходное звено L_3 способно реализовать ряд возможных возвратно-качательных движений не разрывая связи с входным звеном – кривошипом L_1 . Один вариант – возвратно-качательное движение по траектории 3-2; второй вариант – по траектории 4-2; третий вариант – по траектории 3-4. Сколько вообще таких вариантов может быть – пока вопрос открытый. Понятно одно, при выстроенных звеньях на штрих-пунктирной линии O_1O_2 , в силу соотношения длин звеньев из условия: $L_0 = L_1 + L_2 - L_3$, возникает мгновенная кинематическая развязка движения звена L_3 , схема утрачивает определённость движения, *переставая быть механизмом*. Чтобы обеспечить определённость движения звена L_3 необходимо дополнительное условие. Причём, для каждого из вариантов возвратно-качательного движения могут потребоваться свои условия. В случае со схемой ударного механизма с представленным соотношением звеньев траектория качания коромысла должна быть 3-2. Её обеспечивает связь коромысла с инструментом, возникающая периодически на штрих-пунктирной линии, что показано на рисунке 8. Требуется ещё как-то классифицировать данную периодически возникающую связь в структуре механизма, но она участвует в определённости движения выходного звена и её учёт необходим.

Не смотря на разрыв функций первого, второго порядка в момент смены направления движения коромысла в точке 2 (рис. 9 [6]), кинематическая цепь ударной машины (рис. 8) не разрушается благодаря мгновенной кинематической развязке и сопутствующей ей лишней степени свободы. Именно это свойство позволяет проектировать ударные машины на базе этих схем. Примеры эксплуатации созданных ударных машин размещены в интернете по следующей ссылке: https://www.youtube.com/results?search_query=abdraimov%27s+hammer.

Следует отметить, особое положение уже не является термином достаточно поясняющим особенность схемы. Скорее термин, вводящий в заблуждения любого, кто интересуется такими кинематическими цепями. Накопленный опыт исследований позволяет формировать адекватные представления свойств присущих этим схемам. Есть полное понимание о возникновении мгновенной кинематической развязки (Рмк) с дополнительной подвижностью (+W), когда не менее четырёх звеньев (включая стойку) шарнирно-рычажной кинематической цепи выстраиваются в линию. Поэтому есть основание, все возможные

разновидности кинематических цепей, применяемых для создания четырёхзвенных механизмов (2-го класса), называть – схемами с Рмк (развязка мгновенная кинематическая) с дополнительной подвижностью (Рмк^{+W}). Более не употребляя особое (сингулярное) положение как некий технический термин, не отражающий абсолютно никаких свойств в этих схемах.

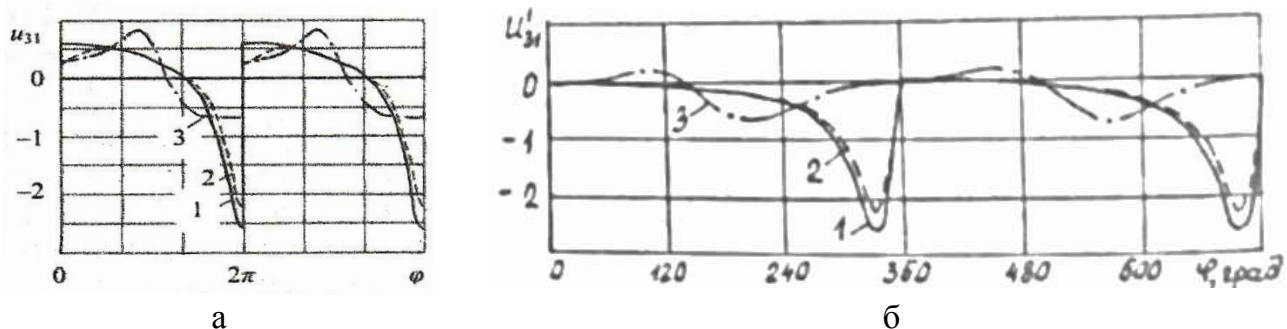


Рис. 9. Вид функций первого (а) и второго (б) порядка в момент смены направления движения коромысла для трёх разновидностей схем: 1 – с наибольшим шатуном, 2 – с наибольшим коромыслом, 3 – с наибольшим основанием

Рмк^{+W} – создаёт условия минимизирующие вредное влияние возникающих колебаний. Мгновенная кинематическая развязка с дополнительной подвижностью (Рмк^{+W}), можно сказать – при контакте с инструментом воспринимает возникшие обобщённые координаты. Приводится в соответствие число обобщённых координат со степенью подвижности кинематической цепи в конкретный момент. При этом в Рмк^{+W} формируется условие для рекуперации энергии возникающих реакций, прежде всего пиковых (ударных), в дополнительную подвижность, тем самым способствуя скачкообразному изменению закона движения выходного звена без разрыва кинематической цепи. Мгновенная кинематическая развязка с дополнительной подвижностью Рмк^{+W} , формирует условия для создания рычажных машин ударного действия. На рисунке 8 одна из трёх схем ударных машин – схема с наибольшим шатуном. Все три схемы можно объединить в общее семейство. Это семейство схем наилучшим образом применимо для создания ударных механизмов, предложенных впервые Абдраимовым Самудином.

Нужно отметить, что до сих пор нет *полного* понимания свойств, присущих схемам с мгновенной кинематической развязкой (Рмк – развязка мгновенная кинематическая). Для схем типа II-I мгновенная кинематическая развязка приводила к так называемому «мёртвому положению», широко известному ещё с XVII века, вызывавшего проблемы в движении механизма. Это положение, возникало, у двух ведомых звеньев оказавшихся на одной линии (тип II-I), когда направление усилия развиваемого третьим ведущим звеном направлено вдоль этого положения. В двигателях внутреннего сгорания обозначены два таких места, называемых верхней и нижней мёртвой точкой. В те же века (XVI-XVII в), благодаря ряду простых и эффективных решений, эти проблемы были сняты, поэтому они никак не отразились в структурной теории, развитой в прошлом столетии.

Мёртвое положение в сущности, это мгновенная кинематическая развязка (Рмк), где подвижность невозможна, или степень подвижности $W=0$. От этого

обстоятельства и название «мёртвое положение», прижившееся, но до сих пор никак не отражённое в структурной теории механизмов. В силу того, что у этих схем $W=0$, допустимо к ним принять обозначение: Rmk^{-W} – развязка мгновенная кинематическая с уменьшением подвижности. На примере схемы кривошипно-шатунного механизма ДВС, это обстоятельство можно пояснить как отсутствие подвижности в двух «мёртвых» точках: верхней и нижней, где $W=0$. На рисунке 10 приведен пример кривошипных шарнирно-рычажных схем с мёртвым положением. Такие схемы можно объединить в общее семейство схем с мгновенной кинематической развязкой с уменьшением подвижности.

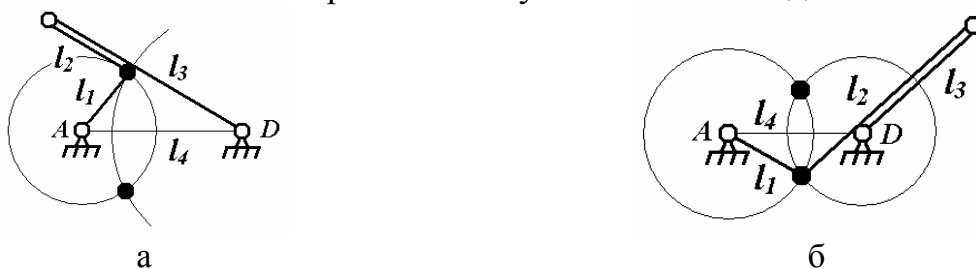


Рис. 10. Семейство схем с Rmk^{-W} – мгновенной кинематической развязкой и «мёртвым» положением звеньев

В завершении надо отметить, что интерес машиноведов к рычажным схемам с мгновенной кинематической развязкой всё больше возрастает. Нам необходимо получить больше представления о свойствах, присущих им.

Данная статья, основанная на опыте создания рычажных ударных механизмов С. Абдраимова, формирует современное понимание структурных свойств, присущих рычажным механизмам, развивает и меняет представление в отношении подвижности механизмов, у которых звенья оказываются в определённый момент на одной линии.

Список литературы

1. Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник. – 2е изд. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
2. Абдраимов С., Невенчанная Т.О. Построение механизмов переменной структуры и исследование их динамики. – Фрунзе.: Илим, 1990. – 175 с.
3. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Филиповский В.П. Механические импульсные генераторы с шарнирно-рычажным захватывающим устройством. – Ф.: Илим, 1975. – 148 с.
4. Академическая наука Киргизстана. История и проблемы. – Ф.: Илим, 1990. – 336 с.
5. Колчин Н.И. Механика машин. – Изд. 3-е, перераб. – Т. 1. Структура и кинематика механизмов. Геометрический и кинематический анализ и синтез механизмов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 560 с.
6. Еремьянц В.Э. Динамика машин: Учебник. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2019. – 332 с.

Сведения об авторах:

Абдраимов Эмиль Самудинович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории ТММ;

Аракеев Муратбек Усеналиевич – директор Горно-технологического колледжа;

Wei Qin Guan – магистрант;

Fu Gui Chen – преподаватель.

РАЗРАБОТКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМОМ РАБОТЫ СТАНКОВ В ТЯЖЁЛЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Лицин К.В., Коротаев А.К., Сосновских Д.М.

*Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский институт), Челябинск*

Ключевые слова: робототехника, робот, робототехнический комплекс, роботизация, автоматизация, адаптивный алгоритм, инновации.

Аннотация. Представлено исследование по разработке робототехнического комплекса с тремя параллельно работающими токарными и одним фрезерным станками с адаптивным алгоритмом приоритизации. Разработана уникальная схема взаимодействия робота и оборудования. Приведена блок-схема управления работой предложенного робототехнического комплекса на основе бинарной логики, обеспечивающая минимальное время простоя и максимальную производительность всего оборудования.

DEVELOPMENT OF A ROBOTIC SYSTEM WITH AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR MACHINE OPERATION IN HARSH INDUSTRIAL CONDITIONS

Licin K.V., Korotaev A.K., Sosnovskih D.M.

South Ural State University (National Research Institute), Chelyabinsk

Keywords: robotics, robot, robotic workcell, robotization, automation, adaptive algorithm, innovation.

Abstract. This paper presents a study on the development of a robotic workcell with three parallel lathes and one milling machine using an adaptive prioritization algorithm. A unique interaction scheme between the robot and the equipment has been developed. A control block diagram for this robotic workcell, based on binary logic, is provided, ensuring minimal downtime and maximum productivity for all equipment.

Введение

В работах [1-3] отмечают, что классические подходы к производству в современных условиях больше не обеспечивают необходимую гибкость, адаптивность и конкурентоспособность. В связи с этим возрастает необходимость изменения отношения к повышению эффективности производства [3]. В частности, актуальным становится направление роботизации производства, которое направлено на автоматизацию задач, носящих рутинный, опасный, ручной или дорогостоящий характер.

Кроме того, в настоящее время из-за ухода большого количества зарубежных производителей, предоставляющих решения по роботизации, очень актуальным становится вопрос импортозамещения и использование роботов отечественного производства.

Цель работы является разработка робототехнического комплекса (РТК) с использованием компьютерного зрения с адаптивным определением размеров заготовки и адаптивным алгоритмом приоритизации трех параллельно

работающих токарных станков и последовательно включенного фрезерного станка для повышения производительности и уменьшения простоев производства, улучшения качества выпускаемой продукции, а также для повышения эффективности использования технологического потенциала оборудования. Задачи работы состояли в подборе оборудования РТК и его размещении с целью минимизации времени выполнения операций, а также разработке адаптивного алгоритма РТК.

Новизна

В настоящее время минимальное количество предприятий с роботизированными технологическими процессами (далее ТП) могут похвастаться значительным приростом производительности в использовании трех станков, выполняющих идентичный тип обработки в пределах одного РТК. Реализация проекта состоит в разработке алгоритма работы РТК, с приоритезацией взаимодействия более чем с двумя, параллельно работающими, токарными станками. Результатом работы статьи является адаптивный алгоритм управления РТК программируемого логического контроллера (далее ПЛК), представляющий простой для понимания аналог обычного цикла программы на языке LD, основанный на бинарной логике и возможности взаимодействия с системой управления робота-манипулятора.

Схема расположения оборудования РТК приведена на рисунке 1.

Алгоритм работы показан на рисунке 2.

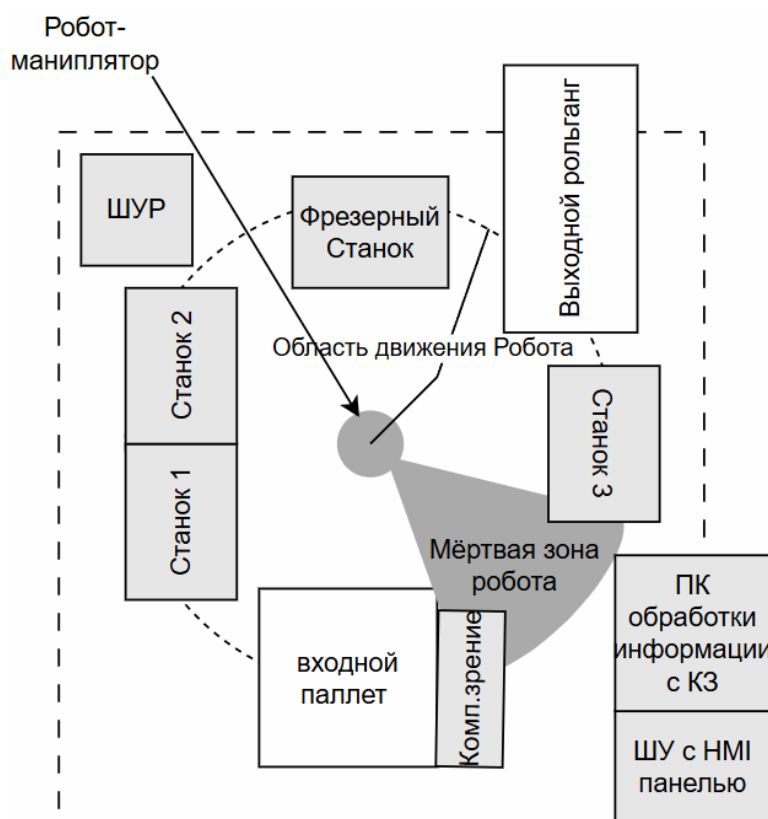


Рис. 1. Схема расположения оборудования РТК: ШУ, ШУР – шкафы управления РТК и робота соответственно; КЗ – Компьютерное зрение

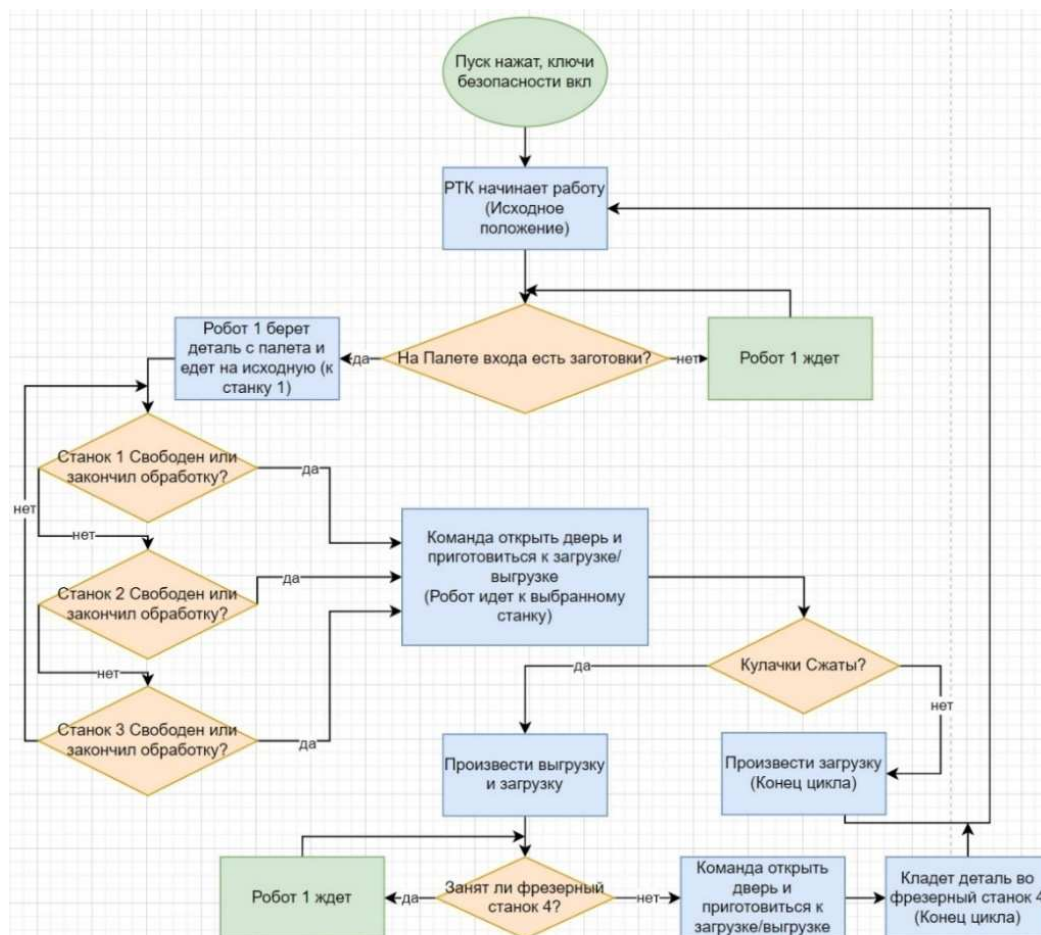


Рис. 2. Алгоритм работы робота со станками

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет снизить время простоя робота в ожидании окончания обработки детали очередным станком суммарно на 1,5 часа в 12-ти часовую смену. За счёт предложенного технического решения повышается рост производительности: ожидаемый эффект от внедрения робототехнической ячейки приведёт к уменьшению времени простоев на 12-14%.

Финансирование. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №25-79-10376.

Список литературы

1. Байрамов Ф.Д., Фардеев А.А. Автоматизация технологического процессаковки или горячей штамповки заготовок // Технология и технологические машины. – 2012. – №4. – С. 59-63.
2. Кайснер Э., Раффо Д., Вунш-Винсент С. Робототехника: прорывные технологии, инновации, интеллектуальная собственность // Форсайт. – 2016. – Т. 10, №2. – С. 8-39.
3. Борисова О.В., Древинг С.Р., Лосева О.В., Федотова М.А. Меры финансовой господдержки и риск-факторы, влияющие на стоимость инвестиционных проектов по внедрению промышленных робототехнических комплексов // Государственные финансы. – 2025. – Т. 29, №3. – С. 20-35. – DOI: 10.26794/2587-5671-2025-29-3-20-34.

Сведения об авторах:

Лицин Константин Владимирович – к.т.н., доцент;
 Сосновских Данил Максимович – студент;
 Кортаев Александр Константинович – студент.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ В МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Сергеева В.М.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие жидкости, охлаждение, металлообработка, фрезерование, стойкость инструмента, шероховатость поверхности, экологичность, минимальное охлаждение.

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ различных систем охлаждения, применяемых в процессах металлообработки. Рассматриваются традиционная подача эмульсионных смазочно-охлаждающих жидкостей, системы минимального охлаждения и криогенное охлаждение. На основе анализа литературных источников и технических данных производителей проводится оценка эффективности каждой системы по ключевым критериям: влияние на стойкость режущего инструмента, качество обрабатываемой поверхности, экономическую эффективность и экологическое воздействие. Выявлены оптимальные области применения каждой технологии. Сделан вывод о перспективности систем минимального охлаждения для большинства видов обработки, в то время как криогенное охлаждение демонстрирует наилучшие результаты при обработке труднообрабатываемых материалов.

COMPARATIVE ANALYSIS OF COOLING SYSTEMS IN METALWORKING: EFFICIENCY AND AREAS OF APPLICATION

Sergeeva V.M.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: cutting fluid, cooling, metalworking, milling, tool life, surface roughness, environmental friendliness, minimum quantity lubrication.

Abstract. The article provides a comparative analysis of various cooling systems used in metalworking processes. Traditional supply of emulsion cutting fluids, minimum quantity lubrication systems and cryogenic cooling are considered. Based on the analysis of literary sources and technical data from manufacturers, the effectiveness of each system is assessed according to key criteria: impact on cutting tool life, quality of the machined surface, economic efficiency and environmental impact. The optimal areas of application for each technology are identified. The conclusion is made about the promise of minimum quantity lubrication systems for most types of processing, while cryogenic cooling shows the best results when processing difficult-to-machine materials.

Введение

Эффективный отвод тепла, обеспечиваемый в зоне резания, является одной из ключевых задач в металлообработке. Перегрев приводит к ускоренному износу инструмента, снижению качества поверхности и возникновению напряжений в материале заготовки. Зачастую для решения этой проблемы применяют системы подачи смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в виде эмульсий. Однако в последние десятилетия получили развитие альтернативные методы, такие как минимальное охлаждение (MQL) и криогенная обработка, обладающие рядом преимуществ [1]. Целью данного исследования является

сравнительный анализ эффективности основных систем охлаждения и определение их рациональных областей применения.

Методология исследования

Для проведения сравнительного анализа были выделены четыре ключевых критерия оценки.

1. Влияние на стойкость инструмента: способность системы снижать температурную нагрузку и абразивный износ.
2. Влияние на качество поверхности: способность обеспечивать требуемые параметры шероховатости и отсутствие дефектов.
3. Экономическая эффективность: совокупные затраты на оборудование, расходные материалы и утилизацию.
4. Экологичность и безопасность: воздействие на окружающую среду и условия труда оператора.

Анализ проводился на основе обзора научных публикаций, технических отчетов и данных производителей оборудования для ведущих технологических процессов: фрезерование, точение и сверление.

Сравнительный анализ систем охлаждения

1. Традиционная система подачи эмульсионных СОЖ.

Данная система предполагает подачу большого объема водно-масляной эмульсии под давлением в зону резания.

– Преимущества: высокая эффективность охлаждения; хорошие смазывающие свойства; стабильно себя ведет даже на высоких скоростях резания, подходит почти во всем видам резания.

– Недостатки: высокие эксплуатационные расходы (закупка, содержание, утилизация СОЖ); негативное воздействие на окружающую среду и на здоровье оператора при длительном контакте; необходимость в сложной системе фильтрации и циркуляции.

– Область применения: крупносерийное и массовое производство, черновая обработка с большими объемами съема материала, операции шлифования [1].

2. Система минимального охлаждения (MQL).

Система MQL подает в зону резания мелкодисперсный аэрозоль, состоящий из микроскопических капель масла и воздуха.

– Преимущества: сильное снижение расхода СОЖ; повышение стойкости инструмента в операциях, где важна смазка, а не охлаждение; чистота детали и рабочей зоны за счет снижения туманообразования и загрязнения.

– Недостатки: плохое охлаждение в сравнении с классическим СОЖ; не подходит для обработки с высокой температурой (шлифование, глубокое сверление); станок должен иметь систему MQL и герметичный шпиндель.

– Область применения: чистовая и получистовая обработка большинства сталей и цветных металлов; высокоскоростное фрезерование; операции, требующие высокой чистоты поверхности [2].

3. Криогенное охлаждение.

В качестве хладагента используется сжиженный азот или углекислый газ, подаваемый непосредственно на режущую кромку.

– Преимущества: глубокое охлаждения (эффективно при обработке суперсплавов, титана); значительное увеличение стойкости инструмента; высокая экологичность (CO_2 и N_2 испаряются без следа).

– Недостатки: высокая стоимость оборудования и хладагента; необходимость в специальных системах подачи; риск охрупчивания обрабатываемого материала.

– Область применения: обработка труднообрабатываемых материалов (титановые сплавы, жаропрочные никелевые сплавы); процессы, где полностью исключено попадание масла на деталь [2, 3].

Результаты и обсуждение

Сводные результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнительные характеристики систем охлаждения

Критерий	СОЖ	МQL	Криогенное охлаждения
Охлаждение	Высокое	Низкое	Наивысшее
Смазывание	Высокое	Высокое	Низкое
Стойкость инструмента	Высокая	Очень высокая (за счет смазки)	Наивысшая (для труднообрабатываемых материалов)
Качество поверхности	Хорошее	Отличное	Хорошее
Экономическая эффективность	Низкая	Высокая	Низкая
Экологичность	Низкая	Средняя	Высокая

На основе анализа можно сделать следующие выводы.

1. Традиционные СОЖ отлично комбинирует в себе охлаждение и смазывание места обработки, но имеет низкие экологичность и экономическую эффективность, также остается незаменимым в крупном и массовом производстве.

2. Система MQL объединяет в себе отличное качество поверхности при обработке и большую экологичность с экономической эффективностью за счет минимального использования СОЖ, но плохо охлаждает поверхность обработки, отлично подходит для обработки, где важна чистота поверхности.

3. Криогенное охлаждение отличается очень высоким уровнем охлаждения и отлично подойдет для обработки труднообрабатываемых материалов, но имеет низкую смазывающую способность.

Заключение

Проведенный анализ показал, что не существует универсальной системы охлаждения, оптимальной для всех технологических задач. Выбор системы должен основываться на комплексном учете обрабатываемого материала, вида операции, требований к качеству и экономических факторов. Начинаясь переход к "сухим" и "полусухим" технологиям, таким как MQL, является общемировым трендом, обусловленный необходимостью повышения экологичности и снижения себестоимости производства. Для российских

машиностроительных предприятий наиболее целесообразным первым шагом в модернизации является внедрение систем MQL на операциях чистовой обработки.

Список литературы

1. Kui G.W.A., Islam S., Reddy M.M., Khandoker N., Chen V.L.C. Recent progress and evolution of coolant usages in conventional machining methods: a comprehensive review // The Internathoinal Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, 119, pp. 3-40. doi.org/10.1007/s00170-021-08182-0
2. Khan A.M., Rahat M.R., Ahmed U., Jamil M., Ali M.A., Zhao G., Abellán-Nebot J.V. The Recent Advancements in Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Its Application in Mechanical Machining // A State-of-the-Art Review. Lubricants. 2025, 13, 401, pp. 1-56. doi.org/10.3390/lubricants13090401
3. Cheng L., Qiu t., Huang S., Xie H., Liu C., Li Y., Lin L., Xiang Z., Shui Y., Wang F., Wu X., Yan L., Jiang F. Study on Tool wear mechanism under Cryogenic CO2-Assisted Minimum Quantity Lubrication Technology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, 126, pp. 543-559. doi.org/10.1007/s00170-023-11122-9.

Сведения об авторе:

Сергеева Валерия Михайловна – студентка.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СЛИТКОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ВЫПЛАВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ

Егорова Ю.Б.¹, Давыденко Л.В.², Белова С.Б.¹

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва;*

²*Московский политехнический университет, Москва*

Ключевые слова: титановый сплав Grade 5, слитки, шихта, отходы, химический состав, механические свойства, статистический анализ.

Аннотация. Проведены статистические исследования по сравнительной оценке содержания легирующих элементов и примесей в слитках титанового сплава Grade 5 (Ti-6Al-4V), выплавленных с использованием 10 и 15% стружки, а также механических свойств технологических проб. Для слитков, выплавленных с разным количеством отходов, не было обнаружено значимой статистической разницы химического состава и уровня механических свойств.

STUDY OF THE QUALITY OF TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V INGOTS SMELTED USING WASTE

Egorova Yu.B.¹, Davydenko L.V.², Belova S.B.¹

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow;*

²*Moscow Polytechnic University, Moscow*

Keywords: titanium alloy Grade 5, ingots, charge, waste, chemical composition, mechanical properties, statistical analysis.

Abstract. Statistical studies were conducted to compare the content of alloying elements and impurities in ingots of titanium alloy Grade 5 (Ti-6Al-4V), smelted using 10 and 15% chips, as well as the mechanical properties of process samples. For ingots smelted with different amounts of waste, no significant statistical difference in chemical composition and level of mechanical properties was found.

В настоящее время трудно представить развитие и дальнейшее совершенствование современного промышленного комплекса страны без широкого применения титановых сплавов [1-4]. С момента внедрения в 50-60-х годах прошлого века основным потребителем титана остается аэрокосмическая промышленность и в целом военно-промышленный комплекс. За последние 20 лет на авиакосмическую отрасль приходится приблизительно от 40 до 60% от общей структуры потребления [4]. К другим отраслям применения титана следует отнести нефтяную и химическую промышленность, судостроение, автомобилестроение, металлургию, целлюлозно-бумажную, легкую и пищевую промышленность, энергетику, морскую технику, медицину, архитектуру, строительство, спорт, товары народного потребления. Однако основным недостаток титановых сплавов – высокая стоимость, что сдерживает их использование для изготовления изделий гражданского назначения. Это обусловлено прежде всего тем, что в себестоимости титановых слитков затраты на дорогостоящую шихту (титановую губку и легирующие компоненты) приходится до 90% всех затрат [3].

Вместе с тем при производстве слитков из титановых сплавов образуется значительное количество металлических отходов, которые целесообразно использовать для выплавки слитков, так как это позволяет снизить стоимость продукции. Однако вследствие высокой активности титана отходы насыщаются газовыми примесями, так что вовлечение в плавку слишком большого количества стружки, кусков, обрезки может привести к недопустимому возрастанию в слитке примесей внедрения.

В данной работе были проведены статистические исследования по сравнительной оценке содержания легирующих элементов и примесей в слитках титанового сплава Grade 5 (Ti-6Al-4V), выплавленных с использованием 10 и 15% стружки, а также механических свойств технологических проб (предела прочности, относительного удлинения, поперечного сужения, ударной вязкости). Исследуемыми факторами были содержание легирующих элементов (алюминия, ванадия) и примесей (кислорода, азота, углерода, водорода, железа) и результаты механических испытаний. Статистическую обработку проводили с помощью ППП «Statistica». В работе определяли выборочные числовые характеристики (среднее, дисперсию, стандартное отклонение, коэффициент вариации), проводили проверку нормальности распределения. Для сравнения химического состава и свойств слитков, выплавленных с использованием разного количества отходов, проводили проверку статистической гипотезы о равенстве математических ожиданий (выборочных средних) и дисперсий с доверительной вероятностью 0,95.

Сравнение результатов статистического анализа показывает, что все слитки имеют химический состав и механические свойства, удовлетворяющие требованиям нормативной документации (табл. 1).

Табл. 1. Результаты статистического анализа

Статистические показатели	Химический состав, % м.							σ_B , МПа
	C	Al	Fe	H	V	N	O	
Расчетный состав	-	6,2	-	-	4,0	-	-	-
Требования НД	$\leq 0,08$	5,5-6,75	$\leq 0,40$	$\leq 0,015$	3,5-4,5	$\leq 0,05$	$\leq 0,20$	≥ 895
10 % отходов в виде стружки								
Диапазон значений по факту	-	6,06-6,26	0,09-0,1	0,003-0,004	3,6-4,1	-	0,05-0,06	904-1064
Среднее по факту	0,02	6,19	0,091	0,0035	3,9	0,01	0,056	998
Стандартное отклонение	-	0,062	0,0035	0,0005	0,14	-	0,0052	38,0
Коэффициент вариации, %	-	0,97	3,3	16,7	3,6	-	8,3	3,8
15 % отходов в виде стружки								
Диапазон значений по факту	-	5,8-6,1	0,08-0,09	-	3,8-4,0	-	0,05-0,06	922-1069
Среднее по факту,	0,02	5,92	0,086	0,004	3,94	0,01	0,058	1021
Стандартное отклонение	-	0,13	0,0055	-	0,09	-	0,0045	33,0
Коэффициент вариации, %	-	2,2	5,8	-	2,3	-	6,9	3,2

Для слитков, выплавленных с 10 и 15% отходов, не было обнаружено значимой статистической разницы между средним содержанием легирующих элементов и примесей, а также уровнем механических свойств. Статистические показатели, характеризующие разброс и однородность выборки, также существенно не отличаются друг от друга. Вместе с тем следует отметить, что технологические пробы, выплавленные с 15% стружки, имеют несколько более высокие показатели прочности при меньшей пластичности. Так, среднее значение предела прочности повысилось с 998 до 1021 МПа, относительное удлинение снизилось с 14,2 до 11,9%, ударная вязкость с 0,91 до 0,70 МДж/м², при этом поперечное сужение мало изменилось и составило 42,3-42,9%.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что повышение количества отходов в шихте с 10 до 15% не приводит к снижению качества слитков, при этом уменьшается расход дорогостоящих шихтовых материалов (лигатуры, чистого алюминия, титановой губки) и себестоимость производства титановых сплавов.

Список литературы

1. Мاستушкин М.Ю., Кусакина Ю.Н., Федорова Л.В. Развитие титановой отрасли в России как один из технологических факторов обеспечения национальной безопасности // Титан. – 2018. – №3. – С. 48-57.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. – М.: ВИС – МАТИ, 2009. – 520 с.
3. Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Плавка и литье титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1994. – 366 с.
4. Александров А.В., Леднов С.В., Давыдкина Е.А. Состояние дел в титановой отрасли и перспективы развития // Технология легких сплавов. – 2021. – №2. – С. 76-81.

Сведения об авторах:

Егорова Юлия Борисовна – д.т.н., профессор, заместитель директора по учебной работе;
Давыденко Людмила Васильевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Материаловедение»;
Белова Светлана Борисовна – к.т.н., доцент, доцент кафедры МСИИТ.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Теряев Н.С., Левко В.А.

*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск*

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, закрытый канал, направляющий аппарат, литая заготовка, рабочая среда, центробежное колесо.

Аннотация. Рассмотрены основные проблемы обработки абразивным потоком закрытых каналов литых заготовок, такие как неравномерность съема материала и недостаточная производительность. Неравномерность обработки предложено устранять за счет направляющего аппарата как дополнительного элемента технологической оснастки. Сформулированы основные требования по созданию направляющего аппарата. Предложена схема обработки абразивным потоком с направляющим аппаратом и установочными пальцами. Для повышения производительности обработки рекомендован состав высоковязкой рабочей среды.

THE MAIN PROBLEMS OF ABRASIVE FLOW MACHINING OF CLOSED CHANNELS OF CAST WORKPIECES AND WAYS TO SOLVE THEM

Teryaev N.S., Levko V.A.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

Keywords: abrasive flow machining, closed channel, guide device, cast workpiece, media, impeller.

Abstract. The main problems of abrasive flow machining of closed channels of cast workpieces, such as uneven material removal and insufficient productivity, are considered. It is proposed to eliminate uneven machining by using a guide vane as an additional element of the machining tooling. The main requirements for creating a guide vane are formulated. A design for abrasive flow machining with a guide vane and positioning pins is proposed. To improve machining productivity, a high-viscosity medium composition is recommended.

Центробежные колеса являются одним из основных компонентов лопаточных насосов. Заготовки таких деталей получают литьем по выплавляемым моделям из литейных коррозионностойких сталей. Состояние поверхностного слоя заготовок после литья по выплавляемым моделям характеризуется: повышенной шероховатостью $Ra = 6,2 \dots 12,5$ мкм; большой глубиной измененного слоя (литейная корка $h = 0,1 \dots 0,8$ мм). высокими остаточными напряжениями. Из-за высокой сложности геометрии закрытых каналов литых заготовок их окончательная обработка инструментами постоянной формы (круги, хонинговальные головки, притиры, ленты, бруски, лезвийный инструмент и др.) затруднена. В связи с этим существенное развитие получили такие финишные технологии, у которых в качестве инструмента используется поток различных сред, несущих рабочие элементы и способных копировать форму обрабатываемого канала.

Сравнительный анализ технологий финишной обработки закрытых каналов показал, что по обеспечению равномерной шероховатости заданной величины в

наибольшей степени отвечает обработка абразивным потоком (abrasive flow machining (AFM)) [1]. Так AFM удалось обеспечить требуемую шероховатость закрытых каналов, однако при этом была обнаружена неравномерность съема металла на входе и выходе из каналов. Также была отмечена недостаточная производительность процесса [2]. Неравномерность обработки подтверждена в зарубежных исследованиях по результатам конечно-элементного моделирования [3], а также визуальных исследований процесса течения рабочей среды в каналах [4]. Выравнивание условий обработки на входе и выходе закрытых каналов было предложено реализовывать за счет введения в схему обработки дополнительного элемента - направляющего аппарата (НА) [5].

Однако при сборке приспособления лопатки направляющих аппаратов примыкают к обрабатываемым поверхностям лопаток заготовки с определенным зазором. Наличие зазора между лопатками НА и заготовки ведет к проявлению эффекта упругого восстановления потока. Возникающая при этом перестройка профиля потока рабочей среды не устраняет полностью неравномерность обработки. Наибольший съем материала наблюдается в зонах на входе и выходе в канале, где перестройка профиля потока максимальна.

Для устранения данного недостатка предложена зависимость, связывающая между собой площади поперечных сечений $S_{\text{на}}$ выходных отверстий направляющего аппарата и сечений входных отверстий S_z каналов заготовки, длину зазора L и коэффициент упругого восстановления струи потока струи α (для AFM высоковязкой средой его значение 1,1...1,3 на каждый миллиметр длины зазора): $S_z = S_{\text{на}} L^{\alpha}$ (1).

С учетом зависимости (1) сформулированы предложения по проектированию и изготовлению НА (рис. 1) как элемента технологической оснастки для обработки абразивным потоком закрытых каналов.

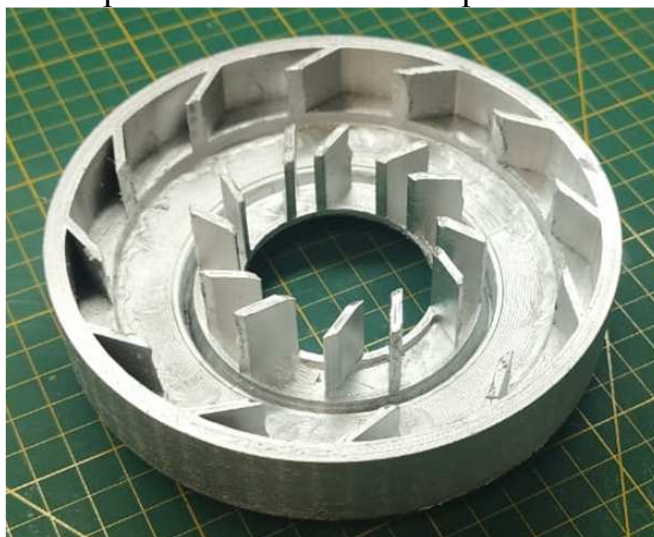


Рис. 1. Направляющий аппарат

Эти предложения стали основой для создания направляющего аппарата для обработки конкретной литой заготовки. Сам аппарат (рис. 1) был изготовлен лазерной стереолитографией с последующей металлизацией.

Для обработки абразивным потоком закрытых каналов литой заготовки была предложена схема, в состав которой введены направляющий аппарат и установочные пальцы, для предотвращения поворота заготовки потоком рабочей

среды относительно заданного положения и базирования ее относительно нижней части приспособления [6].

Для улучшения шероховатости и повышения микротвёрдости внутренних поверхностей закрытых каналов заготовок из литейных сталей рекомендовано проводить обработку абразивным потоком высоковязкой средой. Состав такой среды определен экспериментально. За 60 циклов обработки обеспечили равномерное по всей поверхности закрытого канала улучшение шероховатости поверхности от $Ra = 8,7-9,3$ мкм до $Ra = 2,4-2,8$ мкм, а также увеличение микротвёрдости образцов от 38,5-40,5 HRC до 43,5-45,5 HRC [7].

Список литературы

1. Левко В.А., Теряев Н.С., Литовка О.В., Иванов П.А. Совершенствование технологии обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей // Металлообработка. – 2023. – №3(135). – С. 3-12. – DOI: 10.25960/mo.2023.3.3.
2. Сысоев С.К., Сысоев А.С., Левко В.А., Снетков П.А., Лубнин М.А. Обеспечение точности расхода компонентов топлива через каналы деталей, обработанных экструзионным хонингованием // Технология машиностроения. – 2007. – №6. – С. 48-52.
3. Cheng K., Shao Y., Bodenhorst R., Jadv M. Modeling and Simulation of Material Removal Rates and Profile Accuracy Control in Abrasive Flow Machining of the Integrally Bladed Rotor Blade and Experimental Perspectives. ASME. // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2017, vol. 139(12), p. 121020. doi.org/10.1115/1.4038027.
4. Левко В.А., Лубнин М.А., Снетков П.А., Пшенко Е.Б., Турилов Д.М. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – №4(25). – С. 138-145.
5. А.с. №1161359 СССР. Способ обработки деталей абразивной массой / С.К. Сысоев, М.А. Лубнин. – Заявка №3652014 от 11.07.1983; опубл. 15.06.1985.
6. Патент №2751073 РФ. Способ обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток / Н.С. Теряев, В.А. Левко. – Заявка №2020136652 от 06.11.2020; опубл. 07.07.2021.
7. Левко В.А., Теряев Н.С., Литовка О.В., Иванов П.А. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, №3. – С. 122-132. – DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132.

Сведения об авторах:

Теряев Николай Сергеевич – доцент кафедры ТМС;

Левко Валерий Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры ТМС.

СОВРЕМЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЕЧАЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1580

Ворошилова М.В., Сидельников С.Б., Бер В.И., Ворошилов Д.С.
Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: обечайка, алюминиевые сплавы, гибка, штамп, обработка металлов давлением.

Аннотация. В данной работе представлено техническое решение для производства обечаек различных размеров, в том числе крупных. Предлагаемое устройство позволит расширить технологические возможности и применять его в единичном и мелкосерийном производствах при наличии кривошипных и гидравлических прессов с малыми размерами рабочего пространства и реализации процесса гибки вне зоны рабочего пространства пресса.

A MODERN TECHNICAL SOLUTION FOR THE PRODUCTION OF SHELLS FROM ALUMINUM ALLOY 1580

Voroshilova M.V., Sidelnikov S.B., Ber V.I., Voroshilov D.S.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: shell, aluminum alloys, bending, stamping die, metal forming.

Abstract. This work presents a technical solution for the production of shells of various sizes, including large ones. The proposed device will expand technological capabilities and be used in single-piece and small-batch production using crank and hydraulic presses with small workspaces and for bending outside the press's working area.

Развитие одной из ключевых отраслей промышленности – машиностроения, обеспечивающей экономическое развитие страны, требует внедрения новых технологий и материалов. Применение прогрессивных методов в листоштамповочном производстве способствует повышению надежности и качества выпускаемой продукции, увеличению скорости и точности обработки материалов, сокращению себестоимости производства изделий.

Особое внимание в современной промышленности, в том числе в машиностроительной отрасли, уделяется новым алюминиевым сплавам, обладающим рядом исключительных свойств [1]. Они имеют небольшой удельный вес, высокую технологичность при горячей обработке давлением, повышенные прочностные свойства. К таким относят сплавы системы Al-Mg, легированные скандием, сравнительно новым из которых является сплав 1580 [2, 3]. Листовой прокат из него применяется для изготовления различных листоштампованных деталей, в том числе элементов конструкций деталей ракетно-космической техники.

Особое распространение для производства таких изделий получил способ изготовления обечаек из плоской заготовки с помощью вальцев. Однако ввиду ограничения размеров получаемых обечаек, что обусловлено габаритами валков, этот метод нельзя считать универсальным, а возможности его применения ограничены сравнительно высокой стоимостью вальцев, особенно для обечаек большого диаметра, а также их редкое применение этого оборудования на

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

Список литературы

1. ГОСТ 4784-2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».
2. Sidelnikov S.B., Baranov V.N., Konstantinov I.L., Zenkin E.Yu., Lopatina E.S., Bezrukikh A.I., Voroshilov D.S., Yuryev P.O., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V., Belokonova I.N., Galiev R.I. Investigation of rolling modes, structure and properties of aluminum-magnesium alloy plates with a reduced scandium content // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, vol. 121, iss. 1-2, pp. 1373-1384.
3. Сидельников С.Б., Бер В.И., Лопатина Е.С., Ворошилова М.В. Разработка способа получения тонкостенных деталей сферической формы из алюминиевого сплава 1580 // Цветные металлы. – 2023. – №7. – С. 83-89.
4. Патент №2802880 РФ. Штамп для получения цилиндрических обечаек гибкой / С.Б. Сидельников, В.И. Бер, М.В. Ворошилова, Д.С. Ворошилов, И.Л. Константинов, Е.В. Иванов, И.Н. Белоконова, С.В. Кравченко. – Заявка №2022132500 от 12.12.2022; опубл. 05.09.2023, Бюл. №25.
5. Патент №2847072 РФ. Устройство для получения обечаек гибкой / С.Б. Сидельников, В.И. Бер, М.В. Ворошилова, Е.С. Лопатина, Д.С. Ворошилов, Е.В. Иванов, Ю.В. Байковский. – Заявка №2025100226 от 10.01.2025; опубл. 24.09.2025, Бюл. № 27.

Сведения об авторах:

Ворошилова Марина Владимировна – старший преподаватель кафедры «Обработка металлов давлением»;

Сидельников Сергей Борисович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Обработка металлов давлением»;

Бер Владимир Иванович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Обработка металлов давлением»;

Ворошилов Денис Сергеевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением».

ОЦЕНКА СПЛОШНОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ СФОРМИРОВАННЫХ В АРГОНОВОЙ МЕЖЭЛЕКТРОДНОЙ СРЕДЕ

Жулдыбин А.А., Владимиров А.А., Шаповалов А.И.

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета «МИСИС»,
Старый Оскол*

Ключевые слова: электроискровое легирование, сплошность, покрытие, шероховатость, межэлектродная среда, аргон, относительная опорная длина профиля, скорость формирования.

Аннотация. В статье представлены результаты исследований сплошности электроискровых покрытий, сформированных механизированным способом. Формирование покрытий производилось за четыре прохода. В качестве межэлектродной среды при легировании был принят аргон. Представлены результаты измерений значений шероховатости и относительной опорной длины профиля поверхности. Выдвинуты предположения по оценке сплошности электроискровых покрытий по параметрам микрогеометрии поверхности.

EVALUATION OF THE CONTINUITY OF ELECTRIC SPARK COATINGS FORMED IN AN ARGON INTERELECTRODE ENVIRONMENT

Zhuldybin A.A., Vladimirov A.A., Shapovalov A.I.

*Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the
National University of Science and Technology "MISIS", Stary Oskol*

Keywords: electric spark alloying, continuity, coating, roughness, interelectrode environment, argon, relative profile support length, formation speed.

Abstract. This article presents the results of a study of the continuity of electrosark coatings formed by a mechanized method. The coatings were formed in four passes. Argon was used as the interelectrode medium during alloying. The results of surface roughness and relative support length measurements are presented. Hypotheses are put forward for assessing the continuity of electrosark coatings based on surface microgeometry parameters.

Из обзора литературных источников по теме формирования электроискровых покрытий установлено, что одним из важных параметров электроискрового легирования является сплошность формируемого покрытия. При электроискровом легировании стремятся к формированию покрытий со сплошностью, близкой к 100%. Обеспечение высокой сплошности покрытий возможно при соблюдении скорости формирования ≈ 3 мин/см² [1, 2].

В данной работе были выполнены эксперименты по механизированной обработке электроискровым легированием поверхности заготовки. Для обеспечения специальных свойств покрытия легирование производилось твердосплавным электродом марки Т15К6 в межэлектродной среде, сформированной аргоном. С учетом технических характеристик токарного станка и геометрии упрочняемой детали были определены следующие параметры легирования: частота вращения заготовки $n = 36$ об/мин; подача $s_0 = 0,063$ мм/об; диаметр заготовки $d = 60$ мм [3].

Таким образом, линейная скорость формирования покрытия за один проход электрода по поверхности составила 2,268 мм/мин. С учетом сечения электрода 5х6 мм и значений режимов легирования, электрод будет контактировать с одной областью упрочняемой поверхности в течение более двух минут, что будет способствовать формированию максимальной сплошности электроискрового покрытия.

Для обеспечения максимальной сплошности формируемого покрытия был проведен эксперимент по послойному формированию электроискрового покрытия за четыре прохода при одном направлении вращения детали: слева направо, справа налево, слева направо и справа налево. Таким образом, формировалась своеобразная твердосплавная упрочняющая сетка. Схематический рисунок формируемой сетки представлен на рисунке 1.

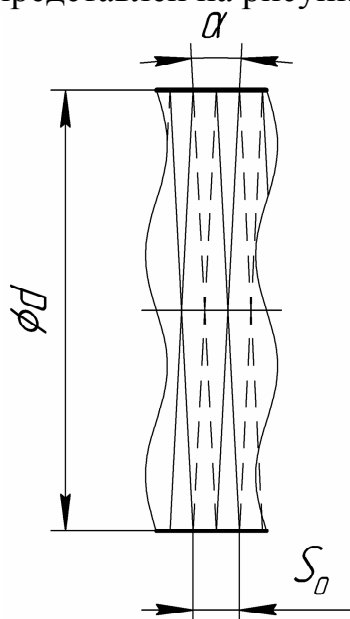


Рис. 1. Схема сетки электроискрового покрытия

Фотографии сформированных слоев покрытия представлены на рисунке 2.

По представленным фотографиям, можно отметить, что сплошное покрытие формируется после первого прохода. При некотором увеличении, например, в 40 раз, будут отчетливо видны локальные участки поверхности, где электроискровое покрытие отсутствует. Такие участки наблюдаются и на втором, и на третьем слоях. Можно отметить, что формирование покрытия за четыре прохода во встречных направлениях является целесообразным.

Стоит также отметить, что для электроискрового покрытия наблюдается значительное количество пригаров, представленных черными точками. Причем, чем дальше порядковый номер слоя покрытия, тем больше количество пригаров. Такой характер формирования покрытия может быть связан с физико-химическими процессами в зоне контакта электрода с поверхностью заготовки в зависимости от межэлектродной среды.

По результатам измерения параметров микрогеометрии каждого формируемого слоя покрытия были измерены: среднее арифметическое отклонение профиля Ra и кривая Аббота-Файрстоуна на уровне 40%. Численные значения исходной поверхности и каждого слоя покрытия представлены в таблице 1.

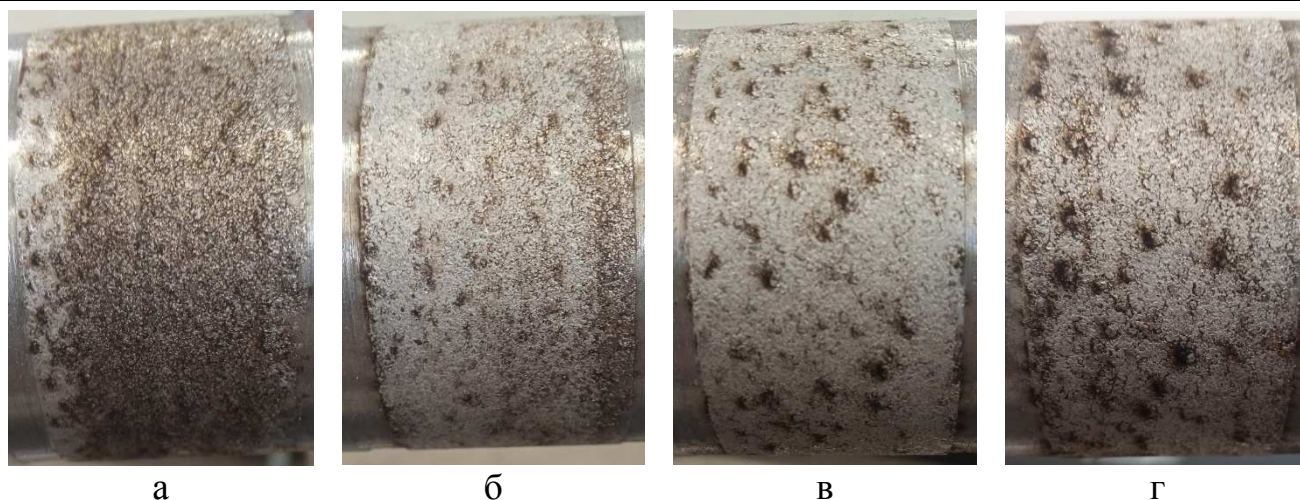


Рис. 2. Фотографии покрытия, сформированного в аргоновой межэлектродной среде: а – 1 проход; б – 2 проход; в – 3 проход; г – 4 проход

Табл. 1. Шероховатость и относительная опорная длина профиля

№ слоя	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Относительная опорная длина профиля Tr, %
заготовка	5,263	48,00
1	11,870	41,10
2	11,790	50,40
3	12,940	37,00
4	13,530	55,00

Из анализа значений, представленных в таблице 1, очевидно, что значение шероховатости покрытий, увеличилось в $\approx 2,6$ раза по сравнению с исходной поверхностью. Значения шероховатости слоев покрытия практически не изменились и увеличились с 11,870 мкм для первого слоя до 13,530 мкм для четвертого слоя.

Что касается относительной опорной длины профиля, измеренной на уровне 40%, для исходной поверхности она составила 48,00%. Что касается слоев покрытий, наблюдается увеличение с 41,10% для первого слоя до 50,40% для второго, уменьшение до 37,00% для третьего и увеличение до 55,00% для четвертого слоев.

Таким образом, относительная опорная длина профиля при формировании покрытия увеличилась на 7,00% по сравнению с исходной поверхностью, несмотря на уменьшение относительной опорной длины профиля после формирования первого слоя покрытия.

Предположительно, такой характер формирования покрытия связан с физическими процессами, происходящими в зоне контакта электрода с поверхностью заготовки, и спецификой массопереноса материала твердосплавного электрода в аргоновой межэлектродной среде.

Правомерно предположить, что для аргоновой межэлектродной среды, не смотря на увеличение шероховатости поверхности, характерно увеличение относительной опорной длины профиля, что в совокупности с последующей финишной обработкой позволит получить микрогеометрию поверхности,

обеспечивающую высокие эксплуатационные показатели контактной поверхности.

Направлением дальнейших исследований целесообразно формирование аналогичных поверхностей в межэлектродной среде, состоящей из потока воздуха и последующее сравнение параметров микрогеометрии покрытий: шероховатости поверхности по параметру R_a , относительной опорной длины профиля поверхности.

Список литературы

1. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.
2. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
3. Жулдыбин А.А., Владимиров А.А., Шаповалов А.И. Перспективы применения электроискрового легирования на рабочих поверхностях деталей тележек локомотивов // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 9(45). – С. 28-37. – DOI: 10.30987/2782-5957-2025-9-28-37.

Сведения об авторах:

Жулдыбин Андрей Аркадьевич – аспирант;

Владимиров Александр Андреевич – к.т.н., доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта;

Шаповалов Антон Иванович – к.т.н., доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта.

АНАЛИЗ ЧАСТОТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМИНОВ, ОБОЗНАЧАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТ, В СТАТЬЯХ И МАТЕРИАЛАХ КОНФЕРЕНЦИЙ ПО ТЕМЕ ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБООБРАБОТКИ МЕТЧИКАМИ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Тищенко И.В., Харченко А.О.

Севастопольский государственный университет, Севастополь

Ключевые слова: бесстружечный метчик, раскатник, деформирующий метчик, внутреннее резьбовыдавливание, раскатывание резьб, анализ терминов.

Аннотация. При проведении исследования по внутренней резьбообработке метчиками методом пластической деформации необходимо определить правильные термины для формирования поисковых запросов. Отсутствие на начальном этапе необходимого опыта в этой области и большое разнообразие терминов для обозначения инструмента увеличивают время на поиск и изучение источников. Целью данного исследования является анализ частоты использования терминов, обозначающих инструмент, на русском и английском языках в существующих публикациях. Для этого были проанализированы названия и аннотации найденных статей и материалов конференций по теме получения внутренних резьб методом пластической деформации. В результате был получен перечень терминов на русском и английском языках, а также статистика использования этих терминов в публикациях. Полученный перечень может быть использован при создании поисковых запросов для более глубокого поиска источников.

FREQUENCY USAGE ANALYSIS OF TERMS FOR TOOL IN JOURNAL ARTICLES AND CONFERENCE PAPERS ON FORM TAPPING

Tishchenko I.V., Kharchenko A.O.

Sevastopol State University, Sevastopol

Keywords: fluteless tap, rolling tap, forming tap, extrusion tapping, form tapping, term analysis.

Abstract. When conducting research on form tapping, one has to determine correct terms for search queries building. The lack of experience in this field and great variety of terms for tool slow down the literature search and review in the beginning stage. Thus the objective of this study is the frequency usage analysis of English and Russian terms for tool in existing academic writings. In the study titles and abstracts of found journal articles and conference papers on form tapping were analyzed. In result, the list of Russian and English terms and the usage frequency statistics were collected. The list of terms could be used during query building for deeper literature search.

Введение

Работа с источниками является важной частью процесса изучения любой области человеческого знания. В ходе поиска материалов по теме получения внутренних резьб метчиками методом пластической деформации в рамках диссертационного исследования первым вызовом стал выбор правильных терминов, для поисковых запросов. В разных публикациях разные авторы по-разному обозначали метчик, который формирует резьбу деформируя материал отверстия. В результате поиск публикаций занял больше времени, т.к. единственным доступным методом стал поиск по списку источников, на которые ссылалась конкретная работа, и которые цитировали конкретную работу.

После нахождения достаточного количества публикаций по теме, стало возможным проанализировать какие термины реально могут быть использованы в поисковых запросах. Проведение такой работы могло бы позволить другим исследователям, которые в дальнейшем планируют заняться темой получения внутренней резьбы метчиками методом пластической деформации, быстрее переходить к освоению существующего опыта, минуя стадию поиска терминов.

В справочной литературе используются разные термины, обозначающие метчик для получения резьбы методом пластической деформации. В стандартах [1] и [2] употребляется термин «Метчик бесстружечный». Более поздний стандарт ГОСТ Р ИСО 5967-2013 [3], который соответствует международному стандарту ISO 5967, оперирует термином «Метчик бесканавочный для резьбовыдавливания». В справочнике [4] приведены термины «бесстружечный метчик» и «раскатник». А в справочнике [5] – термины «раскатник», «метчик-накатник», «бесстружечный метчик».

В качестве примеров терминов на английском языке можно привести: «forming tap», «extrusion tap», «roll tap» (по данным статьи [6]); «fluteless tap», «forming tap» [3]. В стандартах [1] и [2] в качестве англоязычного аналога указан «Non-shaving tap».

Цель исследования – проанализировать какими терминами на русском и английском языках обозначается инструмент в статьях и материалах конференций по теме получения внутренних резьб метчиками методом пластической деформации.

Материалы и методы исследования

Для анализа была сформирована подборка материалов по теме получения внутренних резьб метчиками методом пластической деформации. Подборка включает в себя только статьи и материалы конференций на русском или английском языках, опубликованные в отечественных или зарубежных научных изданиях за период с 1997 г. по 8.11.2025 г. Всего 87 публикаций.

Ограничения подборки заключаются в следующем:

- включены не все существующие публикации по теме получения внутренних резьб метчиками методом пластической деформации. Некоторые статьи и материалы конференций, в том числе опубликованные до 1997 года, на которые ссылались найденные источники, отсутствовали в результатах поиска в используемых поисковых сервисах;

- в подборке использовались источники, найденные только с помощью поисковых систем Google Scholar, Semantic Scholar, Elibrary.

Источником данных о применяемости терминов выбраны следующие метаданные публикаций: название публикации и аннотация. Раздел ключевые слова не анализировался, т.к. в полной мере не отражает различия в используемых терминах. При этом для публикаций на русском языке учитывались только заголовки и аннотации на русском языке. Это необходимо для того, чтобы чётко отделить статистику по русскоязычным и англоязычным источникам.

В окончательную статистику публикации отбирались по следующему критерию: термин, обозначающий метчик для получения резьбы методом пластической деформации, должен употребляться в заголовке или аннотации в

явном виде. Если в источнике использовалось несколько разных терминов, то каждый учитывался отдельно. Публикации о самом процессе получения резьбы методом пластического деформирования, где инструмент обозначался в общем виде как «метчик» или «tap» не рассматривались.

Результаты исследования и их обсуждение

Собранные данные были разделены на две группы: публикации на русском языке и на английском. Частота использования различных терминов в русскоязычных публикациях представлена на рисунке 1, частота использования терминов в англоязычных публикациях – на рисунке 2.



Рис. 1. Частота использования различных терминов в публикациях на русском языке



Рис. 2. Частота использования различных терминов в публикациях на английском языке

Из рисунка 1 следует, что в публикациях на русском языке термин «бесстружечный метчик» употребляется чаще всего. Однако термины «пластически деформирующий метчик», «деформирующий метчик», «раскатник» также активно применяются. Данный факт может свидетельствовать о том, что в разных научных коллективах могли быть приняты разные термины, обозначающие один и тот же объект.

В публикациях на английском языке, как показывает рисунок 2, характер использования терминов сильно отличается. Чаще всего используются термины «extrusion tap» и «forming tap», на которые приходится около 65% публикаций. Остальные 35% распределены между шестью терминами, четыре из которых являются видоизменённой формой термина «forming tap». Термин «fluteless tap» мало распространён. Такая картина может быть связана с тем, что в публикациях на английском языке в основном опираются на терминологию основополагающих научных работ или основных производителей резьбообрабатывающего инструмента.

Отдельно стоит отметить, что указанный в стандартах [1] и [2] термин «Non-shaving tap» в публикациях на английском языке не встречается. В связи с этим, при переводе научно-технической литературы данный термин имеет смыслы заменять на более употребляемые «extrusion tap» или «forming tap».

Выводы

Результаты исследования показывают, что в области получения внутренних резьб метчиками методом пластической деформации нет единого подхода к обозначению инструмента, как на русском языке, так и на английском.

Полученный перечень терминов может быть использован для более глубокого поиска источников с охватом публикаций на русском и английском языках. Это позволит лучше изучить существующий опыт различных научных коллективов. При этом важно не привязываться только к наиболее часто употребляемым терминам, а наоборот использовать весь набор в одном поисковом запросе. Так можно максимально использовать функционал поисковых сервисов и сократить время поиска.

Стоит заметить, что частота использования терминов ещё не говорит об их актуальности. На каком-то этапе общепринятым мог стать термин, который встречается в меньшем количестве публикаций. И за счёт того, что старый термин использовался дольше, то и встречался чаще. Поэтому в рамках дальнейшего изучения особенностей терминологии необходимо проследить какие именно термины преобладали на разных временных этапах и являются ли эти термины по-прежнему актуальными.

Также большое разнообразие терминов, особенно среди публикаций на русском языке, усложняет обмен информацией, а значит ещё одним предметом исследования мог бы стать именно поиск наиболее полного, правильного и ёмкого обозначения метчика для получения внутренней резьбы методом пластической деформации.

Список литературы

1. ГОСТ 18839-73 Метчики бесстружечные машинно-ручные. Конструкция и размеры. Введ. 01.07.1974. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 22 с.
2. ГОСТ 18844-73 Метчики бесстружечные. Технические требования. Введ. 01.07.1974. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 19 с.
3. ГОСТ Р ИСО 5967-2013 Метчики. Термины и определения. Введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 22 с.
4. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / Под редакцией С.А. Зайдеса. – Иркутск: ИРНИТУ, 2021. – 504 с.
5. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: в 2-х томах. Т.2 / Под редакцией А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2023. – 444 с.
6. What is Forming Taps? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hk-tools.com/news/what-is-forming-taps/>.

Сведения об авторах:

Тищенко Иван Владимирович – аспирант;

Харченко Александр Олегович – к.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация и технология машиностроения».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ ВЫГЛАЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Кудинов Е.А., Владимиров А.А., Скляр В.А., Шаповалов А.И.
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал),
Национальный исследовательский технологический институт «МИСИС»,
Старый Оскол

Ключевые слова: электроискровое легирование, поверхностное выглаживание, электродный материал, графитовая смазка, опорная площадь поверхности.

Аннотация. В исследовании объектом выступает процесс поверхностного выглаживания электроискрового покрытия на цилиндрическом образце из стали 30ХГСА. Целью работы является определение факторов и интервалов варьирования поверхностного пластического деформирования сформированной электроискровой поверхности для поиска функций отклика. допустимых диапазонов значений параметров процесса фрезерования при обработке эталонного образца. Определены постоянные режимы обработки, обеспечивающие одинаковые условия для исследования варьирования параметров выглаживания сформированных покрытий. Конечным результатом исследовательской работы является таблица плана-эксперимента с входными данными, контролируруемыми величинами и искомыми функциями отклика.

DETERMINATION OF EFFECTIVE MODES FOR SMOOTHING ELECTRIC SPARK COATINGS

Kudinov E.A., Vladimirov A.A., Sklyar V.A., Shapovalov A.I.
Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the
National University of Science and Technology "MISIS", Stary Oskol

Keywords: electric spark alloying, surface smoothing, electrode material, graphite lubricant, bearing surface area.

Abstract. The object of this study is the process of surface smoothing of an electrospark coating on a cylindrical specimen made of 30HGSА steel. The aim of the work is to determine the factors and ranges of variation in the surface plastic deformation of the formed electrospark surface to find response functions. The permissible ranges of milling process parameters during machining of the reference specimen are determined. Constant machining modes are defined, providing identical conditions for studying variations in the smoothing parameters of the formed coatings. The final result of the research is an experimental design table with input data, controlled values, and sought response functions.

Для современного прокатного производства, как и для других отраслей промышленности, характерно повышение производительности технологических машин. Это определяет использование новых материалов и сплавов с повышенными физико-механическими характеристиками.

Другим направлением повышения производительности является восстановление и упрочнение деталей, работающих в агрессивных средах или на непрерывных производствах, например, валы рольгангов или прокатных станов. Для таких деталей выгодными будут планово-предупредительные мероприятия по их ремонту и замене. Увеличение межремонтного периода за счет

формирования упрочненных поверхностных слоев также является перспективным направлением развития.

Одним из таких методов является электроискровое легирование, позволяющее создавать поверхностные слои с требуемыми химико-физическими свойствами. Одной из особенностей метода является локальный нагрев материала подложки, без деформирования основного объема материала детали [1].

Основной целью исследования является изучение процесса обкатывания сформированных электроискровых покрытий для определения поверхностной твердости, опорной площади и шероховатости такой поверхности.

Для деталей прокатного производства характерно использование сталей с повышенными физико-механическими свойствами. Такие материалы обеспечивают увеличенный срок службы деталей, взаимодействующих с прокатываемыми или транспортируемыми изделиями. Материалом подложки в исследовании выступает образец из стали 30ХГСА ГОСТ 4543-2016. Эта сталь часто встречается в качестве материала для рабочих элементов транспортных рольгангов. Поэтому для перспектив внедрения электроискрового легирования в технологические процессы изготовления или ремонта валков рольгангов будут рассматриваться процессы формирования упрочненного поверхностного слоя именно на этой стали.

Электродными материалами выступают твердые сплавы марок Т15К6 и ВК8. Применение этих материалов будет способствовать повышению износостойкости рабочих поверхностей роликов рольгангов. Для повышения эффективности процесса выглаживания сформированных покрытий будет применяться смазка в виде графитового электрода, который также будет нанесен на поверхность образцов с помощью электроискрового легирования [2, 3]. Применение графитовой смазки в процессе выглаживания поверхности, предположительно, может повысить относительную опорную длину профиля поверхности после обработки, так как графитовый электрод будет заполнять микронеровности на поверхности после электроискрового легирования твердым сплавом.

Формирование покрытий на поверхностях образцов будет осуществлять с помощью установки для электроискрового легирования ALIER-METAL G53. Режимы формирования покрытий во время проведения имели неизменные параметры: режим формирования покрытия напряжение $U = 20$ В, сила тока $I = 200$ А, мощность импульсного разряда $P = 4000$ Вт, длительность $\tau = 400$ мкс, энергия единичного импульсного разряда $E = 1,6$ Дж, частота $f = 160$ Гц, Суммарная энергия за 1 минуту обработки $\sum E = 15,4$ кДж×мин. Такие параметры позволят формировать электроискровые покрытия высокой сплошности, микротвердости и толщины.

Целью исследования является исследование влияния режимов обкатывания на опорную площадь и шероховатость поверхности. Факторами и интервалами варьирования являются глубина вдавливания шарика и количество проходов поверхностного пластического деформирования, представленные в таблице 1.

После проведения экспериментов по электроискровому легированию будут определены превалирующие факторы и функции отклика для дальнейшей корректировки режимов формирования покрытий.

Табл. 1. Факторы, уровни и интервалы варьирования

№	Факторы	Уровни			Интервал $\tilde{J}$
		-1	0	+1	
1	$\tilde{X}_1$ – глубина вдавливания шарика, мм	1	1,5	2	2
2	$\tilde{X}_2$ – количество проходов выглаживания, шт.	2	4	6	1

Проведение серии предварительных экспериментальных исследований является важным этапом перед внедрением технологии в промышленное производство. Эти эксперименты необходимы для изучения влияния ключевых факторов на качество формируемых покрытий и выявления оптимальных условий процесса.

По результатам испытаний будет проведен статистический анализ полученных данных, чтобы выявить наиболее значимые параметры, влияющие на формирование качественных покрытий. К таким факторам относятся напряжение разряда, длительность импульса, состав рабочей среды, материал электрода и расстояние между обрабатываемым изделием и источником питания.

Список литературы

1. Григорьев К.Н., Андреев Г.И. Анализ эффективности методов электроискрового легирования для повышения износостойкости деталей машин // Инженерия и технология. – 2023. – №1. – С. 78-85.
2. Петрова Н.А., Сидоров А.В. Электроискровое легирование в технологических процессах машиностроительного производства // Вестник технологического университета. – 2020. – №3. – С. 89-96.
3. Жулдыбин А.А., Владимиров А.А., Шаповалов А.И. Перспективы применения электроискрового легирования на рабочих поверхностях деталей тележек локомотивов // Транспортное машиностроение. – 2025. – №9(45). – С. 28-37. – DOI: 10.30987/2782-5957-2025-9-28-37.

Сведения об авторах:

Кудинов Егор Алексеевич – ассистент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта;

Владимиров Александр Андреевич – к.т.н., доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта;

Скляр Виталий Александрович – к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой

Шаповалов Антон Иванович – к.т.н., доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Новоточинов А.П., Кудинов Е.А., Владимиров А.А.

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»,
Старый Оскол*

Ключевые слова: обрабатываемость, механическая обработка, режимы резания, скорость резания, подача, глубина резания, шероховатость поверхности, износ.

Аннотация. Объектом исследования выступает процесс механической обработки наплавленных поверхностей при сравнении с эталонным образцом из стали 45. Целью работы является определение рациональных диапазонов значений режимов резания при фрезеровании. Определены рациональные режимы резания, при которых возможно обеспечить минимальный износ режущих пластин и формирование требуемой шероховатости поверхности. Конечным результатом исследований являются рекомендации по выбору режимов резания для фрезерования наплавленных поверхностей, полученных при плавлении порошковой проволокой, модифицированной тугоплавкими компонентами.

DETERMINATION OF CUTTING MODES WHEN MILLING DEPOSITED SURFACES

Novotochinov A.P., Kudinov E.A., Vladimirov A.A.

*Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the
National University of Science and Technology "MISIS", Sary Oskol*

Keywords: machinability, machining, cutting conditions, cutting speed, feed, cutting depth, surface roughness, wear.

Abstract. The study focuses on the machining of deposited surfaces compared to a reference sample made of grade 45 steel. The aim of the study is to determine optimal ranges for cutting conditions during milling. Optimal cutting conditions were identified that ensure minimal wear of cutting inserts and the desired surface roughness. The final result of the study is recommendations for selecting cutting conditions for milling deposited surfaces produced by melting with flux-cored wire modified with refractory components.

Введение

В современной промышленности предъявляются высокие требования к эксплуатационным характеристикам применяемых материалов, в следствие чего ухудшается их обрабатываемость резанием. Низкая обрабатываемость влечет за собой поиск рациональных режимов резания для повышения эффективности производства деталей из таких материалов.

В частности, в машиностроительной, металлургической и горнодобывающей промышленности все больше находят применение процессы восстановления и упрочнения с использованием материалов, повышающих эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей, работающих в агрессивных условиях и с высокими нагрузками. К таким материалам можно отнести наплавочные порошковые проволоки, модифицированные тугоплавкими компонентами. В данном случае это проволоки на основе нанодисперсного

порошка карбида вольфрама с добавлением различного количества дополнительных легирующих элементов. В практических экспериментах была проведена их обработка резанием [1].

Механическая обработка таких наплавочных материалов затруднена ввиду их повышенных физико-механических свойств. Для повышения эффективности механической обработки таких материалов, необходимо провести оценку их обрабатываемости, для определения показателей производительности процесса и качества шероховатости получаемой поверхности. Для оценки обрабатываемости этих материалов необходимо провести эксперименты по обработке резанием в сравнении с эталонным образцом. В качестве эталонного образца принимается сталь 45 ГОСТ 1050-2013. Для соблюдения чистоты эксперимента сечение эталонного образца было принято 25x25 мм.

Основная часть

Для проведения сравнительной оценки наплавленных образцов с эталоном определялись рациональные режимы обработки. Согласно стандартам и рекомендациям по режимам резания для обработки эталонного образца, а в дальнейшем и наплавленных поверхностей были выбраны следующие режимы резания: глубина $t = 0,5$ мм, минутная подача $S_m = 24$ мм/мин, частота вращения $n = 115-360$ об/мин, скорость $V = 18-60$ м/мин.

На эталонном образце были проведены пробные проходы с целью определения оптимального значения скорости резания, исходя из выходного параметра шероховатости поверхности после фрезерования. Неизменными параметрами процесса резания являлись минимальные значения глубины резания и подачи инструмента. Значение глубины резания позволило получить большее количество точек для анализа и точнее проследить процесс износа режущих пластин. Минимальное значение подачи инструмента снизило нагрузку на режущие пластины и позволило получать поверхности с лучшими значениями шероховатости.

Эксперименты производились со снятием слоев материала эталонного образца толщиной 0,5 мм. После каждого прохода инструмента производилась оценка режущих пластин и образцов путем взвешивания на лабораторных весах с точностью до 0,01 г. На обрабатываемой поверхности образца производилось измерение профилометром TR200 для определения среднего значения шероховатости поверхности по параметру Ra. Величина геометрического износа режущих пластин оценивалась по задней грани и по главной режущей кромке путем измерения электронным штангенциркулем [2].

Измеренные значения контролируемых параметров, соотнесенные с параметрами процесса обработки представлены в таблице 1.

Проанализировав полученные значения параметров шероховатости можно сформулировать следующие выводы о рациональном диапазоне скорости резания $V_p \approx 60$ м/мин.

Ближайшее значение частоты вращения шпинделя станка соответствует 360 об/мин, что обеспечит значение скорости резания $V_d = 56,6$ м/мин.

Наглядно зависимость выбранных режимов резания при фрезеровании представлена на графике (рис. 1).

Табл. 1. Численные значения режимов резания и параметров обработанных поверхностей

№	Глубина резания, t , мм	Подача режущего инструмента, S , мм/мин	Частота вращения шпинделя, n , об/мин	Скорость резания, V , м/мин	Масса образца, грамм	Масса пластин, грамм	Шероховатость поверхности, R_a , мкм
1	0,5	24	115	18,0	562,7	44,063	4,306
2					560,5	44,063	7,130
3					558,1	44,061	6,172
4					555,2	44,060	6,017
5					552,8	44,060	6,369
6			230	36,1	549,9	44,060	4,511
7					547,5	44,058	6,258
8					544,5	44,058	5,367
9					541,7	44,058	4,355
10					539,0	44,058	4,367
11					536,7	44,058	4,774
12					534,0	44,058	5,759
13			360	56,6	531,5	44,056	3,856
14					528,6	44,056	3,014
15					526,2	44,056	2,867
16					523,8	44,056	4,733
17					522,1	44,056	4,786
18					518,5	44,056	3,793
19					516,1	44,056	2,896

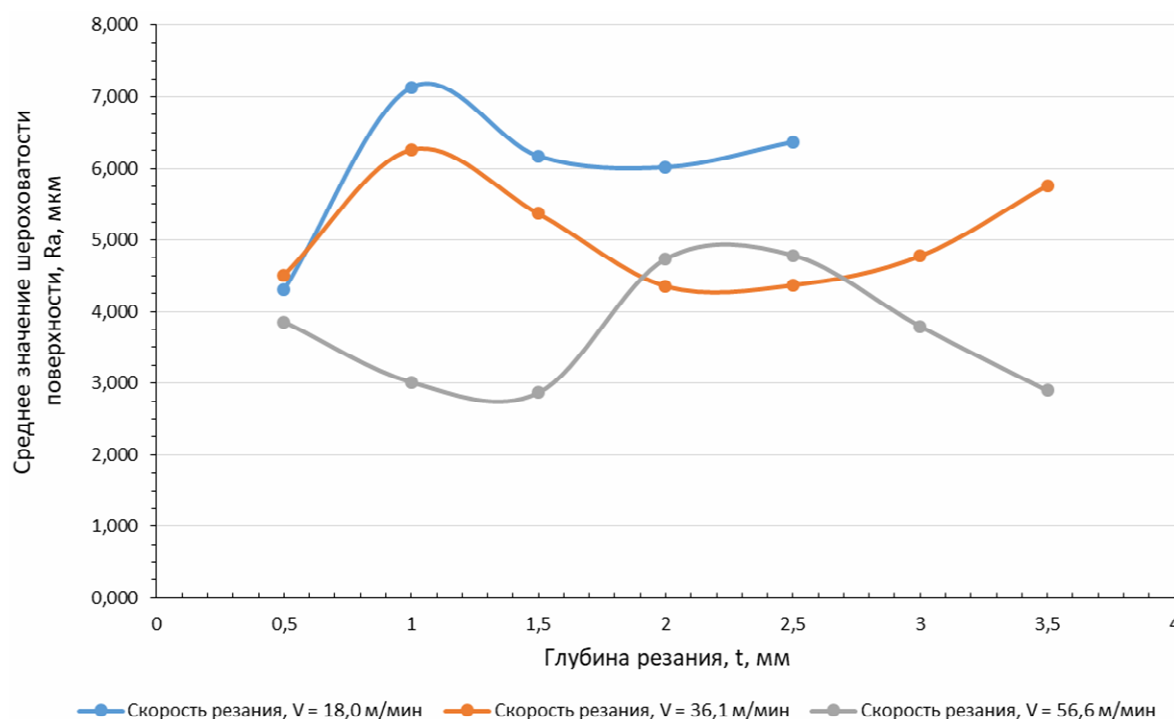


Рис. 1. Графики значений шероховатости поверхностей после обработки

После обработки эталонного образца с максимальными значениями скорости резания средняя арифметическая шероховатость обработанной поверхности составила 3,707 мкм.

Такое значение шероховатости сравнимо со стандартным значением получистового фрезерования – 3,2 мкм. Следовательно, назначение таких режимов резания обеспечат достижение требуемых параметров качества обработанной поверхности эталонного образца и будут постоянными для обработки всех наплавленных поверхностей с целью создания равных условий, по оценке производительности процесса резания и обрабатываемости исследуемых наплавленных поверхностей [3].

Итоги и выводы

После проведения практических экспериментов по подбору оптимальных режимов фрезерования на эталонном образце из стали 45 были определены значения режимов резания. Для создания равных условий все поверхности, наплавленные модифицированной порошковой проволокой, будут обрабатываться фрезерованием на выявленных режимах резания. Для контроля и оценки обрабатываемости будет выделена контрольная точка, когда износ по задней поверхности режущей кромки одной из пластин достигнет 1 мм. На основании количества снятого объема наплавленного материала, до достижения вышеуказанной величины износа, будут сделаны выводы об обрабатываемости и перспективах применения конкретного наплавочного материала для восстановления или упрочнения деталей.

Список литературы

1. Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В. Рациональный состав тугоплавких компонентов наплавочной проволоки обеспечения износостойкости рабочих поверхностей деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – №2. – С. 117-129. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129
2. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. – М.: Машиностроение, 2023. – 1574 с.
3. Мокрицкий Б.Я., Космынин А.В., Скрипилёв А.А., Сысоев О.Е. Обработка высокотвердых наплавок сборными торцовыми фрезами // Вестник машиностроения. – 2023. – №4. – С. 15-21.

Сведения об авторах:

Новоточинов Александр Петрович – ассистент кафедры физики и химии;

Кудинов Егор Алексеевич – ассистент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта;

Владимиров Александр Андреевич – к.т.н., доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6063

Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Бундин М.В., Парубок А.В., Лопатин В.В.
Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, бесслитковая прокатка-прессование, прутки, моделирование бесслитковой прокатки-прессования, вторичная переработка алюминиевых сплавов, энергосиловые параметры процесса.

Аннотация. В данной работе представлены результаты компьютерного и физического моделирования процесса совмещенной термодетформационной обработки методом бесслитковой прокатки-прессования для получения прутков из обрезки прессованных профилей сплава 6063. Полученные данные использовали при подготовке оборудования и проведении экспериментальных исследований по отработке технологии бесслитковой прокатки-прессования в лабораторных и опытно-промышленных условиях.

MODELING OF THE COMBINED THERMO-DEFORMATION PROCESSING PROCESS FOR THE PRODUCTION OF RODS FROM SECONDARY WASTE ALUMINUM ALLOY 6063

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Bundin M.V., Parubok A.V., Lopatin V.V.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: aluminum alloys, ingotless rolling-pressing, rods, modeling ingotless rolling-pressing, aluminum alloy recycling, energy power parameters.

Abstract. This paper presents the results of computer and physical modeling of the combined thermo-deformation processing process using the ingotless rolling-pressing method to produce rods from the scrap of pressed profiles of the 6063 alloy. The obtained data were used in the preparation of equipment and experimental studies to develop the ingotless rolling-pressing technology in laboratory and pilot-industrial conditions.

Повышенный интерес к переработке вторичного алюминия, в том числе для отраслей машиностроения, обусловлен высокими технико-экономическими показателями в структуре себестоимости продукции и возможностью реализации его в экологически более чистых вариантах. В прессовых цехах при изготовлении пресс-изделий из сплавов алюминия образуется до 20% вторичных отходов от общей массы перерабатываемого металла. При этом выход годного металла при традиционной схеме прессования изделий из алюминиевых сплавов не превышает 75%, так как имеется пресс-остаток и стружка при обработке слитков резанием, а одним из основных видов отходов является также обрезь, образующаяся при удалении захваток после правки растяжением. Затем эти отходы брикетируются и поступают на переработку при литье новых слитков. Часть металла при переплаве теряется безвозвратно, а трудоемкость производства продукции возрастает. Так как количество отходов достаточно велико, задача их использования с применением энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий становится актуальной.

Для переработки вторичных отходов в виде обрезей прессованных профилей предлагается использовать способ бесслитковой прокатки-прессования (БПП) [1], позволяющем проводить операции непрерывного литья и обработки давлением в одном деформирующем узле. Его преимуществами по сравнению с традиционными технологиями прессования является более высокая производительность и большой выход годного (до 90%) [2].

Для моделирования процесса в программном пакете QForm использовали конечно-элементный анализ при следующих граничных условиях. Деформируемый металл обладает свойствами пластической среды, а инструмент – абсолютно жесткий. Сетка конечных элементов выбрана тетрагональной (рис. 1, а) с количеством 170000. Принят закон трения по Зибелю. Начальная температура закристаллизованного металла, выбранная по результатам проведенных ранее расчетов [2], равнялась 520°C. Считали также, что валки и матрица подогреты равномерно, а валки в процессе деформации охлаждаются на 30°C. Теплообмен на контакте заготовки с инструментом задавался средствами программного пакета по результатам решения упрощенной тепловой задачи, при этом изменение температуры инструмента определялось только на контактирующей с заготовкой поверхности. Значения реологических свойств для сплава 6063 выбирали по справочным данным [3].

Анализ результатов моделирования показал, что температура в очаге деформации (рис. 1, б) изменяется следующим образом. При прокатке температура постепенно уменьшается за счет охлаждения на контакте с валками. Затем, на стадии распрессовки температура падает более резко, достигая значений 320°C. После начала прессования температура начинает постепенно увеличиваться, при этом наиболее интенсивно температура возрастает в центре заготовки. В местах контакта поверхностей валков и заготовки температура ниже за счет потери тепла, а в середине выше. При прессовании за счет деформационного разогрева при больших степенях деформации температура растет, а затем в местах контакта, постепенно выравнивается и достигает 320-330°C (в середине 410°C). Расчет энергосиловых параметров показал, что сила, действующая на валки, достигает 288 кН, а сила на матрице – 167 кН, общий крутящий момент составил 261 кНм.

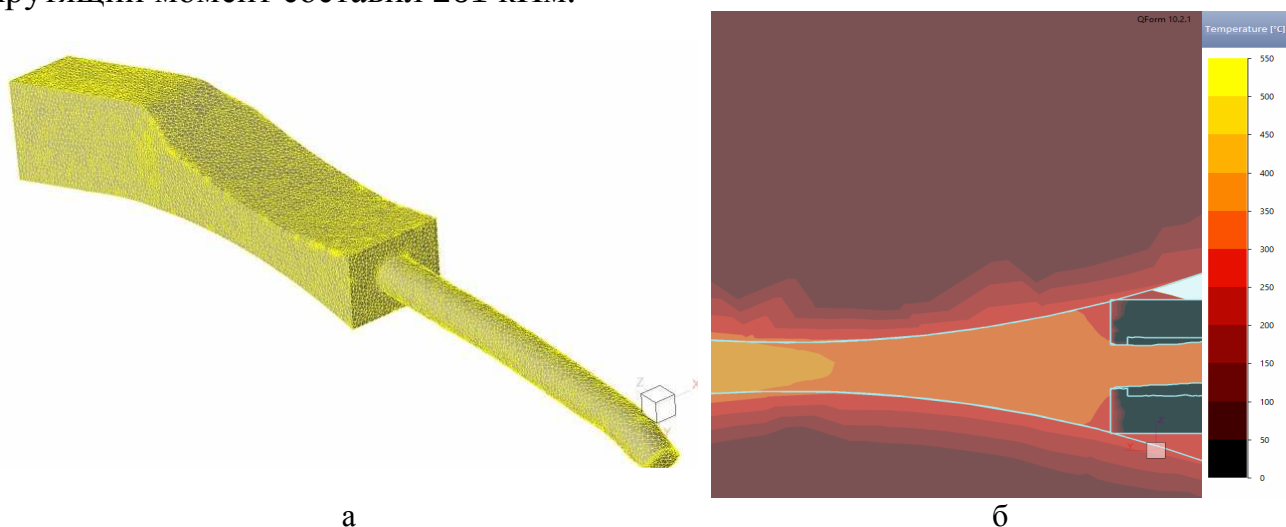


Рис. 1. Формоизменение металла при моделировании процесса совмещенной обработки с нанесенной сеткой (а) и результаты моделирования температуры металла в очаге деформации (б)

Для проверки результатов моделирования провели экспериментальные исследования на лабораторной и промышленной установках по получению прутков диаметром 9 мм из отходов сплава 6063 [4]. В соответствии с методикой проведения эксперимента готовили расплав при температуре 760°C и заливали его во вращающиеся валки. Закристаллизовавшаяся заготовка при температуре 520°C обжималась валками и после распрессовки выдавливалась в виде прутка круглого поперечного сечения через калибрующее отверстие матрицы диаметром 9 мм. Обжатие при прокатке составило 50%, а вытяжка при прессовании 9,7. Испытания на разрыв полученных прутков показали, что временное сопротивление составило 127 ± 2 МПа, что выше значений этого параметра по ГОСТ 21488-97 на 30%, а относительное удлинение равнялось 35%, что выше значений по действующему стандарту на 57%.

Таким образом, путем моделирования установлены оптимальные температурные и энергосиловые параметры процесса БПП для изготовления прутков диаметром 9 мм из вторичных отходов сплава 6063 при различных условиях термомеханической обработки. Экспериментальные исследования с использованием этих параметров для реализации процесса БПП позволили получить прутки из отходов сплава 6063 с повышенным уровнем прочностных и пластических свойств в рамках действующего стандарта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки в рамках гранта № 24-29-20136.

Список литературы

1. Патент №2847204 РФ. Способ бесслитковой прокатки-прессования прутков и устройство для его реализации / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И., Беляев С.В., Ворошилов Д.С., Беспалов В.Д. – Заявка №2024138405 от 19.12.2024, опубл. 30.09.2025, Бюл. №28.
2. Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Довженко Н.Н., Дроздова Т.Н., Беляев С.В., Баранов В.Н., Константинов И.Л., Беспалов В.М. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации-деформации и модифицировании алюминиевых сплавов: монография. – Красноярск: СФУ, 2015. – 180 с.
3. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
4. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Parubok A.V., Kuzin D.I., Galiev R.I., Voroshilov D.S., Lezhnev S.N., Konstantinov I.L., Durnopyanov A.V., Lopatin V.A., Belokonova I.N. Investigation of various process attributes in an ingotless rolling-extrusion process imposed on waste aluminum alloy rods // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 135, pp. 4309-4322.

Сведения об авторах:

Сидельников Сергей Борисович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Обработка металлов давлением»;

Лопатина Екатерина Сергеевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Металловедение и термическая обработка металлов»;

Бундин Михаил Васильевич – аспирант;

Парубок Андрей Васильевич – аспирант;

Лопатин Вячеслав Владимирович – студент.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ ПОСЛЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Синюков М.С.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, численное моделирование, ANSYS Fluent, тепловая эффективность, коэффициент теплоотдачи, оребренная труба.

Аннотация. Рассмотрен вопрос повышения тепловой эффективности оребренных труб аппаратов воздушного охлаждения. Методом численного моделирования в ANSYS Fluent исследовано влияние улучшения качества поверхностей, достигаемого при магнитно-абразивной обработке, на теплообмен. Показано, что интенсификация теплоотдачи приводит к снижению рабочей температуры конструкции на 5-7°C и формированию более равномерного температурного поля. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения магнитно-абразивной обработки для модернизации теплообменного оборудования.

NUMERICAL SIMULATION OF THE THERMAL EFFICIENCY OF FINNED PIPES AFTER MAGNETIC-ABRASIVE TREATMENT

Sinyukov M.S.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: magnetic abrasive treatment, numerical simulation, ANSYS Fluent, thermal efficiency, heat transfer coefficient, finned pipe.

Abstract. The issue of increasing the thermal efficiency of finned pipes of air-cooling devices is considered. The effect of improved surface quality achieved by magnetic abrasive treatment on heat transfer has been studied using numerical modeling in ANSYS Fluent. It is shown that the intensification of heat transfer leads to a decrease in the operating temperature of the structure by 5-7°C and the formation of a more uniform temperature field. The results obtained demonstrate the prospects of using magnetic abrasive treatment for the modernization of heat exchange equipment.

Применение метода численного моделирования для оценки влияния качества поверхностей на тепловую эффективность оребренных труб является перспективным для машиностроительной отрасли. Данный метод интересен тем, что позволяет оценить эффект от технологических операций, таких как магнитно-абразивная обработка, без проведения дорогостоящих натурных экспериментов, и является целесообразным с точки зрения оптимизации конструкции теплообменных аппаратов.

На заключительной стадии проектирования теплообменных аппаратов воздушного охлаждения целесообразно проводить оценку влияния обработки ответственных поверхностей на теплоаэродинамические характеристики. Магнитно-абразивная обработка (рис. 1) позволяет снизить шероховатость поверхности, удалить оксидные пленки и дефектный слой, что в конечном итоге способствует интенсификации теплообмена и повышению надежности паяных соединений.



Рис. 1. Магнитно-абразивная обработка оребрения

Сущность проведенного исследования заключается в том, что методом численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent была решена осесимметричная стационарная задача теплообмена для биметаллической оребренной трубы. Моделирование позволило провести анализ физических процессов и оценить эффект от улучшения качества поверхностей [1, 2].

Данный метод моделирования позволяет анализировать тепловые процессы в конструкциях сложной геометрии: оребренных трубах круглого и плоскоовального сечения, пластинчато-ребристых теплообменниках и других высокоэффективных поверхностях теплообмена [3].

Численное моделирование стационарного теплообмена характеризуется высокой сложностью процесса, необходимостью учета теплофизических свойств материалов, граничных условий и многочисленными факторами, влияющими на окончательный результат [4].

К указанным факторам относятся параметры расчетной сетки (размер и тип элементов, количество слоев в пристеночной области), параметры модели турбулентности, свойства материалов заготовки (теплопроводность, теплоемкость) и граничные условия (коэффициенты теплоотдачи на межфазных границах, температура теплоносителя).

При моделировании рассматривались два варианта конфигурации, отличающиеся значениями коэффициентов теплоотдачи на границах «Сталь – Воздух» и «Алюминий – Воздух». Варьирование коэффициентов теплоотдачи позволяет имитировать эффект от повышения качества поверхности после механической обработки.

Проведенное численное исследование наглядно демонстрирует, что магнитно-абразивная обработка является не только методом улучшения поверхностных свойств и подготовки к пайке, но и мощным инструментом интенсификации теплообмена. Снижение рабочей температуры конструкции на 5-7°C, выявленное в результате моделирования (рис. 2), напрямую свидетельствует о повышении энергоэффективности теплообменного аппарата в целом.

C: Steady-State Thermal
 Temperature
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1 s
 Max: 119,85
 Min: 111,14
 06.10.2025 15:59

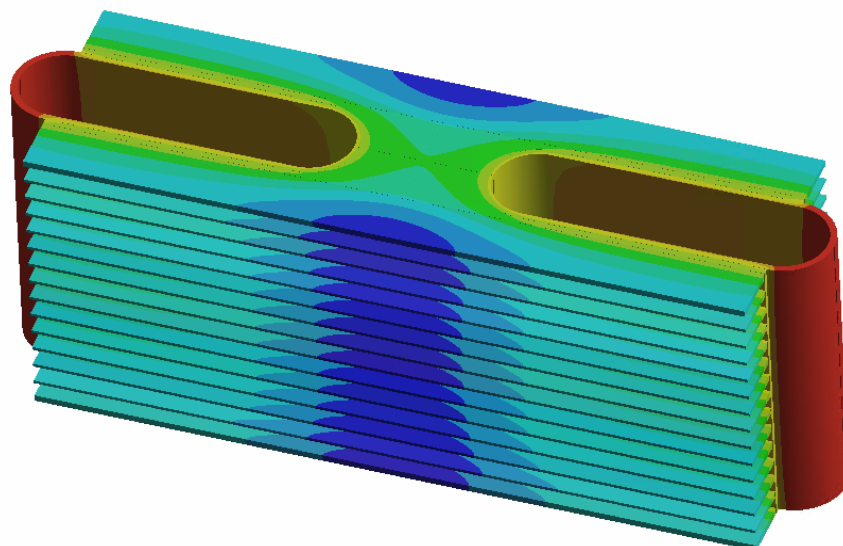


Рис. 2. Распределение температуры по Варианту 1

Полученные результаты позволяют рекомендовать включение операций магнитно-абразивной обработки в технологический процесс изготовления ответственных теплообменных элементов, таких как оребренные трубы аппаратов воздушного охлаждения. Это обеспечит не только повышение надежности паяных соединений за счет удаления оксидных пленок, но и значительный рост тепловой производительности оборудования.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Максarov Вячеслав Викторович.

Список литературы

1. Chawla G., Kumar V., Kumar, A. Investigation and Optimization of Parameters in Micro-Finishing of Hybrid Al/SiC/B4C MMCs by Novel MAFM Process through RSM // Silicon. 2021, vol. 14, pp. 1191-1208. doi.org/10.1007/s12633-020-00838-y.
2. Chawla, Gagandeep & Kumar, Vinod & Sharma, Rishi. Neural Simulation of Surface Generated During Magnetic Abrasive Flow Machining of Hybrid Al/SiC/B4C-MMCs // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. 2021, vol. 7, p. 153. doi.org/10.1007/s40735-021-00587-4.
3. Jiang L., Zhang G., Du J., Zhu P., Cui T., & Cui, Y. Processing performance of Al₂O₃/Fe-based composite spherical magnetic abrasive particles // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021, vol. 528, p. 167811. doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167811.
4. Tang J., Wang R., Liu B., Kang Y. A novel magnetic flux leakage method based on the ferromagnetic lift-off layer with through groove // Sensors and Actuators: A. Physical. 2021, vol. 332, p. 113091. doi.org/10.1016/j.sna.2021.113091.

Сведения об авторе:

Синюков Михаил Сергеевич – аспирант.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Сорокопуд Н.И., Филипенко И.А., Овсянников Д.А.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, подбор режимных параметров обработки, абразивный порошок, магнитная индукция, алюминиевые сплавы.

Аннотация. Итоговое качество поверхности после магнитно-абразивной обработки зависит от комплекса факторов технологической системы, формирующей магнитно-абразивный инструмент. Величина магнитной индукции, формирующая давление обработки в рамках данного метода, материал и фракция абразивного порошка, химический состав смазочно-охлаждающей жидкости оказывают существенное влияние на показатели качества поверхностного слоя обрабатываемого изделия. В случае с мягкими цветными материалами, например, алюминиевым сплавом АМц, для обеспечения требуемого качества поверхности необходим точный подбор всех основных параметров технологической системы. Таким образом целью настоящей работы является определение наиболее подходящих значений основных характеристик технологического инструмента для магнитно-абразивной обработки алюминиевого сплава АМц.

TECHNOLOGICAL TOOL FOR MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF FLAT PRODUCTS MADE OF ALUMINUM ALLOY

Sorokopud N.I., Filipenko I.A., Ovsyannikov D.A.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: magnetic abrasive machining, selection of machining parameters, abrasive powder, magnetic induction, aluminum alloys.

Abstract. The final surface quality after magnetic-abrasive processing depends on a complex of factors of the technological system that forms the magnetic-abrasive tool. The magnitude of the magnetic induction, which determines the processing pressure within this method, the material and grain size of the abrasive powder, and the chemical composition of the lubricant-cooling fluid significantly influence the quality indicators of the surface layer of the processed workpiece. In the case of soft non-ferrous materials, such as the aluminum alloy Al 3003, precise selection of all primary parameters of the technological system is required to ensure the desired surface quality. Thus, the objective of the present study is to determine the most suitable values of the main characteristics of the technological tool for magnetic-abrasive processing of the aluminum alloy Al 3003.

Метод магнитно-абразивной обработки относят к одним из передовых методов финишной обработки. Обработка щёткой из магнитного порошка позволяет добиться низкой шероховатости при удалении дефектов поверхности, оставшихся на оной от предыдущих методов лезвийной обработки или обработки абразивным кругом. Влияние на итоговое качество поверхности оказывают все составляющие технологической системы, образующей магнитно-абразивную обработку, к которым, помимо более традиционных позиций кинематики относительных движений заготовки и инструмента, и сочетания их материалов, в случае с магнитно-абразивной обработкой относят также характерные только для

этого метода величину магнитной индукции катушек индуктивности, формирующую топологию распределения магнитного поля в поверхностном слое заготовки, порошке и рабочем зазоре. Кинематика движений так же приобретает дополнительную значимость, поскольку благодаря ей будет обеспечиваться движение абразивных зёрен внутри абразивной массы и их переориентация. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости также заметно, поскольку её применение может обеспечить чистоту поверхности, а также химическое взаимодействие с подвергаемой обработке поверхностью. В случае с обработкой мягких материалов, таких, как, например, алюминиевый сплав АМц, чувствительных с точки зрения итогового качества поверхности к изменениям режимных параметров, необходим точный подбор их значений [1].

Как было сказано ранее, магнитная индукция характеризует топологию распределения магнитного поля в зоне обработки, и таким образом непосредственно формирует некоторые параметры абразивного инструмента прямым на него воздействием. Жёсткость порошка, как гибкого инструмента, можно охарактеризовать как степень его сопротивления изменению естественной, принимаемой по линиям магнитного поля, форме. Значение параметра магнитной индукции позволяет количественно определить степень воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность. При увеличении значения повышается сила воздействия на обрабатываемую поверхность каждого отдельного зерна абразивной массы [2]. При излишне высоком значении данного параметра абразивные зёрна при обработке внедряются в обрабатываемую поверхность слишком глубоко, в результате чего вместо примерно равномерного снятия материала заготовки, или скруглении вершин шероховатой поверхности в случае с безразмерной обработкой, происходит царапание поверхности, создание дефектов и общее понижение качества обработки. При этом известна прямая пропорциональность значения магнитной индукции и степени результирующего воздействия магнитно-абразивной массы на обрабатываемую поверхность [3].

Справедливо заметить, что более глубокое внедрение зёрен абразивной массы способствует увеличению количества материала, снимаемого в процессе обработки, а значит, и уменьшению количества исходных дефектов поверхности. Однако стоит отметить, что при финишной обработке большое удаление материала не является первостепенной задачей; возможность повышения толщины снятия поверхностного слоя заготовки должна коррелировать с необходимым обеспечиваемым уровнем шероховатости поверхности. Тем не менее этот факт также необходимо учитывать, поскольку обработка заготовок, выполненных из мягких материалов, таких как алюминиевый сплав АМц, сопряжена с более высокими рисками появления царапин, в сравнении, например, со стальными заготовками, во избежание которых в том числе необходимо точно определить режимные параметры обработки. Для определения наиболее подходящего значения магнитной индукции был проведён эксперимент. Режимные параметры, кроме магнитной индукции, принимались за константу и оставались неизменными в процессе обработки, поэтому в данной работе они не были представлены. Магнитная индукция B , Тл менялась в диапазоне от 0,4 до 1,0 Тл; результат формировался на основании оптического контроля заготовок до и после обработки.

Как было сказано ранее, излишне высокое значение магнитной индукции может привести к ухудшению качества обрабатываемой поверхности, что было отражено в опытах со значениями индукции 0,9-1,0 Тл (рис. 1, а). При этом при излишне низком воздействии абразивной массы на обрабатываемую поверхность существует риск отсутствия обработки ввиду слабого взаимодействия заготовки и инструмента, что отражено в опыте со значением индукции 0,4 Тл (рис. 1, б). Таким образом для текущих условий магнитно-абразивной обработки алюминиевого сплава наиболее подходящими принимается диапазон от 0,5 до 0,8 Тл.

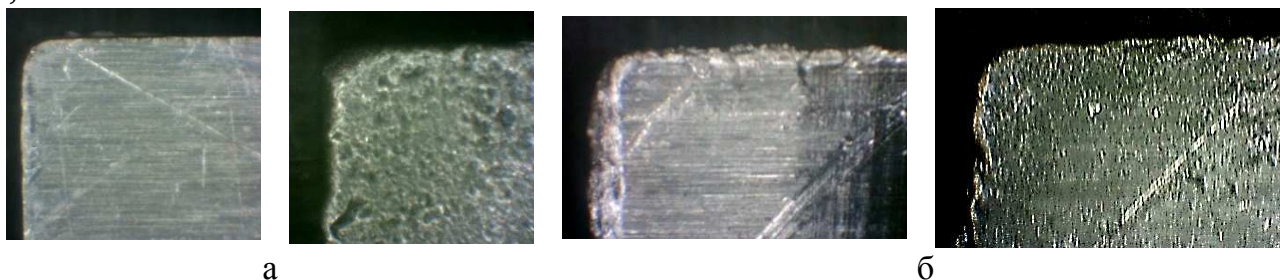


Рис. 1. а – поверхность заготовки до и после магнитно-абразивной обработки со значением магнитной индукции 1,0 Тл; б – поверхность заготовки до и после магнитно-абразивной обработки со значением магнитной индукции 0,4 Тл

Подбор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) также является важным этапом, особенно при финишной абразивной обработке. Активные составляющие СОЖ взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью и частично нарушают его структуру, тем самым упрощая процесс разрушения и пластического деформирования непосредственно инструментом [4]. В случае с мягкими и вязкими материалами особую важность при подборе СОЖ имеет её возможность предотвращать шаржирование поверхности изделия частицами абразивного порошка. Поскольку при магнитно-абразивной обработке при подборе тех или иных параметров необходимо учитывать все характеристики технологической системы, наиболее достоверным способом подбора является проведение эксперимента. Выбор СОЖ так же осуществлялся по результатам нескольких опытов. К сравнению были представлены СОЖ на эмульсионной основе марок Унизор ТУ 0253-001-1764563-2016 и ECOCOOL GLOBAL 10 UK, и 4 вида синтетических СОЖ, составы которых представлены в таблице 1. Результаты экспериментов показали предпочтительность СОЖ на эмульсионной основе.

Одним из наиболее важных параметров магнитно-абразивной обработки является материал абразивного порошка и его фракция. Крупность зёрен порошка и характер его взаимодействия с материалом заготовки определяет и характер обработки: черновой или финишный. Важной составляющей является твёрдость зёрен абразивного порошка, которая должна быть достаточна для снятия материала с поверхности заготовки. Так, например, обработка чугуна однородным стальным порошком будет нецелесообразна, так как не будет обеспечиваться достаточная режущая способность в ходе обработки [5]. Более рационально в данном случае будет применение композитного порошка, в котором ферромагнитные зёрна спекаются с абразивными частицами с более высокими режущими свойствами.

Табл. 1. Химический состав синтетических СОЖ, выбранных к сравнению в эксперименте

Синтетические жидкости			
Тринатрифосфат 1%	Тринатрифосфат 1%	Моноэтаноламин 1,5%	Моноэтаноламин 0,5%
Нитрит натрия 1%	Бензойная кислота 1-2%	Нитрит натрия 1%	Нитрит натрия 2%
ПЭГ-400 0,5%	ПЭГ-400 1%	ПЭГ-400 1%	ПЭГ-400 – 1%
ОП-10 0,1-0,2%	Изопропанол 5%	Изопропанол 5%	ОП-10 0,2%

Высокая стоимость композитных порошков ограничивает их использование, и в случае, например, цветных металлов предпочтительными являются порошки однородные. Связано это в том числе с низкой твёрдостью сплавов на основе алюминия, а также более равномерным распределением тепла по обрабатываемой поверхности, что важно контролировать во избежание прижогов. Для обеспечения низкой шероховатости поверхности предпочтительнее использовать порошок с округлыми зёрнами, которые выстраиваются в более плотную структуру под воздействием магнитного поля, при этом обеспечивая более активную миграцию зёрен в абразивной массе, в результате чего в контакте с заготовкой с течением времени оказывается большее количество абразивных зёрен.

Для обработки алюминиевого сплава АМц был выбран однородный абразив ПР10Р6М5, с твёрдостью по Бринеллю более чем в 6 раз превышающую твёрдость сплава. Размер же фракции, как и в случае с маркой СОЖ и значениями магнитной индукции определялся экспериментальным путём для конкретных текущих условий обработки. По результатам экспериментов из вариантов фракций $\Delta > 315$; 315-250; 250-160; 160-60; < 60 мкм в качестве предпочтительной была определена фракция $\Delta = 250-160$ мкм.

В результате проведённых исследований были определены режимные параметры для магнитно-абразивной изделий из алюминиевого сплава АМц, наиболее подходящие для конкретных условий выполнения операции финишной обработки. В качестве режимных параметров технологической системы были отобраны параметры магнитной индукции, фракции порошка и типа смазочно-охлаждающей жидкости, которые являются основными для рассматриваемого метода. Для предполагаемых условий обработки был определён диапазон магнитной индукции $B = 0,5-0,8$ Тл; смазочная жидкость СОЖ на эмульсионной основе марок Унизор ТУ 0253-001-1764563-2016 или ECOCOOL GLOBAL 10 UK, и фракция порошка ПР10Р6М5 $\Delta = 250-160$ мкм.

Список литературы

1. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
2. Сакулевич Ф.Ю., Кожуро Л.М. Объемная магнитно-абразивная обработка. – Минск: Наука и техника, 1978. – 168 с.
3. Бабич В.Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Минск: ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси, 2009. – 158 с.

4. Milan A. A study of the properties of electrical insulation oils and of the components of natural oils // Acta Polytech. 2012, no. 52(5), pp. 100-106.
5. Филипенко И.А. Совершенствование технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных изделий // Сборник тезисов Международного семинара «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019», Секция «Круглый стол молодых ученых». – СПб.: Горный университет, 2019. – С. 587-590.

Сведения об авторах:

Сорокопуд Никита Игоревич – аспирант;

Филипенко Ирина Анатольевна – к.т.н., ассистент кафедры машиностроения;

Овсяников Дмитрий Алексеевич – студент.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Ефимова М.В.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: финишная обработка, магнитно-абразивное полирование, алюминиевые сплавы, качество поверхности, шероховатость поверхности.

Аннотация. Проведено исследование влияния магнитно-абразивного полирования на качество обрабатываемых поверхностей из алюминиевых сплавов. Комплексное улучшение характеристик поверхностного слоя приводит к повышению усталостной прочности, износостойкости и коррозионной стойкости обработанных деталей. Показана высокая эффективность магнитно-абразивного полирования для обработки сложнопрофильных поверхностей алюминиевых сплавов в авиационной и других передовых отраслях промышленности.

THE EFFECT OF MAGNETIC ABRASIVE POLISHING ON THE QUALITY OF PROCESSED SURFACES OF ALUMINUM ALLOYS

Efimova M.V.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: finishing, magnetic-abrasive polishing, aluminum alloys, surface quality, surface roughness.

Abstract. A study was conducted on the effect of magnetic abrasive polishing on the quality of processed surfaces of aluminum alloys. The comprehensive improvement of the surface layer characteristics leads to increased fatigue strength, wear resistance, and corrosion resistance of the processed parts. The high efficiency of magnetic abrasive polishing for processing complex-profile surfaces of aluminum alloys in the aerospace and other advanced industries has been demonstrated.

Магнитно-абразивное полирование (МАП) является не просто методом финишной обработки, а высокотехнологичным процессом целенаправленного формирования качественных характеристик поверхностного слоя. Оно обеспечивает комплексное улучшение свойств: от геометрических (шероховатость, форма) до физико-механических (остаточные напряжения, износостойкость), что делает его незаменимым для производства ответственных деталей в авиакосмической, медицинской, инструментальной и других передовых отраслях промышленности [1].

Влияние МАП на качество поверхности является комплексным и проявляется в следующих ключевых аспектах.

1. Снижение шероховатости.

Абразивные зерна, удерживаемые магнитным полем в виде гибкого инструмента (магнитно-абразивной щетки), совершают сложное движение, срезая микронеровности без глубокого проникновения в материал. Тем самым МАП позволяет достигать значений шероховатости Ra 0,01-0,05 мкм и менее, что

соответствует 13-14 классам чистоты – уровню прецизионных и оптических поверхностей.

2. Повышение точности формы и сохранение геометрии.

Обработка происходит без значительного силового воздействия на обрабатываемую поверхность, что исключает ее деформацию, особенно для тонкостенных и сложных по конфигурации изделий. Также стоит отметить адаптивность инструмента, который точно повторяет контур поверхности и обеспечивает равномерное полирование как плоских, так и сложнопрофильных поверхностей [2].

3. Устранение дефектов поверхностного слоя.

МАП эффективно удаляет следы предыдущих механических обработок: риски, заусенцы, микротрещины, а также деформированный и наклепанный слой, образовавшийся после шлифования или точения. Происходит сглаживание и скругление микроскопических выступов и кромок.

4. Формирование благоприятного напряженного состояния.

В отличие от абразивной обработки, часто оставляющей растягивающие остаточные напряжения, МАП может создавать в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения. Следствием является повышение усталостной прочности детали, так как сжимающие напряжения препятствуют зарождению и развитию усталостных трещин.

5. Модификация физико-механических свойств поверхностного слоя.

- Интенсивное пластическое деформирование приводит к упрочнению очень тонкого поверхностного слоя.
- Сглаженная поверхность с высоким классом чистоты и упрочненным слоем обладает повышенным сопротивлением износу.
- Отсутствие микроскопических дефектов (трещин, пор) и наличие сжимающих напряжений делает поверхность менее подверженной коррозии.

6. Функциональные свойства.

Улучшаются такие функциональные характеристики, как способность удерживать смазочную пленку, контактная жесткость в соединениях, адгезионные свойства (для покрытий).

На конечный результат качества при МАП влияют многие факторы, среди которых характеристики абразива (размер, форма и материал зерен), параметры магнитного поля (индукция, градиент), режимы обработки (скорость относительного движения, зазор между заготовкой и индуктором), а также свойства обрабатываемого материала [3].

Технологические преимущества для алюминиевых сплавов

Главное преимущество применения МАП для алюминиевых поверхностей заключается в минимальном повреждении материала, высокой технологичности процесса и обработке в условиях отсутствия высокотемпературного воздействия. Также благодаря использованию магнитного поля и специальной абразивной среды, исключается внедрение абразивных частиц в мягкий алюминиевый материал, что является частой проблемой при традиционной абразивной обработке [4].

На рисунке 1 приведено сравнение поверхности образца из алюминиевого сплава АМг при микроскопическом рассмотрении до и после МАП.

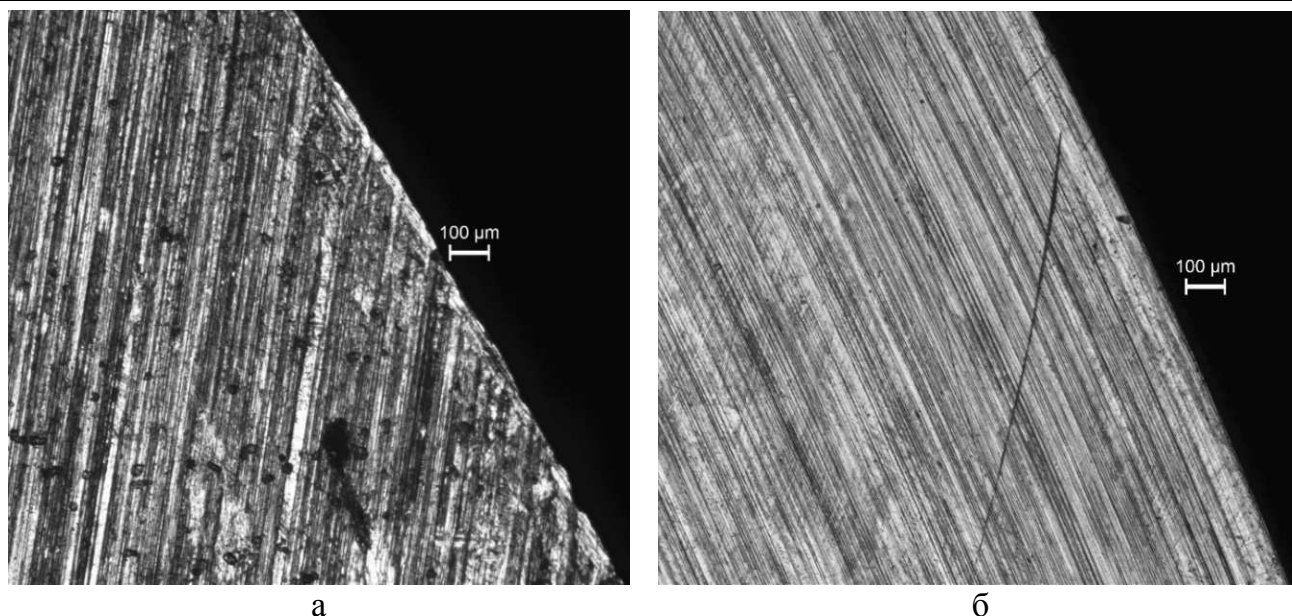


Рис. 1. Микроскопическое исследование образца, где а – поверхность до МАП; б – поверхность после МАП

На основании проведенных исследований даже при визуальном осмотре подтверждается устранение после МАП дефектов материала. Дальнейшие результаты профилографии доказывают снижение шероховатости в 3-5 раз. Таким образом, можно сделать вывод о достижении многофункционального улучшения качества поверхности – как по шероховатости, так и по микроструктуре и прочности. Использование зерен разного размера и регулировка магнитной индукции позволяют управлять глубиной и эффективностью обработки [5].

Список литературы

1. Максаров В.В., Ефимова М.В., Синюков М.С., Романов П.И. Перспективы применения магнитно-абразивной обработки сопрягаемых деталей летательных аппаратов // Металлообработка. – 2023. – №3(135). – С. 43-50. – DOI: 10.25960/mo.2023.3.43.
2. Максаров В.В., Максимов Д.Д., Синюков М.С. Особенности контроля качества сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов в процессе магнитно-абразивного воздействия // Цветные металлы. – 2023. – №4. – С. 96-102. – DOI: 10.17580/tsm.2023.04.13.
3. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий. – Минск: БНТУ, 2006. – 217 с.
4. Zou Y., Xie H., Zhang Y. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, vol. 109(7-8), pp. 1825-1839. DOI: 10.1007/s00170-020-05759-z.
5. Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Лебедев В.Я. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.

Сведения об авторе:

Ефимова Мария Владимировна – аспирант.

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ДРОБЯЩИХ АГРЕГАТОВ

Ефимов Д.А.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: валковые дробилки, абразивный износ, футеровочные бандажы, износостойкость, плазменное напыление, сегментированные конструкции, карбид вольфрама, нитрид титана.

Аннотация. В валковых дробящих агрегатах надёжность оборудования во многом определяется состоянием цилиндрических футеровочных бандажей, подверженных интенсивному абразивному износу. Абразивное изнашивание футеровочных бандажей валков протекает за счёт нескольких механизмов: режущего износа, пластической деформации (плужения), усталостного разрушения и, в определённых условиях, коррозионно-абразивного воздействия. Выявлено, что интенсивность износа неравномерна по поверхности вала и достигает максимума в центральной зоне под воздействием наибольшего контактного давления. По результатам анализа поверхности методами атомно-силовой микроскопии и профилометрии установлено, что после эксплуатации глубина впадин значительно увеличивается, а высота выступов уменьшается, что свидетельствует о существенном росте микрошероховатости. Для повышения износостойкости применены плазменные напыления твёрдых порошков карбида вольфрама (WC) и нитрида титана (TiN), формирующие тонкую твёрдую плёнку, что существенно снижает скорость развития борозд и микротрещин. Дополнительно предложено использование сегментированных конструкций футеровочных бандажей для выравнивания эпюры контактного давления и снижения деформационных напряжений в зонах максимального износа.

INVESTIGATION OF ABRASIVE WEAR OF CYLINDRICAL LINER BANDS OF ROLL CRUSHING UNITS AND APPROACHES TO ENHANCE THEIR WEAR RESISTANCE

Efimov D.A.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: roller crushers, abrasive wear, lining bands, wear resistance, plasma spraying, segmented structures, tungsten carbide, titanium nitride.

Abstract. In roller crushing units, the reliability of the equipment is largely determined by the condition of the cylindrical lining bandages, which are subject to intense abrasive wear. Abrasive wear of the roller lining bands occurs due to several mechanisms: cutting wear, plastic deformation (plowing), fatigue failure and, under certain conditions, corrosion and abrasive effects. It is revealed that the wear intensity is uneven over the roll surface and reaches its maximum in the central zone under the influence of the highest contact pressure. According to the results of surface analysis using atomic force microscopy and profilometry, it was found that after operation, the depth of the depressions increases significantly, and the height of the protrusions decreases, which indicates a significant increase in micro-roughness. Plasma spraying of solid powders of tungsten carbide (WC) and titanium nitride (TiN), forming a thin solid film, was used to increase wear resistance, which significantly reduces the rate of furrow and microcrack development. Additionally, the use of segmented structures of lining bandages is proposed to equalize the contact pressure diagram and reduce deformation stresses in areas of maximum wear.

Валковые дробящие агрегаты (валковые дробилки и пресс-мельницы) широко применяются для измельчения кусковых и сыпучих материалов в горнодобывающей, металлургической, химической, строительной и других отраслях промышленности. Надёжность и долговечность этих машин во многом определяются состоянием рабочих поверхностей валков – футеровочных бандажей. Однако интенсивный абразивный износ последних валков существенно снижает эффективность работы оборудования и сокращает срок службы узлов. Изнашивание футеровки происходит под воздействием высоких контактных напряжений и динамических ударных нагрузок в присутствии твёрдых абразивных частиц обрабатываемого материала. В результате износа валков снижается производительность дробилки, ухудшается качество продукта измельчения, возрастают простои и расходы на техническое обслуживание. Нестабильная работа дробилки вследствие износа негативно сказывается на последующих технологических процессах [1, 2].

Абразивное изнашивание футеровочных бандажей валков протекает за счёт нескольких механизмов: режущего износа, пластической деформации (плужения), усталостного разрушения и, в определённых условиях, коррозионно-абразивного воздействия. Острые твёрдые частицы (например, кварц) способны внедряться в поверхность и срезать микрочастицы материала (режущий износ), либо деформировать поверхность, оставляя борозды без удаления материала (плужение); накопление пластических деформаций в бороздах ведёт впоследствии к усталостному растрескиванию. Многократные циклы нагружения приводят к появлению и росту микротрещин (усталостный механизм). Кроме того, абразивы могут срывать защитные оксидные плёнки, ускоряя коррозионный износ поверхности [3, 4].

Интенсивность и скорость износа футеровки определяются совокупностью внутренних свойств материалов и внешних условий работы дробилки. Выявлено, что все влияющие факторы условно можно разделить на три группы.

1. Свойства абразива. Твёрдость, форма и размер абразивных частиц существенно влияют на износ. Более твёрдый и острый абразив вызывает больший объём удаления материала: частицы с острыми гранями режут эффективнее, крупный абразив сильнее давит на поверхность, ускоряя изнашивание.

2. Свойства материала футеровочных бандажей. Чем выше твёрдость и износостойкость материала бандаж, тем лучше он сопротивляется абразивному разрушению. Стали с твёрдыми карбидными включениями или композиционные материалы с упрочнённой микроструктурой (например, с выделениями карбидных или нитридных фаз) демонстрируют повышенную стойкость к истиранию. Специально легированные и термообработанные сплавы, образующие на поверхности прочные структуры (карбиды вольфрама, нитриды титана и др.), значительно замедляют развитие износа.

3. Режимы эксплуатации. Величина контактного давления, характер нагрузки и условия трения определяют неравномерность износа по ширине вала. Повышенные и особенно неравномерно распределённые нагрузки ускоряют образование пластических деформаций и усталостных трещин. Например,

перекос или несоосность валков приводит к концентрации нагрузки в отдельных зонах, усиливая местный износ. Скорость вращения валков и наличие ударных импульсов также вносят вклад: более высокие скорости и удары увеличивают динамическое воздействие абразива на поверхность [1].

Сравнение микроструктуры эталонной и изношенной поверхностей валков подтверждает существенный рост шероховатости после эксплуатации. На рисунке 1 показано сравнение эталонной и изношенной поверхности посредством атомно-силовой микроскопии (АСМ). На рисунке 1а поверхность гладкая, с технологическими следами обработки. На рисунке 1б представлена поверхность изношенного бандажа. В отличие от эталонного состояния зафиксированы многочисленные борозды, микротрещины и локальные впадины. Характер дефектов указывает на преобладание механизмов абразивного резания и плужения, сопровождающихся микропластической деформацией.

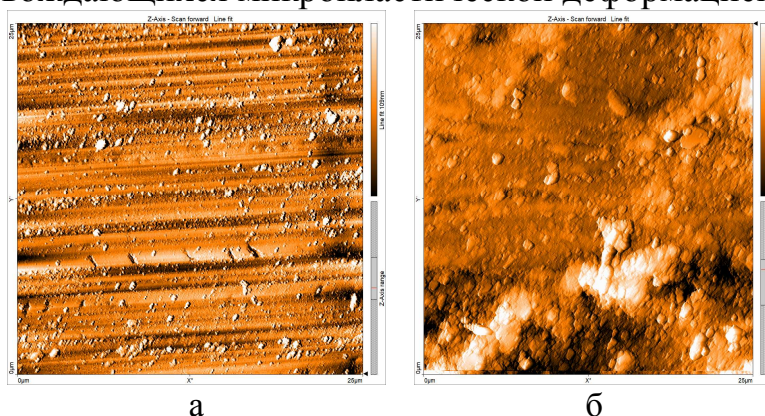


Рис. 1. Сравнение эталонной и изношенной поверхности методом АСМ:
а – эталонная поверхность, б – изношенная поверхность

На рисунке 2 приведены кривые Эббота-Файрстоуна показывающие распределение материала по высоте профиля поверхности. Эталонная кривая демонстрирует плавный профиль с умеренными пиками (рис 2, а). Кривая изношенной поверхности показывает увеличение глубины впадин и снижение высоты пиков (рис. 2, б). Последнее свидетельствует об увеличении шероховатости поверхности и глубины износа, что подтверждает наличие серьёзных структурных изменений геометрии поверхности бандажа на микроскопическом уровне.

Для снижения интенсивности износа и продления срока службы футеровок валков в работе предложен комплексный подход, сочетающий плазменное напыление высокотвердых порошковых материалов футеровки и оптимизацию конструкции бандажей.

Одним из эффективных решений является применение износостойких покрытий и материалов с повышенной твёрдостью поверхности. Экспериментально доказано, что нанесение твёрдых сплавов на рабочую поверхность валка способно существенно снизить абразивный износ. В исследовании рассматривается применение высокотвёрдых порошковых материалов, таких как карбид вольфрама (WC) и нитрид титана (TiN). Путём плазменного напыления на стальную основу футеровочного бандажа формируется тонкий слой материала с высокой твёрдостью и износостойкостью. Комплексное применение плазменных покрытий (или наплавов твёрдым

сплавом) на самых нагруженных участках вала позволяет значительно снизить скорость образования борозд и микротрещин [5,6].

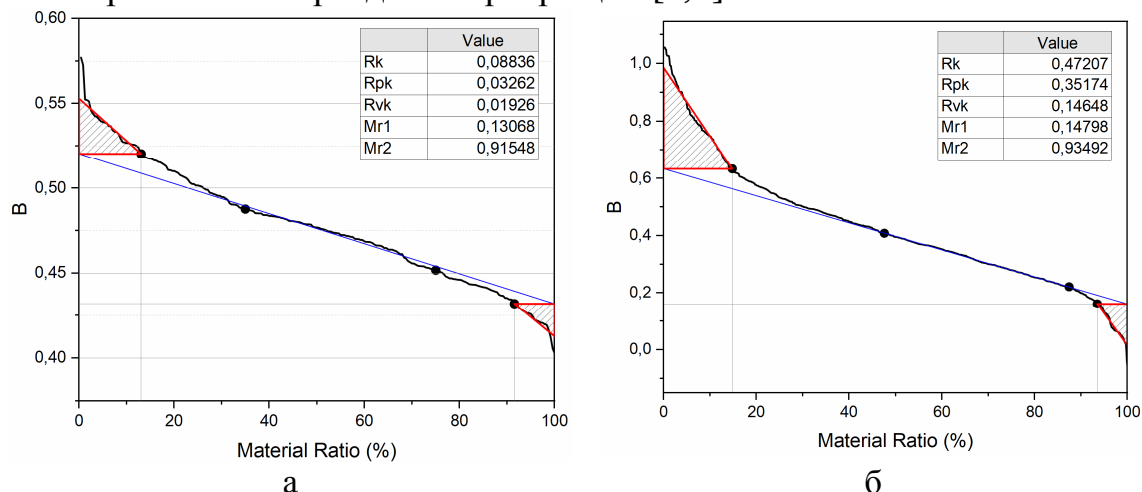


Рис. 2. Кривые Эббота-Файрстоуна: а – эталонная поверхность, б – изношенная поверхность

На основании исследования установлено, что износ футеровочных бандажей неравномерен по ширине и длине вала. Наиболее интенсивное разрушение происходит в центральных зонах рабочей поверхности, где концентрируются пиковые контактные напряжения от раздавливания материала. К краям вала давление и износ несколько снижаются. Такой характер износа приводит к бочкообразному профилю изношенного вала. Снижение скорости изнашивания в этих областях возможно за счёт оптимизации формы рабочих поверхностей и равномерного распределения нагрузки. Применение сегментированных футеровочных бандажей (рис. 3) способствуют распределению нагрузки: два диаметрально противоположных бандажа большей толщины обеспечивают повышенную прочность в зонах максимального контактного давления, бандажи меньшей толщины снижают общий вес конструкции и минимизируют локальные напряжения в менее нагруженных областях; повышение ремонтпригодности: сегментированная конструкция упрощает замену изношенных элементов без демонтажа всего вала, сокращая время простоя оборудования; снижение процесса абразивного изнашивания: равномерное распределение нагрузки между сегментами уменьшает риск локальных деформаций; так, если сегменты с большей толщиной изготовлены из износостойких материалов, то увеличивается ресурс в зонах интенсивного трения [7].

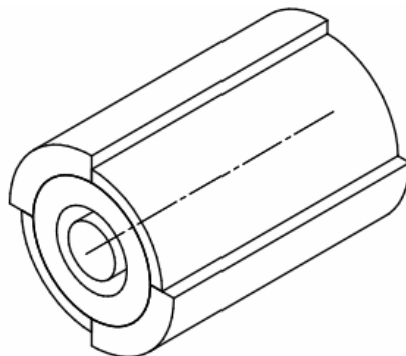


Рис. 3. Валок с сегментированным футеровочным бандажом

Выводы

На основании проведённого исследования установлено, что абразивный износ футеровочных бандажей валков носит выраженный неравномерный характер с наибольшей интенсивностью в центральной части рабочего цилиндра, что обусловлено концентрацией контактных напряжений. Морфологический анализ поверхности валков с использованием АСМ и кривых Эббота–Файрстоуна подтвердил рост микрошероховатости вследствие образования борозд, впадин и микротрещин, что сопровождается снижением эксплуатационных характеристик оборудования. Установлено, что нанесение твёрдых покрытий на основе карбида вольфрама и нитрида титана позволяет эффективно снижать скорость изнашивания за счёт формирования износостойкого поверхностного слоя. Дополнительно показано, что использование сегментированных конструкций футеровки способствует выравниванию эпюры контактного давления и снижению локальных напряжений, что в совокупности обеспечивает существенное увеличение ресурса валковых дробилок.

Список литературы

1. Шадрунова И.В. Адаптация валковой дробилки к переработке техногенного сырья // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – №3. – С. 175-191.
2. Кондрахин В.П., Конюхов В.Ю., Полякова А.С., Моисеева Е.Е., Бойко А.А. Расчет оптимальных параметров валковой дробилки для дробления породы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – №11-1. – С. 88-101. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_88.
3. Шишкин Е.В., Казаков С.В. Энергоэффективные устройства для дезинтеграции особо прочных материалов // Горный журнал. – 2021. – №11. – С. 53-59. – DOI: 10.17580/gzh.2021.11.07.
4. Власенко Д.А. Аналитический способ определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках с рифленной поверхностью бандажей // Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. – 2020. – №63. – С. 93-101.
5. Kengesbekov A.B., Rakhadilov B.K., Zhurerova L.G. Formation of TiN coatings by air plasma spraying // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. 2022, no. 4(108), pp. 22-31. DOI: 10.31489/2022PH4/22-31
6. Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. – 2022. – №10(116). – С. 100-115.
7. Патент №2831453 РФ. Валковый дробящий агрегат / А.П. Господариков, Д.А. Ефимов, В.Б. Кусков. – Заявка №2024129884 от 04.10.2024; опубл. 09.12.2024.

Сведения об авторе:

Ефимов Денис Александрович — аспирант.

РОБОТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЗАКАЛКИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОПРАВКЕ

Муравьев Д.В.

Омский государственный университет путей сообщения, Омск

Ключевые слова: роботизация, закалка, манипулятор, втулка, деформация, оправка, выталкиватель.

Аннотация. В статье представлено проектное решение роботизированной установки для закалки тонкостенных втулок на оправке в автоматическом режиме, с целью снижения термических деформаций при быстром охлаждении. Описаны конструкция и принцип действия, приведены кинематическая и гидравлическая схемы установки и устройство специального выталкивателя для съема детали с оправки после охлаждения. Изложен алгоритм работы автоматизированной системы установки.

ROBOTIC EQUIPMENT FOR TEMPERING THIN-WALLED PARTS ON A MANDREL

Muravyov D.V.

Omsk State University of Railway Engineering, Omsk

Keywords: robotization, hardening, manipulator, sleeve, deformation, mandrel, ejector.

Abstract. The article presents a design solution for a robotic installation for quenching thin-walled bushings on a mandrel in automatic mode, in order to reduce thermal deformations during rapid cooling. The design and operating principle are described, the kinematic and hydraulic installation schemes and the device of a special ejector for removing the part from the mandrel after cooling are given. The algorithm of the automated installation system is described.

Инновационные технологии настоящего и будущего, особенно в машиностроении, определяют направления систематичной модернизации технологических процессов производства и ремонта деталей машин для повышения качества и производительности, при максимальной эффективности [1]. Продление ресурса деталей, работающих в условиях трения, достигается повышением твердости материалов, которое возможно без изменения химического состава за счет термической или химико-термической обработки.

Детали машин в виде тонкостенных цилиндрических втулок применяются в автомобильных, авиационных и судовых агрегатах, а также в узлах железнодорожной техники, однако весьма чувствительны к термическим и структурным напряжениям при закалке, которые приводят к искажению их формы и размеров. С целью снижения степени коробления деталей при закалке предлагается концепция технологии индукционной закалки тонкостенных деталей, устанавливаемых предварительно на оправке с минимальным зазором, что позволит минимизировать деформации детали при быстром охлаждении.

Проблемы закалки тонкостенных деталей предложено решать путем комплексной автоматизации и роботизации технологического процесса, которая предусматривает автономность, бесперебойность и эффективность операций установки и снятия деталей, нагрева, выдержки и охлаждения [2].

Предлагаемое проектное решение роботизированной установки для закалки тонкостенных деталей на оправке приведено на рисунке 1 и представляет собой замкнутый гибкий производственный модуль, включающий манипулятор 1, механизм поворота оправки 2, захватное устройство 3, выталкиватель 4, насадку индуктора 5 с деталью 7, индуктор 6, гидроцилиндр 8, гидросистему 9 и бак 10 с охлаждающей жидкостью (рис. 1, а).

Деталь 4 под закалку, поступает на ленту конвейера 1, которая перемещает заготовку в рабочую область действия руки манипулятора 2 (рис. 1, б).

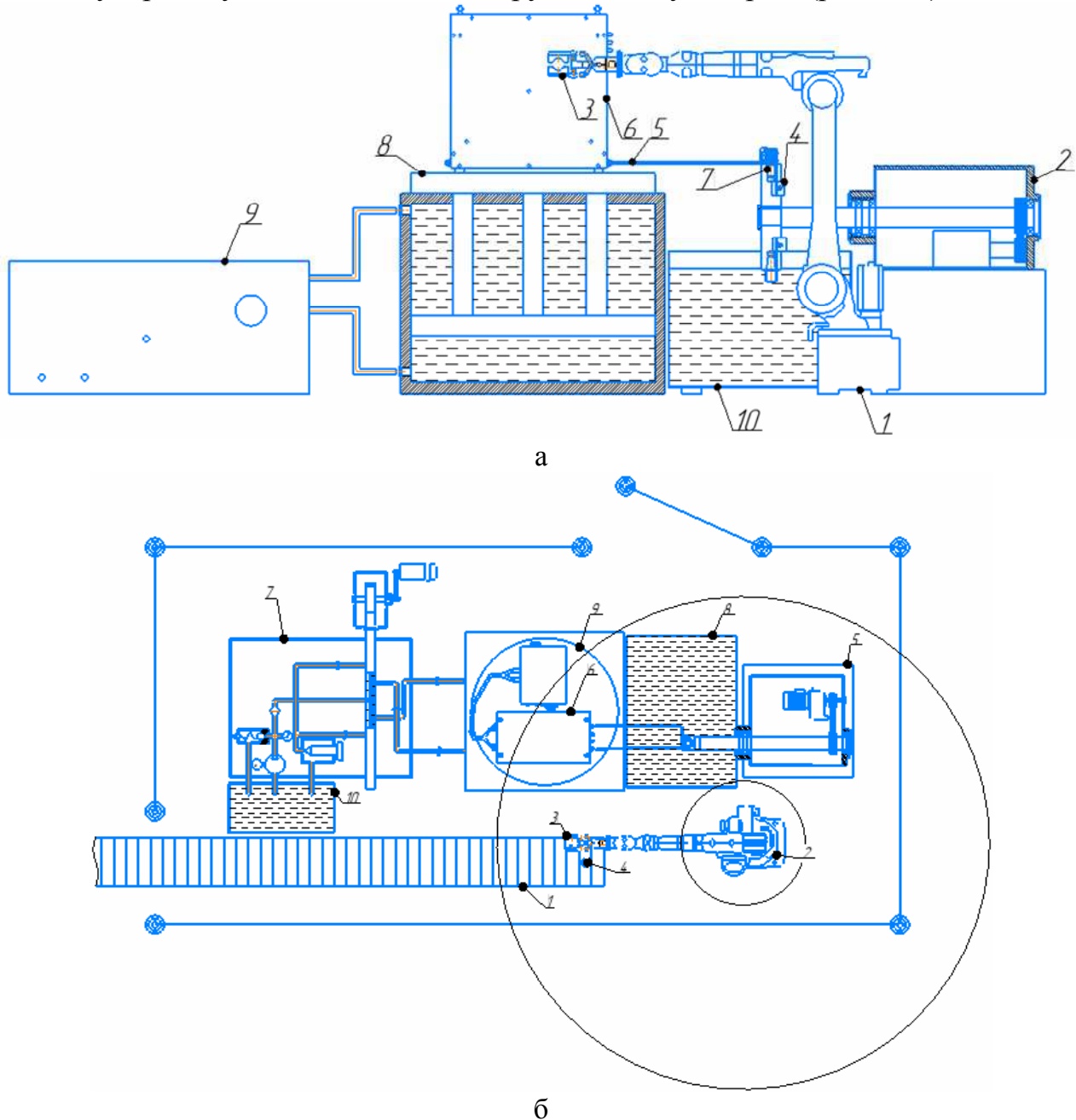


Рис. 1. Концептуальное решение роботизированной установки для закалки тонкостенных деталей на оправке: а – главный вид: 1 – манипулятор; 2 – механизм поворота; 3 – захватное устройство; 4 – выталкиватель; 5 – насадка индуктора; 6 – индуктор; 7 – втулка; 8 – гидроцилиндр; 9 – гидросистема; 10 – ванна охлаждения
б – вид сверху: 1 – конвейер; 2 – манипулятор; 3 – захватное устройство; 4 – втулка; 5 – механизм поворота; 6 – индуктор; 7 – гидравлическая система; 8 – ванна охлаждения; 9 – гидравлический поршень; 10 – бак с жидкостью

Правильное позиционирование заготовок на ленте конвейера отслеживается лазерным датчиком, луч которого замыкается на заготовке при достижении требуемого положения, и конвейер останавливается в нужном месте. В этот момент захватное устройство 3 манипулятора 2 зажимает заготовку 4 и устанавливает на оправку, закрепленную на валу механизма поворота 5 оправки. К заготовке подводится индуктор 6 и автоматически запускается процесс индукционного нагрева детали до температуры закалки, после чего оправка поворачивается на 180° при помощи механизма поворота 5 и деталь погружается в ванну охлаждения 8. Выталкиватель предназначен для облегчения снятия детали с оправки в случае усадки материала при охлаждении.

Контроль процесса закалки осуществляется встроенными системами автоматизации [3]. Завершение одного производственного цикла инициирует начало следующего при сохранении стабильных технологических параметров. После индукционного упрочнения втулка транспортируется на участок контроля для верификации механических свойств и дефектоскопии.

Упрощенная кинематическая схема механизма-выталкивателя приведена на рисунке 2. Вал 1 регулируемого сервопривода передает крутящий момент на диск 2 с закрепленным кривошипом 3, который шарнирно соединен с коромыслом 4. Один конец коромысла имеет жесткую шарнирную опору 5, а второй конец связан с ползуном 6, что позволяет коромыслу совершать угловые колебания в плоскости действия механизма и преобразовывать вращение диска в поступательное перемещение ползуна, действующего на плунжер 7 выталкивателя, который сдвигает деталь 8 с оправки 9.

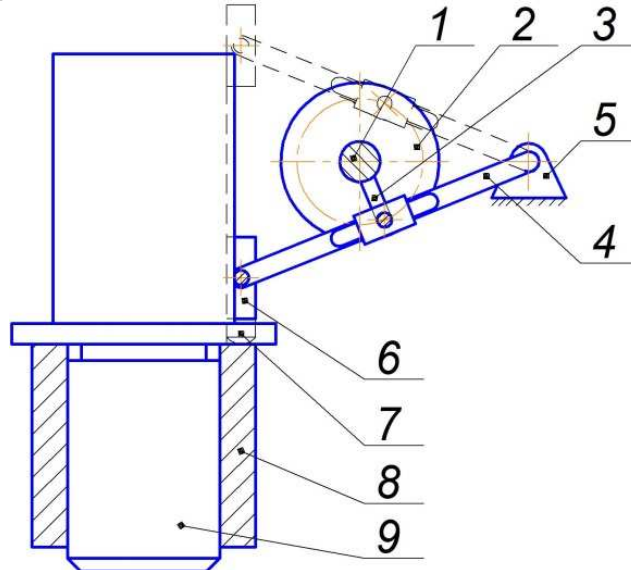


Рис. 2. Кинематическая схема механизма выталкивателя

Описание блок-схемы роботизированной закалочной установки, характеризующей логическое взаимодействие конвейера, манипулятора и гидравлической системы, представлено на рисунке 3.

1. Начало – инициируется выполнение программы.

2. Формирование этапа – указание числа деталей.

3. Режим энергосбережения – перевод системы в состояние минимального потребления энергии.

4. Верификация наличия детали на конвейере – если датчик не обнаруживает деталь на конвейере, система возвращается в режим энергосбережения, в противном случае поступает команда на запуск конвейера.

5. Активация конвейера – перемещение детали на конвейере в следующую позицию.

6. Движение конвейера – конвейер перемещает деталь между реперными точками.

7. Контроль включения лазера – перекрытие деталью лазерного луча датчика при движении по конвейеру, как факт точного позиционирования детали и команда к запуску следующей последовательности действий.

8. Остановка конвейера через 2 секунды – остановка конвейера после срабатывания лазерного датчика на детали.

9. Активация манипулятора – манипулятор переходит в режим ожидания управляющей команды.

10. Активация гидросистемы – гидросистема выходит из энергосбережения и ждёт следующую команду.

11. Поднятие поршня гидроцилиндра – поршень поднимает индуктор, освобождая место для установки детали на оправку при помощи манипулятора.

12. Команда манипулятору на установку детали на оправку – манипулятор захватывает деталь и устанавливает на оправку, после чего удаляется на безопасное расстояние и переходит в режим пониженного энергопотребления.

13. Опускание поршня гидроцилиндра – размещение индуктора в исходном положении с соблюдением требуемого воздушного зазора с деталью.

14. Включение индуктора – активация процесса индукционной закалки.

15. Поднятие поршня гидроцилиндра – снятие индуктора с детали.

15. Включение механизма поворота – запуск поворота оправки с деталью на 180° для погружения в охладитель и правильного ориентирования перед сбросом.

16. Опускание поршня гидроцилиндра – возврат индуктора в исходное положение и переход в режим энергосбережения.

17. Запуск выталкивателя детали с оправки – активация механизма для выгрузки или сброса закаленной детали в ванну охлаждения.

18. Окончание цикла обработки – система переходит в режим ожидания новой детали или возвращается к шагу i от 1 до 40 для нового цикла.

Составленная блок-схема представляет собой образец алгоритма управления автоматизированной системой, оснащенной датчиками и исполнительными механизмами, а в качестве программной среды использует кроссплатформенную среду разработки Arduino IDE на языках программирования C и C++, содержащую набор встроенных библиотек и инструментов компиляции, и отладки прошивок и обеспечивающую поддержку плат Arduino и совместимых микроконтроллеров [4].

Программный код платформы Arduino IDE содержит логические модули для подключения пинов сервоприводов, закрепления наименований и характеристик констант объектов для каждого пина сервопривода, назначения начального положения системы, задания основных функций и движений манипулятора, а также функции включения серводвигателя.

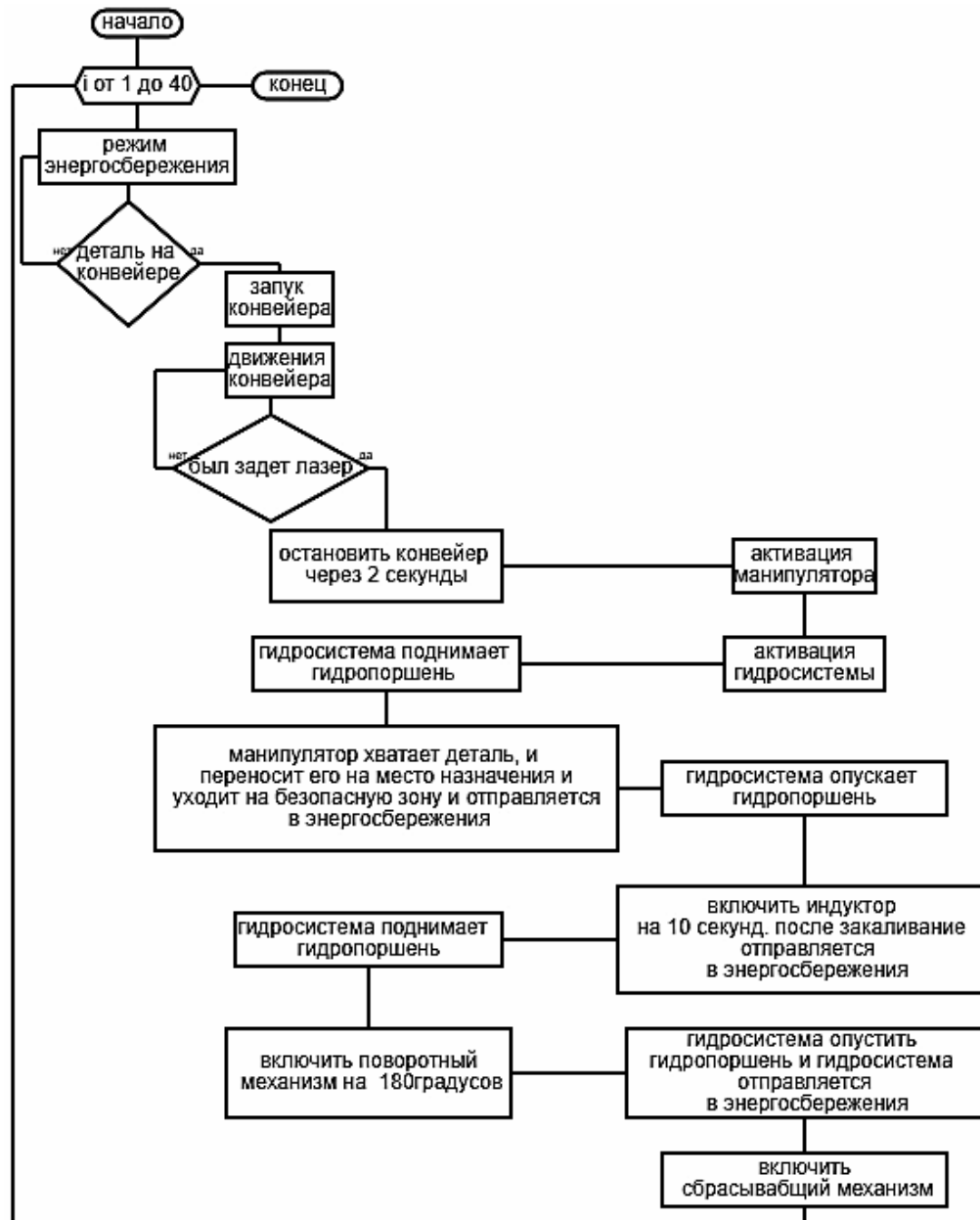


Рис. 3. Блок-схема алгоритма функционирования роботизированной установки

Далее приводится часть программного кода управления манипулятором:

```
#include <Servo.h> // Подключение библиотеки управления сервоприводами
```

```
// Указание угловых переменных для шести сервоприводов
```

```
int servo1Angle;
```

```
...
```

```
int servo6Angle;
```

```
// Задание объектов Servo для шести сервоприводов манипулятора
```

```
Servo servo1;
```

```
...
```

```
Servo servo6;
```

```
// Объявление константы для пина реле, управляющего пневмоцилиндром
```

```
const int relayPin = 8; // Выбор цифрового пина Arduino для управления реле
```

```
// Объявление констант для задержек включения и выключения пневмоцилиндра  
(в миллисекундах)
```

```

const int extendDelay = 1000; // Время, в течение которого реле включено
(поршень пневмоцилиндра выдвинут)
const int retractDelay = 1000; // Время, в течение которого реле выключено
(поршень пневмоцилиндра втянут)
void setup() {
// Привязка объектов Servo к соответствующим цифровым пинам Arduino
servo1.attach(2);
...
servo6.attach(7);
// Установка начального положения сервоприводов в безопасную зону
SafeZone();
// Инициализация последовательного порта соединения с компьютером
Serial.begin(9600);
// Настройка цифрового пина relayPin как «выход»
pinMode(relayPin, OUTPUT);
// Отключение реле (проверка, что пневмоцилиндр изначально не активирован)
digitalWrite(relayPin, LOW);
}
void loop() {
// Вызов функции, реализующей последовательность движений манипулятора и
управление пневмоцилиндром
RemovingTheSleeveFromTheConveyor(); // Снятие детали с конвейера
activateCylinder(); // Активация пневмоцилиндра
delay(2000); // Ожидание в течение 2 секунд для полного выдвижения цилиндра
SafeZone(); // Перемещение манипулятора в безопасную зону
BushingTrayOnTheRotaryMechanism(); // Перемещение детали к поворотному
механизму
PlaceTheSleeveOnTheRotaryMechanism(); // Установка детали на оправке
поворотного механизма
deactivateCylinder(); // Деактивация пневмоцилиндра
}
// Функция для активации пневмоцилиндра (выдвижение штока)
void activateCylinder() {
// Включение реле (подача высокого напряжения на цифровой пин relayPin)
digitalWrite(relayPin, HIGH); // Включение реле, открытие клапана
// Ожидание заданного времени для выдвижения штока extendDelay
delay(extendDelay);
}
// Функция для деактивации пневмоцилиндра (втягивание штока)
void deactivateCylinder() {
// Выключение реле (подача низкого напряжения на цифровой пин relayPin)
digitalWrite(relayPin, LOW); // Выключение реле, закрытие клапана
// Ожидание заданного времени для втягивания штока retractDelay
delay(retractDelay);
}

```

Таким образом, внедрение роботизированной системы для закалки тонкостенных деталей является одним из направлений повышения автоматизации, эффективности и качества термической обработки и служит основой для успешной интеграции инновационных решений в промышленное производство.

Список литературы

1. Гончаров А.В., Лахтин А.А. Роботизация производственных процессов: вызовы и перспективы // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2025. – №2-2. – С. 79-82. – DOI: 10.37882/2223-2966.2025.02.07.
2. Калачев А.Ю., Грановский В.Г. Роботизация производственных процессов // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2020. – №9. – С. 42-48.
3. Весельев И.А. Автоматизация и роботизация производственных процессов // Актуальные и перспективные научные исследования: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 августа 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. – С. 51-53.
4. Петин В.В., Биняковский А.А. Практическая энциклопедия Arduino: энциклопедия. – 2-ое изд., испр. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 166 с.

Сведения об авторе:

Муравьев Дмитрий Валерьевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

РЫНОЧНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИННОВАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Войку И.П.

Псковский государственный университет, Псков

Ключевые слова: градиентные покрытия, газопламенное напыление, техническое зрение, рыночные перспективы, импортозамещение, конкурентные преимущества, отраслевая сегментация.

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ рыночных перспектив инновационного оборудования для формирования градиентных покрытий. Проведено исследование объемов и динамики мирового и российского рынков с выделением ключевых драйверов роста и региональных особенностей. Определены целевые сегменты потребителей и их специфические требования в условиях импортозамещения. Детализированы технологические аспекты архитектуры комплекса оборудования с обоснованием выбора российских аналогов ключевых компонентов. Систематизированы конкурентные преимущества разрабатываемого решения, включая технологические, экономические и сервисные характеристики, а также предложены практические рекомендации по позиционированию на рынке.

MARKET PROSPECTS FOR AN INNOVATIVE GRADIENT COATING DEPOSITION EQUIPMENT SYSTEM

Voiku I.P.

Pskov State University, Pskov

Keywords: gradient coatings, laser deposition, plasma systems, machine vision, market prospects, import substitution, competitive advantages, industry segmentation.

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of the market prospects for innovative equipment designed for gradient coating deposition. The study investigates the size and dynamics of the global and Russian markets, identifying key growth drivers and regional specifics. Target consumer segments and their specific requirements in the context of import substitution are defined. The technological aspects of the equipment system's architecture are detailed, with a rationale provided for the selection of Russian-made analogues for key components. The competitive advantages of the developed solution are systematized, including its technological, economic, and service characteristics, and practical recommendations for market positioning are proposed.

Научными сотрудниками ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» разработана промышленная система, включающая в себя уникальную конструкцию установки, обеспечивающей выполнение градиентных покрытий через гибридизацию газопламенного напыления и лазерного упрочнения, собственную аппаратную и программную части.

Актуальность разработки подобного инновационного комплекса оборудования для формирования градиентных покрытий обусловлена растущими требованиями современных высокотехнологичных отраслей промышленности к функциональным характеристикам поверхностей деталей и конструкций [1]. В России в условиях реализации политики импортозамещения в стратегических отраслях промышленности особое значение для обеспечения технологического суверенитета приобретает создание отечественных решений в данной области.

Проведенный анализ рыночных перспектив демонстрирует устойчивую положительную динамику развития мирового и российского сегментов оборудования для градиентных покрытий. Глобальный рынок в 2024 году оценивается в 5,8 млрд. долл. США с прогнозируемым ростом до 7,9 млрд. долл. к 2026 году, что соответствует совокупному годовому темпу роста на уровне 16,7% [2]. Ключевыми драйверами роста выступают увеличение сложности покрытий в промышленности, требования к снижению себестоимости производства и активное развитие технологий Industry 4.0. Региональная структура мирового рынка характеризуется лидерством Северной Америки (35%) с доминированием авиастроительного сектора, Европы (28%) с акцентом на «зеленую» энергетику и Азии (30%) с быстроразвивающейся авиапромышленностью Китая (таблица 1). Доля России и стран СНГ составляет 7% с значительным потенциалом роста благодаря программам импортозамещения.

Табл. 1. Региональная структура мирового рынка

<i>Регион</i>	<i>Доля</i>	<i>Лидеры рынка</i>
Северная Америка	35%	США (GE Aviation, Pratt & Whitney)
Европа	28%	Германия (Trumpf), Швейцария (Oerlikon)
Азия	30%	Китай (HSG Laser), Япония (Mitsubishi)
Остальной мир	7%	Бразилия, ЮАР

К 2030 году мировой рынок достигнет 13,5 млрд. долл., с наибольшим ростом в сегментах авиакосмоса и медицины [3]. Ключевыми конкурентными преимуществами станут: автономность, точность и экологичность оборудования.

Российский сегмент демонстрирует опережающие темпы развития: с 9,5 млрд. руб. в 2024 году до прогнозируемых 15 млрд. руб. в 2026 году при совокупном годовом темпе роста на уровне 22%. Особенностью отечественного рынка является значительная доля оборонно-промышленного комплекса (48%) в структуре спроса, тогда как в мировом масштабе преобладает авиакосмический сектор (38%) [4]. Технологическое распределение показывает лидерство лазерных систем (42% на мировом рынке) при сохранении значительной доли плазменных установок (45% в России) [5]. Доля российского оборудования выросла с 12% в 2021 году до 28% в 2024 году, а к 2026 году планируется увеличение до 45-50% за счет развития отечественных аналогов ключевых компонентов.

Формирование градиентных покрытий на основе технического зрения предназначено для выполнения таких функций, как: анализ поверхности в реальном времени, автоматическая коррекция параметров напыления, формирование градиентных структур. Современное ПО позволяет создавать сложные градиентные покрытия с точностью до 97% и более. Отечественным предприятиям очень актуальны локализованные решения с поддержкой отечественного оборудования.

Технологическая архитектура разрабатываемого научным коллективом ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» комплекса включает

сочетание газотермического напыления и лазерного упрочнения, на основе искусственного интеллекта; уникальная 3D-модель аппаратной части системы контроля, а также запатентованная архитектура программной части, программный код и обученная сверточная нейросеть.

Разработчиками запланированы три варианта комплектации, ориентированные на различные сегменты потребителей: базовый комплект (25-35 млн. руб.) включает газопламенную систему и 3D-сканер с базовым ПО; профессиональный комплект (60-80. млн. руб.) дополнен полным набором камер контроля и ИИ-оптимизацией; промышленный комплекс (свыше 120 млн. руб.) представляет собой автоматизированную линию с роботами, цифровым двойником процесса и полной интеграцией в концепцию Industry 4.0.

Целевые потребители оборудования сегментированы на крупные госкорпорации (60% спроса) с бюджетом 50-150 млн. руб., средние производства (25%) с бюджетом 15-50 млн. руб. и научные центры (15%) с бюджетом до 15 млн. руб.

Ключевыми потребностями российских потенциальных потребителей являются:

- точность и качество (требуемая точность $\pm 5-10$ мкм, стабильность параметров при серийном производстве);
- импортозамещение (совместимость с российскими ЧПУ, соответствие ГОСТ/ОСТ);
- экономическая эффективность (срок окупаемости не более 3-5 лет, гибкие условия оплаты);
- поддержка и обучение (обучение персонала и техническое сопровождение).

Процесс принятия решения о закупке характеризуется участием главного инженера (40% случаев), технического директора (30%) и руководителя производства (20%).

Конкурентные преимущества разрабатываемого комплекса включают технологические, экономические и сервисные аспекты. Технологические преимущества обеспечиваются высокой точностью позиционирования ± 5 мкм, возможностью мультиматериального напыления с одновременной работой с 2-3 видами сырья, интеграцией ИИ-оптимизации параметров и системами реального контроля качества с обратной связью. Сервисные преимущества включают обучение персонала на месте, удаленный мониторинг оборудования и техническую поддержку 24/7 для критичных производств.

Экономическая эффективность проявляется в снижении себестоимости на 25-40% благодаря оптимизированному расходу материалов и минимизации брака, ускорении производства в 2-3 раза и сроке окупаемости 2-3 года. Ключевым дифференцирующим фактором является оптимальное сочетание точности, сопоставимой с зарубежными аналогами, и экономической эффективности за счет локализации, что обеспечивает ценовое преимущество в 20-30% относительно импортных решений при сохранении функциональных характеристик.

Инновационная разработка обеспечит отечественные производственные предприятия устойчивой технологией формирования покрытий деталей с градиентными прочностными, тепловыми, триботехническими характеристиками методом газопламенного напыления, а также программно-аппаратным комплексом автоматизированной реализации указанной технологии.

Финансирование. Статья опубликована в рамках реализации Программы развития Псковского государственного университета по программе стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Кравченко И.Н., Корнеев В.М., Коломейченко А.А., Пулавцев И.Е. Эффективные технологические методы нанесения покрытий газопламенным напылением // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». – 2015. – №1(65). – С. 36-41.
2. High-performance coatings market size by type, coating technology, end-use industry analysis and segment forecasts, 2024-2032 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/high-performance-coatings-market>.
3. Об утверждении комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 25.06.2022 № 1693-р (ред. от 04.05.2024).
4. Войнов П.С., Беленький В.Я., Белинин Д.С., Варушкин С.В. Возможности применения аддитивных технологий при конструировании и производстве вооружения, военной и специальной техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, №2. – С. 70-78. – DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.09.
5. Медников А.Ф., Медведев К.С., Качалин Г.В. и др. Обзор современных способов формирования термобарьерных покрытий // Глобальная энергия. – 2023. – Т. 29, №4. – С. 132-148. – doi.org/10.18721/JEST.29409.

Сведения об авторе:

Войку Иван Петрович – старший преподаватель кафедры «Управление».

Научное периодическое издание

Механика и машиностроение. Наука и практика:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№8

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 4,94.

Подписано в печать 27.11.2025г. Заказ №25-23.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/mimnip.html>
<https://doi.org/10.26160/2658-6185-2025-8>

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778,
г.Санкт-Петербург).

Ответственный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

Редакция: Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.

<http://srcms.ru>

E-mail: info@srcms.ru