

Серенков П. С., Спесивцева Ю. Б.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОРМ ТОЧНОСТИ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В комплексной методике проектирования норм точности разработаны алгоритмы проведения проектировочных расчетов для структурных компонентов изделия различной сложности со строгой последовательностью и взаимодействием элементов, что обеспечивает достоверность проектировочных расчетов и объективность принятых конструкторских решений. Типовые алгоритмы-модули подчиняются общим подходам, единым для всех уровней структурной «иерархической пирамиды» изделия и специальным подходам, характерным для структурных компонентов на конкретном уровне иерархии.

Введение. Назначение допусков на параметры – задача, которая решается при проектировании любого изделия и является последним этапом, которому предшествуют разработка концепции, общей компоновки изделия и назначение номинальных значений. Номенклатура параметров определяется назначением изделия, его составом и конструкцией. Эксплуатационные показатели, определяющие качество продукции, зависят в значительной степени от геометрических параметров деталей. Обеспечение требуемой точности размеров, формы и расположения поверхностей, параметров микрогеометрии необходимо для нормальной работы отдельных деталей в соединениях и изделия в целом. При нормировании точности параметров необходимо руководствоваться следующими принципами: полнота охвата, однозначность и оптимальность. Нормы должны быть установлены на все параметры, влияющие на функционирование изделия с учетом экономических критериев. Возникают вопросы: как выявить все функционально важные параметры, как определить их взаимосвязь и учесть особенности? Частично эту проблему решает теория размерного анализа, в основе которой лежит выявление замыкающих звеньев, построение и расчет размерных цепей. Наибольшее применение размерных анализ приобрел при разработке технологических процессов изготовления деталей, позволяя определять припуски на обработку и размеры исходной заготовки. Вопросы размерного анализа рассматриваются во многих изданиях [1–4], в том числе зарубежных англоязычных источниках [5]. Расчет допусков осуществляется в распространенных компьютерных программах (например, HEXAGON Tolerance Package-Software for Tolerance Calculation and Analysis; TOL1. Tolerance Calculation Software; TOLICON. DXF Tool for TOL1-Tolerance Analysis Software; TOLPASS. Dimensioning of ISO Fits; MITCalc- Tolerance analysis). Все современные САПРовские пакеты имеют встроенные модули для решения задач расчета допусков (например, Pro/ENGINEER: Tolerance Analysis Extension powered by CETOL Technology is a tolerance analysis application that is integrated with Pro/ENGINEER. With Tolerance Analysis Extension, you can quickly perform 1-D tolerance или MECAMaster for CATIA V5: 3D tolerance calculation). Общим недостатком перечисленных информационных ресурсов является то, что в них мало внимания уделяется выявлению звеньев размерных цепей, оценке их влияния на замыкающее звено, т. е. тем этапам размерного анализа, которые являются индивидуальными для каждого изделия и поэтому сложно формализуются, что особенно существенно для компьютерных программ. Таким образом, исследования, направленные на выявление, классификацию, обобщение и формализацию первых этапов размерного анализа продолжают оставаться актуальными.

Подходы и принципы. В основу разработанной комплексной методики проектирования норм точности положен системный подход метода «Структурирование функции

с плановыми показателями. Это позволяет связать премии с реальным вкладом работников в повышение конкурентоспособности продукции.

2. Сроки действия. Предлагаемая система премирования включает период времени от утверждения технического задания на разработку до окончания первого года серийного производства новой машины. Это способствует стимулированию работников на всех этапах жизненного цикла продукции.

3. Сумма премиальных отчислений. Сумма премиальных отчислений определяется на основе премиального фонда за создание новой конкурентоспособной машины в ходе технической подготовки производства. Процент премирования предлагается устанавливать в размере 10–20 %.

4. Источник выплаты вознаграждения. Премии выплачиваются из фонда потребления предприятия, что может способствовать более прямой связи между успехом инновационной деятельности и вознаграждением работников.

5. Премирование участвующих работников. Премии направлены на работников, непосредственно участвующих в создании новой машины, что стимулирует коллективную работу и сотрудничество.

6. Порядок и сроки премирования. Премирование происходит дважды – по окончании технической подготовки производства в виде аванса и по завершении 1 года серийного производства за конечные результаты работы.

Выводы.

Таким образом, использование системы премирования может стать эффективным инструментом для стимулирования работников к созданию новых конкурентоспособных машин, что в свою очередь может привести к повышению прибыли, улучшению материального положения работников и повышению эффективности работы предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плясунков А. В. Система количественной оценки конкурентоспособности продукции // Вестник БГЭУ. – 2000. – № 2. – С. 58–59.
2. Демидов В., Плясунков А. Оценка конкурентоспособности товаров народного потребления длительного пользования // Маркетинг, реклама и сбыт. – 2001. – № 2. – С. 9–14.
3. Демидов В., Плясунков А. Установление цен на новые средства труда и оценка их конкурентоспособности // Экономика. Финансы. Управление. – 2001. – № 8. – С. 77–82.
4. Плясунков А. Ценообразование на новую продукцию и оценка ее конкурентоспособности // Все для бухгалтера. – 2000. – № 15. – С. 61–63.
5. Плясунков А. Конкурентоспособность и эффективность новых комплектующих изделий // Экономика. Финансы. Управление. – 2000. – № 12. – С. 45–48.
6. Плясунков А. В. Разработка системы управления конкурентоспособностью продукции // Предпринимательство в Белоруссии. – 2000. – № 1. – С. 11–14.
7. Плясунков А. Разработка системы премирования конструкторов и технологов за повышение конкурентоспособности продукции // Экономика. Финансы. Управление. – 2001. – № 3. – С. 100–109.

Поступила 2.11.2023

Оперативное управление конкурентоспособностью через снижение фактической отпускной цены может осуществляться до тех пор, пока разность между фактической отпускной ценой, фактической себестоимостью и косвенными налогами остается больше минимально допустимой прибыли. Когда будет достигнута минимально допустимая норма прибыли, фактическая отпускная цена становится лимитной ценой нижнего предела.

Прогнозная лимитная цена нижнего предела используется для расчета лимитной себестоимости, поэтому ее прогноз необходим на ранней стадии разработки нового изделия. Фактическая себестоимость на момент запуска изделия в производство рассчитывается на основе фактических затрат и может снижаться в процессе выпуска новой продукции за счет эффекта масштаба производства и прогресса технологии.

Таким образом, управление конкурентоспособностью новых машин требует комплексного подхода, включая планирование и управление ценами, себестоимостью и динамикой стоимостных показателей в процессе их производства.

Экономические методы управления конкурентоспособностью, такие как система премирования, могут быть важным инструментом для мотивации работников и стимулирования инновационной деятельности на предприятии. Давайте рассмотрим основные аспекты предложенной системы премирования [7].

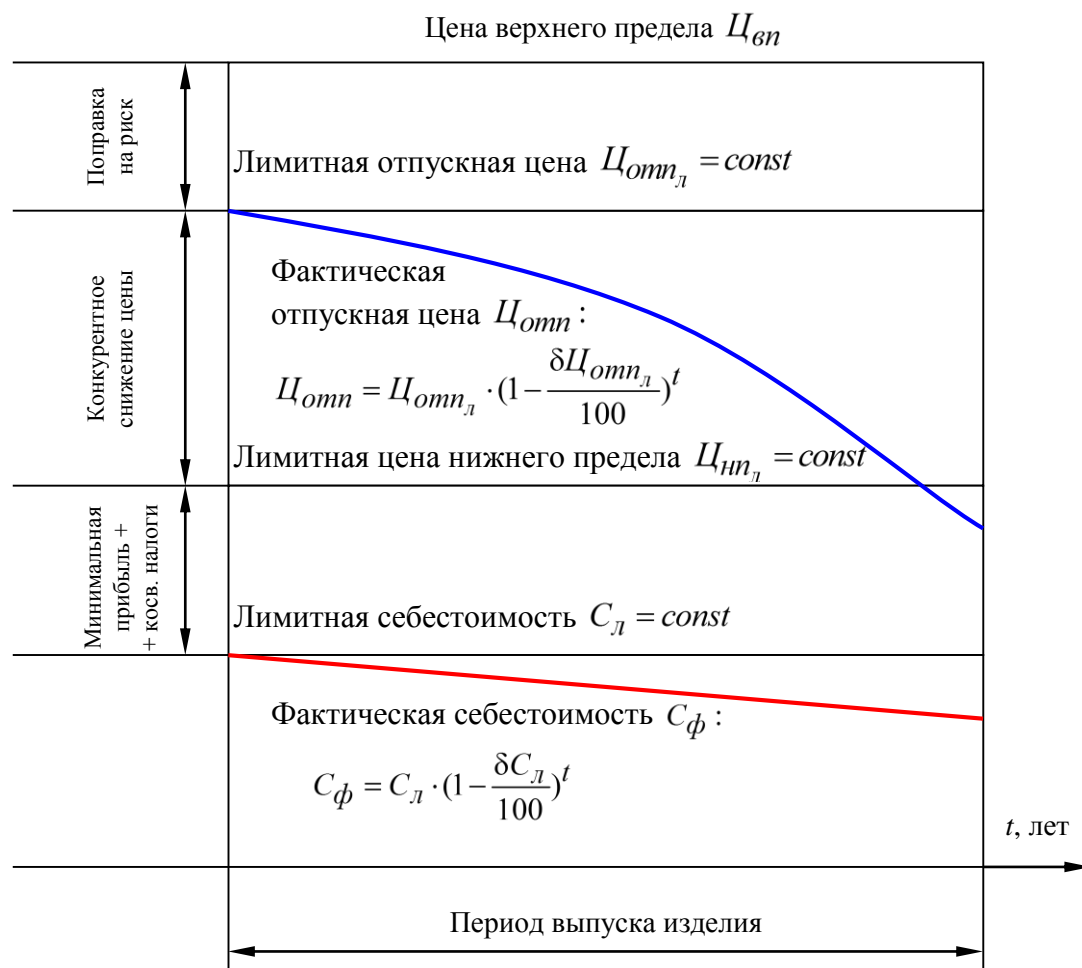


Рис. 1. Прогнозируемая динамика стоимостных показателей изделия в период его выпуска

1. Условия премирования. Премирование работников происходит на основе полученного дополнительного экономического эффекта от повышения конкурентоспособности новой машины за счет улучшения качества и снижения себестоимости по сравнению

телю, а покупка и эксплуатация этих машин устраивает покупателя. Оценить конкурентоспособность новых машин можно с помощью двух показателей [1–5]: коэффициента конкурентоспособности продукции с точки зрения покупателя и коэффициента конкурентоспособности продукции с точки зрения производителя. Первый показатель характеризует привлекательность продукции для потребителя, а второй – выгоду производителя. Если оба коэффициента больше 1, то продукцию можно признать конкурентоспособной, поскольку от производства и реализации такой продукции выигрывают и покупатели и производители. Первый коэффициент определяется отношением верхнего предела цены (потребительской ценности) изделия к фактической цене и характеризует привлекательность продукции для потребителя. Разница между числителем и знаменателем представляет собой выгоду для потребителя или экономию при покупке. Второй коэффициент определяется отношением фактической цены продукции к нижнему пределу цены и характеризует выгодность производства продукции для производителя.

Предложенная система показателей для оценки конкурентоспособности новых машин является весьма обоснованной и позволяет учесть как экономические аспекты производства, так и оценку со стороны потребителя. Учитывая сложность оценки конкурентоспособности новых машин, предложенная система показателей может быть дополнена другими факторами, такими как инновационные особенности продукции, уровень сервиса и поддержки клиентов, экологическая устойчивость и другие аспекты, которые также могут влиять на успешное размещение продукции на рынке.

Алгоритм разработки новых конкурентоспособных машин [6] включает в себя проведение маркетинговых исследований рынка, анализ факторов внешней среды, определение технических и экономических параметров, разработку укрупненного бизнес-плана, создание технического задания, конструкторскую и технологическую подготовку производства. При этом важно спрогнозировать технико-эксплуатационные параметры, цены и объемы реализации новых машин на основе прогнозируемой базы сравнения.

Использование системы показателей для оценки конкурентоспособности новых машин позволяет учитывать различные аспекты их производства и реализации. Коэффициенты конкурентоспособности продукции с точки зрения покупателя и с точки зрения производителя позволяют оценить выгоду для потребителя, экономию при покупке, а также выгоду для производителя.

Таким образом, разработка новых конкурентоспособных машин требует комплексного подхода, учета потребностей рынка, проведения анализа и использования системы показателей для оценки их конкурентоспособности.

Управление конкурентоспособностью новых машин является важным аспектом процесса их разработки и производства. Планирование и управление конкурентоспособностью включает в себя расчет верхнего предела цены, лимитной цены при запуске и снятии машины с производства, а также лимитной себестоимости.

Для расчета лимитной цены при запуске и снятии машины с производства используются формулы, учитывающие коэффициент риска, планируемое снижение цен по группам взаимозаменяемой продукции и планируемый период выпуска новых машин. Если на предприятии имеется базовый аналог, то лимитную себестоимость новой машины можно определить по формуле, учитывая себестоимость и цену базовой машины.

Управление конкурентоспособностью продукции включает оперативное управление конкурентоспособностью во время выпуска продукции, от запуска до снятия изделия с производства. Прогноз динамики стоимостных показателей представлен на графике (рис. 1), где показан процесс оперативного управления конкурентоспособностью продукции. Важно отметить, что верхний предел цены остается постоянным, а фактическая себестоимость может снижаться за счет эффекта масштаба производства и прогресса технологии.

Из графика можно сделать вывод, что выбор угла наклона оси сверла оказывает влияние на скорость резания, а оптимальный угол может помочь добиться более эффективного процесса сверления.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке БРФФИ в рамках договора на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методологии расчетов режимов резания в машиностроении (на примере обработки осевым инструментом)» № T22УЗБ-077.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токарев А. С. Причины возникновения увода оси отверстия при обработке зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами. Стольпинский вестник. – № 4. – 2022.

2. Каталог инструмента для сверления и фрезерования. – ОАО «Кировградский завод твердых сплавов», 2014. – Режим доступа: http://www.kzts.ru/core/user_files/Instr_sver.pdf. – Дата обращения: 09.11.2023.

3. Сборное кольцевое сверло с механическим креплением многогранных режущих пластин и неперетачиваемые пластины для его оснащения. RU2014133207A. 2014-08-12.

4. Умаров Т. Повышение эффективности обработки отверстий сверлами с механическим креплением твердосплавных пластин: Ав-тореф. Дис. на соиск. Ученой степени канд. техн. наук. – Киев, 1990.

5. Штерензон В. А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций / В. А. Штерензон. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 66 с.

Поступила 9.11.2023

УДК 339.137.2

Плясунков А. В.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ МАШИН

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Рассмотрены экономические аспекты создания новых конкурентоспособных машин. Продукцию можно назвать конкурентоспособной, если она в течение периода ее производства соответствует по качеству требованиям конкретного рынка (рынков), адаптируется по соотношению качества и цены к предпочтениям потребителей, обеспечивает выгоду производителю при ее реализации. Предложена методика оценки конкурентоспособности продукции. Описан процесс создания новой конкурентоспособной продукции на всех стадиях ее жизненного цикла и методы управления конкурентоспособностью продукции. Предложена система премирования, которая призвана материально стимулировать работников, занимающихся технической подготовкой производства и созданием новой конкурентоспособной продукции. Разработана модель управления инновационной деятельностью, способствующая созданию и выпуску конкурентоспособной продукции на всех стадиях ее жизненного цикла, а также повышению прибыли, различным видам рентабельности, улучшению благосостояния работников и повышению эффективности работы предприятия.

Целью любого коммерческого предприятия является получение прибыли через удовлетворение разнообразных потребностей общества. Для достижения этой цели необходимо, чтобы выпускаемые машины были конкурентоспособными. Машины можно назвать конкурентоспособными в том случае, если их производство выгодно производи-

ломаную линию, состоящую из нескольких отрезков и они соответствуют нелинейной регрессионной модели.

Выражение, устанавливающее связь между случайной зависимой и детерминированной независимой переменной, представляет собой уравнение регрессии.

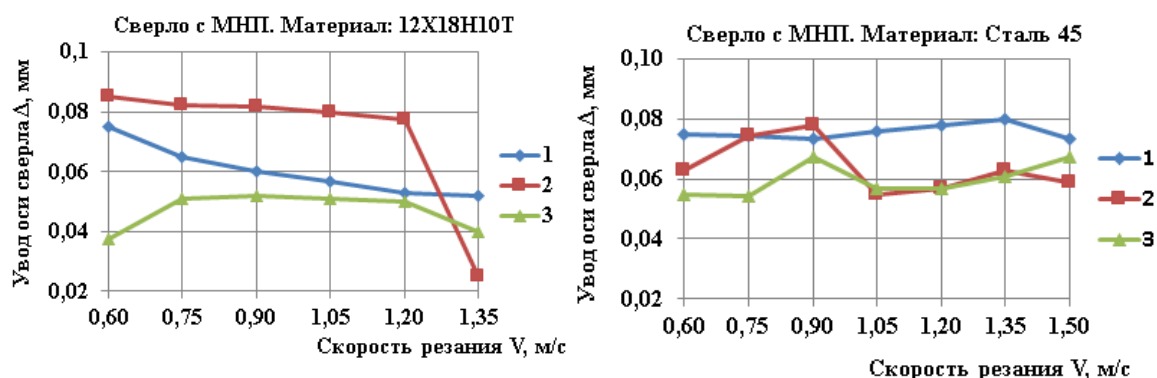


Рис. 4. Влияние скорости резания на увод оси сверла при сверлении в сплошной заготовке: 1 – начало отверстий; 2 – середина отверстий; 3 – конец

Модель, основанная на уравнении регрессии, является регрессионной моделью.

С помощью известных методов построения регрессионных моделей получены модели, описывающие величину увода сверла при изменении скорости резания (рис. 5) [5].

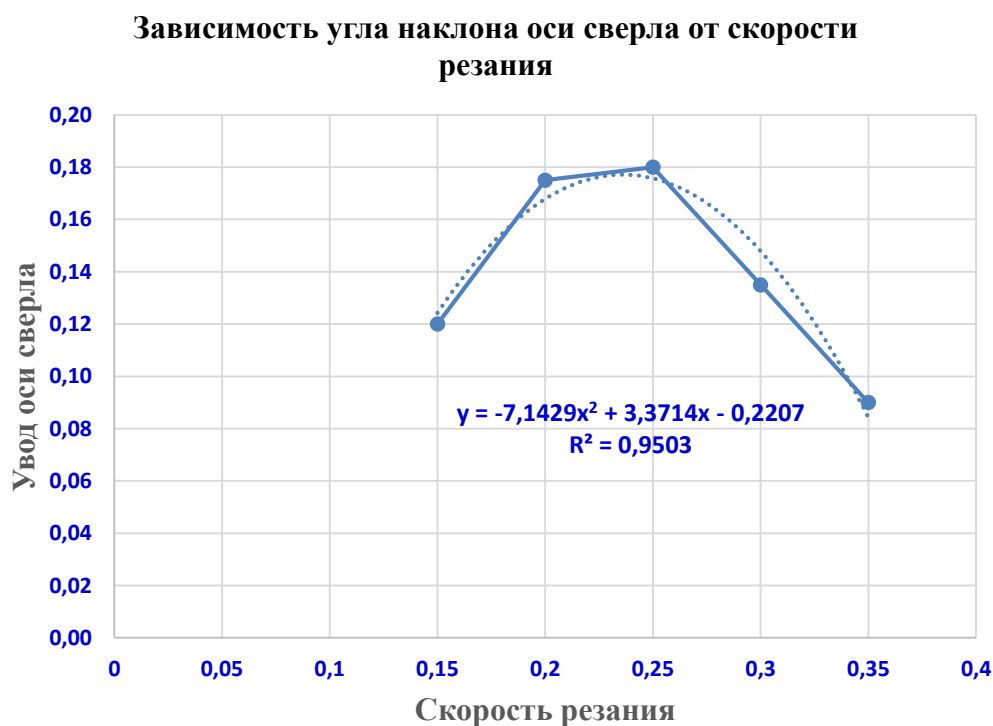


Рис. 5. Влияние скорости резания на увод оси сверла при сверлении

По графику можно сделать следующие выводы. С увеличением угла увода оси сверла (y) скорость резания (x) снижается. Это значит, что более угол наклона оси сверла приводит к меньшей скорости резания.



Рис. 2. Сверления отверстий при сверлении с МНП

Сверление отверстий при сверлении с многогранными неперетачиваемые пластинами в сталях 12Х18Н10Т и стали 45 показано на рис. 2.

На рис. 3. показано наружный вид заготовки из стали 45 на станке модели 6М82Г после сверления.



Рис. 3. Наружный вид заготовки из стали 45 на станке модели 6М13В после сверления

Режимы резания сверл с МНП значительно отличается от режимов для всех типов сверл, имеющих перемычку.

На рис. 4. предоставлены данные, экспериментальных исследований характеризующий влияние скорости резания на увод оси сверл при обработке отверстий.

Технологические процессы машиностроительного производства, особенно процессы обработки резанием конструкционных материалов, очень сложны по своей физико-химической природе. До сих пор отсутствуют принятые всеми аналитические модели, точно описывающие закономерности процессов [4].

Поэтому по полученным данным находим такую кривую, которая бы наилучшим образом аппроксимировала экспериментальные точки. Точки на графике показывают

В основе повышения производительности процесс сверления твердосплавными сверлами лежит возможность увеличения скорости до такого предела, который ограничен лишь физико-механическими свойствами твердого сплава [1].

Начиная 1975 года по настоящее время зарубежными и отечественными инструментальными фирмами разработана и выпускается в промышленных масштабах достаточно широкая номенклатура сверл с МНП. Однако еще отсутствует система данных и рекомендаций по использованию сверл с механическим креплением твердосплавных пластин.

Требования предъявляемых к увеличению производительности механической обработки в 3–10 раз на операциях сверления неглубоких отверстий ($l = 2-3d$) ставят сверла с МНП вне конкуренции по отношению к спиральным.

Использование сверл со сменными неперетачиваемыми пластинами позволяет полностью отказаться от дорогостоящей перетачиваемыми пластинами позволяет полностью отказаться от дорогостоящей переточки.

Замена пластин может быть произведена менее чем за минуту, даже без снятия сверл со станка [2].

Эффективность применения сверл с МНП обусловлена прежде всего жесткой технологической наладкой станков с ЧПУ и специальной конструкцией режущей части инструмента. Во всех имеющихся конструкциях сверл с МНП режущей пластины расположены таким образом, чтобы отсутствовала поперечная режущая кромка, которая у спиральных сверл приводит к значительному повышению осевой силы в два раза повышает динамическую устойчивость сверл с МНП и соответственно обрабатывать отверстия с точности в пределах 10...12 квалитетов, не смотря на то, что инструмент не имеет центрирующих элементов, таких как у спирального сверла [3].



Рис. 1. Общий вид безперемычных сверл с МНП Ø 25 мм

Испытания подвергалась опытная партия сверл Ø 25 мм, при обработке отверстий на стали 12Х18Н10Т и стали 45. Поэтому величина увода сверла МНП практически осталась неизменной, а спирального сверла она возросла в 2,0 раза.

Заключение. Применение нейронной сети модели YOLO для решения задачи отслеживания движения рабочего инструмента 3D-принтера обеспечивает сохранение баланса между скоростью и точностью обнаружения рабочего инструмента 3D-принтера в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мисякова В. А., Азаревич Э. А., Ковалева И. Л. Основные этапы определения положения центра LED излучателя на изображении // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI международной научно-практической конференции / ред. кол.: Околов А. Р. (гл.ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2023 – С. 107–109.
2. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks [Электронный ресурс] / Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, Jian Sun : Computing Research Repository (CoRR), 2016. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. Англ. Дата доступа: 20.10.2023.
3. R-FCN: Object Detection via Region-based Fully Convolutional Networks [Электронный ресурс] / Jifeng Dai, Yi Li, Kaiming He, Jian Sun : Computing Research Repository (CoRR), 2016 – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1605.06409.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. Англ. Дата доступа: 20.10.2023.
4. YOLO9000: Better, Faster, Stronger [Электронный ресурс] / Joseph Redmon, Ali Farhadi : Computing Research Repository (CoRR), 2016. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. Англ. Дата доступа: 20.10.2023.
5. SSD: Single Shot MultiBox Detector [Электронный ресурс] / Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, Alexander C. Berg : Computing Research Repository (CoRR), 2016. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. Англ. Дата доступа: 20.10.2023.

Поступила 2.11.2023

УДК 621.91:02.

Мухиддинов З. Н.¹, Яцкевич О. К.², Умаров Т.¹

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СВЕРЛ С МНОГОГРАННЫМИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПЛАСТИНКАМИ

1. *Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан*
2. *Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь*

В данной статье рассмотрены вопросы повышения надежности сверл с механическим креплением твердосплавных пластин. Получены результаты сравнительных испытаний в промышленных условиях при обработке отверстий. Сделаны соответствующие выводы о влиянии параметров на точность обработки.

Механическая обработка отверстий является одной из наиболее распространенная и в то же время наиболее сложная операция в машиностроении. Данная операция характеризуется очень большой номенклатурой инструмента различных конструкций и типов-размеров (спиральные, паровые, МНП) отличающихся между собой особенностями кинематики и процессе стружкообразования и износа рабочей части инструменте.

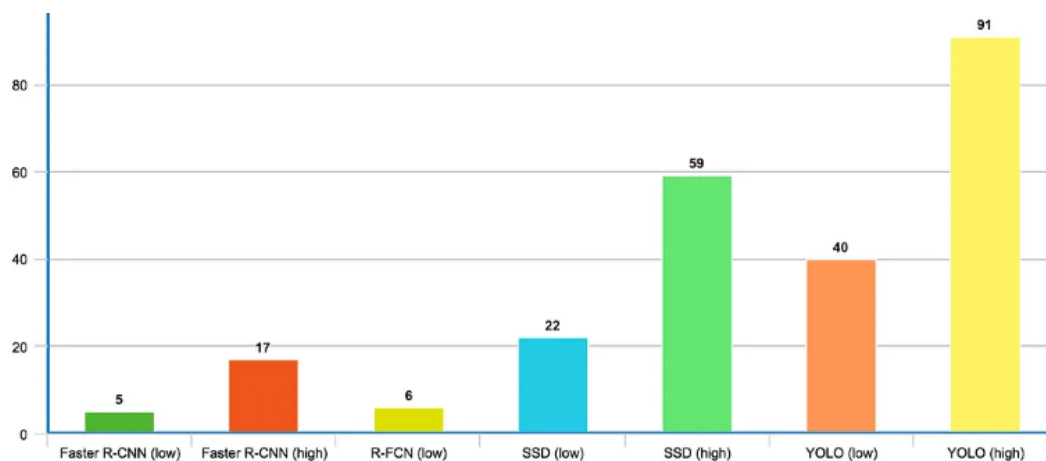


Рис. 3. Диаграмма сравнения детекторов по частоте кадров в секунду

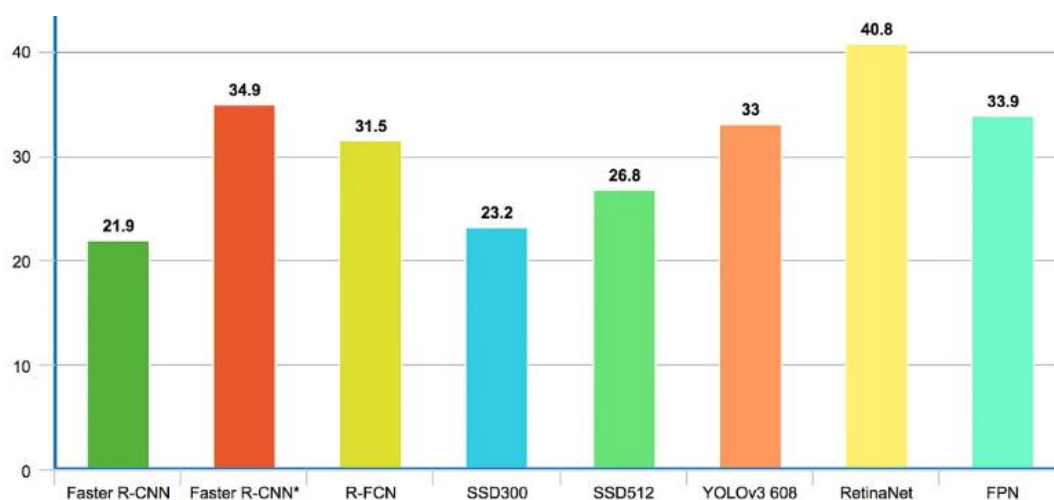


Рис. 4. Диаграмма сравнения детекторов по точности на испытательном наборе MS COCO

Все объекты на изображениях в данном наборе находятся в естественной среде, то есть в контексте, который типичен для них. На изображениях, как правило, присутствуют объекты разных классов, причем лишь 10 % изображений содержат объекты только одного класса. Все изображения сопровождаются аннотациями, хранящихся в формате JSON. В наборе данных MS COCO сложнее обнаруживать объекты, и обычно детекторы достигают гораздо более низкого значения *mAP*.

В результате анализа и исследований можно сделать вывод, что двухуровневые нейронные сети на основе регионов демонстрируют небольшое преимущество в точности, если скорость в реальном времени не требуется, в то время как одноуровневые предназначены для обработки видеопотока в реальном времени.

Таким образом, для решения задачи отслеживания движения рабочего инструмента 3D-принтера предлагается использовать одноуровневую нейронную сеть модели YOLO. В этой сети обнаружение объектов на изображении осуществляется за один подход благодаря CNN, которая создает прямоугольные области с оценками вероятности наличия в них объектов заданного класса, а также применения алгоритма подавления не максимальных значений (Non-Maximum Suppression, NMS) для исключения ложных срабатываний и объединения областей, содержащих один и тот же объект. Это позволяет YOLO обрабатывать большое количество кадров в секунду на графическом процессоре (GPU).

На первом этапе предлагаются кандидаты для обнаружения объектов, так называемые регионы интереса (region proposals). Эти регионы выбираются сверточной нейронной сетью (convolutional neural network, CNN) для дальнейшего анализа.

Нейронная сеть анализирует каждый из предложенных регионов интереса, чтобы определить, содержит ли он объект и, если да, то какой класс объекта. Примерами двухуровневых архитектур являются Faster R-CNN [2] и R-FCN [3].

Одноуровневые архитектуры выполняют обнаружение объектов в один этап без явного этапа предложения регионов интереса. Эти архитектуры обрабатывают все изображение сразу и прогнозируют ограничивающие рамки и классы объектов. Среди одноуровневых архитектур наиболее популярны такие модели нейронных сетей как YOLO (You Only Look Once) [4] и SSD (Single Shot MultiBox Detector) [5].

Выбор модели нейронной сети. Для выбора модели нейронной сети для отслеживания движения рабочего инструмента был выполнен анализ результатов работы популярных сетей с различной архитектурой, представленных в работах [2], [3], [4] и [5]. В качестве метрики использовалась так называемая усредненная средняя точность (mean Average Precision, mAP).

Усредненная средняя точность определяется как

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i, \quad (1)$$

где AP_i – средняя точность для каждого класса объектов в наборе; N – количество классов объектов.

Чем выше mAP , тем лучше производительность модели обнаружения объектов. Она обеспечивает компромисс между точностью и полнотой в контексте обнаружения объектов, позволяя оценить, насколько хорошо модель находит объекты и как точно она это делает.

Сравнение результатов работы различных нейронных сетей проводилось на тестовом наборе PASCAL VOC (Visual Object Classes). Диаграмма результатов тестирования приведена на рис. 2.

Разрешение входного изображения и средства извлечения функций влияют на скорость обнаружения. На рис. 3 приведены самые высокие и самые низкие значения частоты кадров в секунду (frame per seconds, FPS). Тем не менее, приведенный ниже результат может быть весьма необъективным, поскольку измерения были проведены при разных значениях mAP.

Также был проведен анализ с помощью набора данных обнаружения объектов MS COCO (рис. 4).

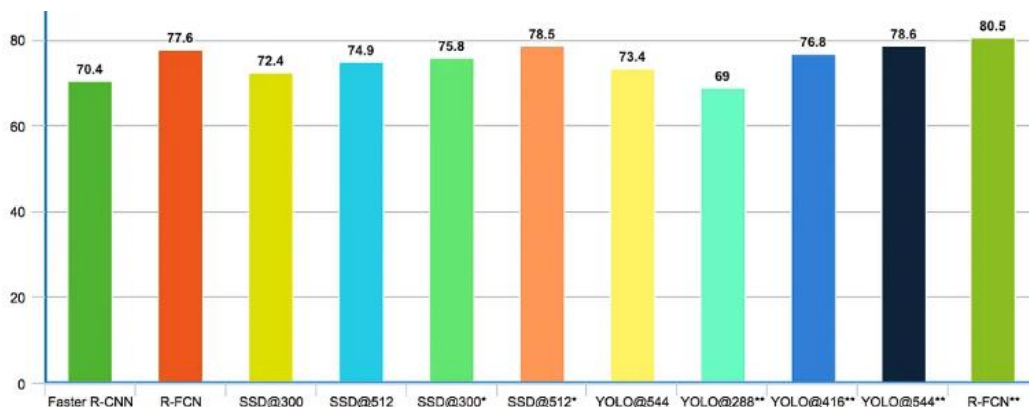


Рис. 2. Диаграмма mAP для тестового набора PASCAL VOC

отслеживания движения рабочего инструмента 3D-принтера и предлагается использовать нейронную сеть YOLO, т. к. она показывает наилучшие результаты по точности и скорости детектирования объектов в режиме реально времени независимо от размеров объектов.

Введение. Для повышения стабильности и качества процесса 3D-печати в работе [1] предлагается выполнять оценку положения рабочего инструмента 3D-принтера, основанную на обработке данных о положении печатающей головки. Набор данных для анализа формируется с помощью обычной телевизионной камеры (web-камеры), расположенной над рабочей зоной 3D-принтера. Описываемый в указанной работе подход включает такие основные этапы как перевод в цветовую модель HSV, фильтрацию методом Гаусса и бинаризацию. Тестирование предлагаемого подхода продемонстрировало удовлетворительные результаты.

В настоящее время для отслеживания движения объектов (object tracking) широко применяются нейронные сети. В связи с этим необходимо оценить перспективность использования нейронных сетей, а также выбрать конкретную модели сети для определения траектории движения рабочего инструмента 3D-принтера.

Алгоритм отслеживания объектов. Задачи отслеживания объектов в видеопотоке разделяются на два основных типа: отслеживание одного объекта (single object tracking) и отслеживание нескольких объектов (multiple object tracking). Задача отслеживания движения рабочего инструмента 3D-принтера относится к первому типу и заключается в оценке или предсказании местоположения инструмента на каждом последовательном кадре видео. Для этого используются пространственная и временная информация, полученная после определения начальных координат инструмента.

В общем случае алгоритм отслеживания, представленный на рис. 1, начинается с обнаружения объекта в текущем кадре видеопотока, что приводит к получению информации о местоположении и размере объектов в виде ограничивающих рамок.

Далее создается описание и модель движения объекта, которые будут использоваться для прогноза положения объекта на следующем кадре. Для формирования приближенного представления перемещения объекта между кадрами используется линейная модель с постоянной скоростью. На следующем этапе обнаруженные объекты в текущем кадре связываются с уже захваченными. Для ограничивающей рамки каждой захваченной цели выбирается наиболее близкая ограничивающая рамка обнаруженного объекта в текущем кадре. В результате формируются выходные данные в видеопотоке в виде ограничивающих рамок с именем класса объекта, а также уникальным идентификатором.

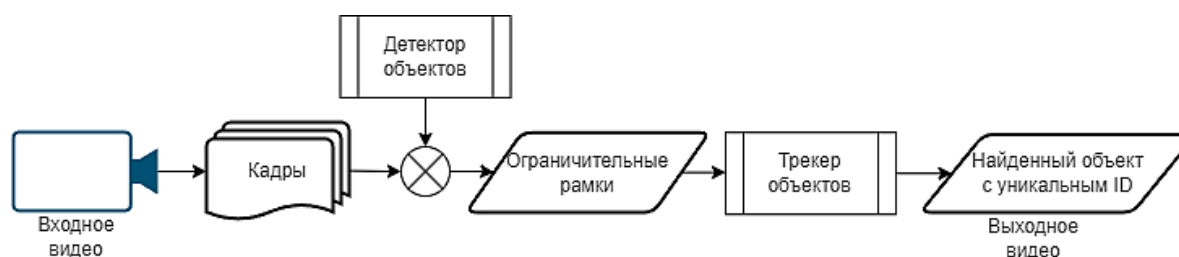


Рис. 1. Общий алгоритм визуального обнаружения и отслеживания объектов

Использование нейронных сетей для обнаружения объектов. Этап обнаружения объекта реализуется с использованием различных нейронных сетей, как правило, имеющих двухуровневые (two-stage) и одноуровневые (one-stage) архитектуры.

Двухуровневые архитектуры включают в себя два основных этапа обработки изображений:

Таблица 2 – Значение стойкости МНП, прошедших полный цикл обработки

Производитель	Геометрия	Стружколом	Классматериала	Стойкость относительно МНП SENO, %
LIFA	CNMG-120412	PM	I	165
LIFA	CNMG-120412	PM	II	110
Betalent	CNMG-120412	PM	II	120
JXTC	WNMG-080408	AMM	I	60

Данные по результатам испытаний пластин производства ООО «БТК-сплав» (Республика Беларусь) не включены в сводную таблицу, в связи с большим диапазоном показателей стойкости. Расширенный диапазон стойкости (меньше базового и превышающие базовое значение стойкости) на одинаковой геометрии характеризуется различным составом спекаемой смеси, что значительно влияет на конечный результат испытаний. На сегодняшний день, с целью определения оптимального состава и технологии получения заготовок в лаборатории БТК-сплав, проводятся расширенные испытания данных заготовок.

В результате проведенного первого цикла промышленных испытаний МНП определены оптимальные шероховатость ($Ra = 0,3-0,4$ мкм) и радиус скругления режущей кромки (70–90 мкм) при которых стойкость инструмента увеличивается по сравнению с базовой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сединин, И. Н. Выбор марки сплава, покрытия и геометрических параметров режущей пластины для торцевого фрезерования высокоуглеродистой закаленной стали 95X18-Ш / И. Н. Сединин, В. Ф. Макаров // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. – № 4 (101). – С. 18–27.
2. Волков, Р. Б. Износ многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин при точении экспериментальной стали 75XГСФ / Р. Б. Волков // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – № 1 (19). Т. 2. – С. 69–73.

Поступила 2.11.2023

УДК 004

Мисякова В. А., Ковалева И. Л.

ВЫБОР МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА 3D-ПРИНТЕРА

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

С целью повышения качества и эффективности процесса 3D-печати целесообразно отслеживать движение рабочего инструмента 3D-принтера на основании обработки видеопотока, полученного с обычной телевизионной камеры (web-камеры), расположенной над рабочей зоной строительного 3D-принтера. Для этого предлагается использовать сверточные нейронные сети, которые доказали свое превосходство над классическими методами по точности детектирования. В статье проведен анализ существующих нейронных сетей с точки зрения перспективности их использования для



Рис. 1. Фото пластины (неполированная заготовка)

По результатам первого этапа были подобраны пластины с наибольшим периодом стойкости, который возможен с учетом всех факторов экспериментальных исследований (пластины без внекамерной подготовки (неполированные) и без покрытия). Следует отметить, что все три вида пластин от поставщика из КНР показали примерно одинаковый период стойкости (порядка 1–1,5 минут). При изучении поверхности износа пластин в основном были зафиксированы такие причины выхода из строя, как сколы и разрушение граней (рис. 2).



Рис. 2. Фото пластин со сколами

Следует отметить, что пластины от ООО «БТК-сплав» (РБ) при проведении первого этапа исследований показали значительный разброс значений периода стойкости (по отдельным позициям он составлял разницу более чем в 10 раз), что позволило определить оптимальный состав заготовки МНП для дальнейшего полирования и скругления. В данной работе не приводится процентное соотношение компонентов твердого сплава группы ТК в связи с подписанием договора между предприятиями о неразглашении данных (в актах экспериментальных исследований, которые хранятся на ОАО «МЗШ» сведения о составе МНП имеются).

На втором этапе первого цикла экспериментальных исследований определяли зависимость стойкости пластин от исходной шероховатости и радиуса скругления режущих кромок. Пластины подготавливались, выдерживая следующие диапазоны значений шероховатости – от 0,16 мкм до 0,90 мкм и радиуса скругления режущих кромок – от 42 мкм до 105 мкм.

Полировка и скругление режущих кромок пластин производились электролитическим методом, по технологии, которая является запатентованным изобретением Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».

В ходе первого цикла опытно-промышленных работ было проведено более 150 испытаний. Результатами первого цикла испытаний является значительное увеличение стойкости пластин относительно базового показателя за счет определения оптимальных параметров подготовки поверхности МНП (шероховатость) и геометрии (радиус скругления режущих кромок). Результаты стойкости МНП, прошедших полный цикл подготовки, относительно базовой стойкости пластин SENO, представлены в табл. 2.

В связи с экономическими санкциями в Республике Беларусь остро встал вопрос поставки МНП с покрытиями. На данный момент основным поставщиком МНП является Китайская Народная Республика (КНР). В то же время на ОАО «МЗШ» установили, что при токарной обработке одной и той же детали при одинаковых режимах резания стойкость МНП значительно отличается в зависимости от производителя (в ряде случаев в 2 раза). В связи с этим остро встал вопрос определения оптимального состава МНП, что в дальнейшем позволит использовать данные заготовки для формирования износостойких покрытий, а это в свою очередь, как уже указывалось ранее, позволит предприятию получить значительный экономический эффект.

В данной работе представлены результаты исследования влияния состава, геометрии и шероховатости МНП на износостойкость инструмента (МНП) при токарной обработке изделий на предприятии ОАО «МЗШ». Первый цикл промышленных испытаний МНП проходил в период с 30.08.2021 по 18.07.2022 на ОАО «МЗШ» Республика Беларусь.

С целью получения объективных результатов, промышленные испытания МНП проводились в равных условиях (табл. 1): одинаковые режимы и условия токарной обработки для всех МНП. Для документирования результатов испытаний в нашем случае на предприятии составлялись акты.

Таблица 1 – Параметры первого этапа промышленных испытаний

Место проведения испытаний	МЦ-1, ОАО «МЗШ»
Оборудование	Токарный станок с ЧПУ H250T DOOSAN
Обрабатываемая деталь	50-1701048А «Шестерня скользящая»
Материал детали	Конструкционная легированная сталь марки 18ХГТ
Операция	Токарная чистовая
	Токарная черновая
Наименование, геометрия пластины	CNMG-120404
	CNMG-120408
	CNMG-120412
	WNMG-080408
	WNMG-080412
Поставляемые производители (стружколом)	LIFA, КНР (PM I, PM II, TM I, CQ)
	JXTC, КНР (GM I, GM II, KR. AMM)
	Betalent, КНР (PM I)
	БТК сплав, РБ (-)
Степень подготовки пластины перед нанесением покрытия	Подготовленная (полированная, скругленная)
	Неподготовленная

Выбор геометрии режущего инструмента обусловлен потребностями ОАО «МЗШ». Для сравнительного анализа использовались базовые результаты испытаний, зарекомендовавших себя в соотношении, цена/качество и постоянно применяемых на ОАО «МЗШ» многогранных непереключаемых пластин производителя SENO (КНР).

Экспериментальные исследования авторами данной работы проводились в несколько этапов. На первом этапе необходимо было установить оптимальный состав заготовок для изготовления МНП, которые в дальнейшем будут использоваться для нанесения износостойкого покрытия. Следует отметить, что на первом этапе пластины не подвергались полировке и не производилось скругление режущих кромок (рис. 1). Данное решение принято с целью снижения количества факторов, влияющих на результаты промышленных испытаний. В качестве параметра для выбора оптимального состава заготовки принята стойкость режущей пластины.

Левшуков А. П.¹, Комаровская В. М.², Саковский В. И.¹

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИИ И ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ МНОГОГРАННЫХ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ
ПЛАСТИН ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА ГРУППЫ ТК**

1. ОАО «Минский завод шестерен», Минск, Беларусь
2. Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

В данной работе приведены результаты промышленных испытаний многогранных неперетачиваемых пластин на ОАО «МЗШ». С целью получения объективных результатов, промышленные испытания проводились в равных условиях: одинаковые режимы и условия токарной обработки для всех МНП. Установлены оптимальные геометрия (радиус скругления режущей кромки 70–90 мкм) и шероховатость поверхности ($Ra = 0,3–0,4$ мкм) многогранных неперетачиваемых пластин. Результатами первого цикла испытаний является значительное увеличение стойкости пластин относительно базового показателя.

В машиностроительной отрасли на ряду с совершенствованием технологий металлообработки актуальной задачей является и увеличение объема производства как в штучном, так и в номенклатурном количестве, и вместе с увеличением объемов производства, прямо пропорционально увеличивается и расход режущих инструментов. Ввиду этого, актуальной задачей является увеличение жизненного цикла режущего инструмента, в том числе с применением современных износостойких покрытий. На ОАО «МЗШ» значительную долю механической обработки занимает токарная (~60 %), при этом в качестве режущего инструмента используются токарные резцы с многогранными неперетачиваемыми пластинами (МНП). Все МНП поставляются на предприятие с износостойкими покрытиями что позволяет увеличить их стойкости и обеспечивает существенный экономический эффект за счет снижения расхода инструмента. Средний расход пластин в год на ОАО «МЗШ» составляет около 6 000 шт., что в денежном выражении составляет около 1 000 000 бел. рублей, средняя доля инструмента в себестоимости изделий достигает ~3 %.

При использовании МНП с покрытиями основными факторами, влияющими на их износостойкость, являются:

– качество подготовки (в том числе и очистки) поверхности. Тут следует отметить, что этап подготовки поверхности предопределяет в первую очередь величину адгезии покрытия с основой. Основными факторами, влияющими на адгезию, являются: шероховатость поверхности инструмента, степень очистки, а также материал инструмента и износостойкого покрытия;

– материал покрытия. Выбор материала покрытия для режущих инструментов в основном зависит от вида обработки, режимов резания (скорость обработки, глубина резания, подача и т. д.) и обрабатываемого материала. Это обусловлено различием в требованиях к выполняемым функциям защитного покрытия;

– режимы формирования покрытия. От режимов нанесения износостойких покрытий зависит адгезия покрытия с основным материалом инструмента (для снижения влияния различия коэффициентов линейного расширения материалов между основой и функциональным покрытием наносят подслои), структура, физико-механические свойства покрытия.

На свойства изделий с покрытиями, в том числе и на износостойкость, также оказывает влияние метод формирования износостойких покрытий.

Не наблюдается корреляционная зависимость между карбидами, микротвердостью и интенсивностью износа после лазерного легирования, что говорит о том, что упрочнение произошло за счет легирования матрицы.

Выводы.

1. Режимы лазерной обработки оказывают значительное влияние на микротвердость упрочненного слоя. Между скоростью перемещения луча лазера и микротвердостью наблюдается положительная корреляция, т. е. максимальное значение микротвердости на поверхности наблюдается при скорости перемещения луча лазера 600 мм/мин и составляет 7900–8200 ГПа.

2. Лазерное легирование оказывает существенное влияние на интенсивность износа. Трение при удельной нагрузке 500 Н приводит к следующим результатам: наименьшее значение интенсивности износа наблюдается при режиме обработки $d = 1$ мм $v = 100$ мм/мин и составляет $0,003$ мм³/км. Наибольшее значение интенсивности износа ($0,04$ мм³/км) наблюдается у необработанного серого чугуна. При нагрузке в 1000 Н наименьшее значение интенсивности износа $0,004$ мм³/км было отмечено при режиме обработки $d = 2$ мм $v = 100$ мм/мин, наибольшее значение – у необработанного серого чугуна ($0,19$ мм³/км).

3. На интенсивность износа в первую очередь оказывает влияние количество твердого раствора. Между интенсивностью износа и микротвердостью не наблюдается корреляционных зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.: ил.
2. Гилев, В. Г. Лазерное инжекционное легирование аустенитного чугуна ЧН16Д7ГХ титаном / В. Г. Гилев, Е. А. Морозов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 3. – С. 44–52.
3. Gilev, V. Laser Quenching Of Axial Bearings In Submersible Multistage Pumps Made Of Steel-Brass Pseudo-Alloy / V. Gilev, E. Morozov, A. Khanov, T. Ablyaz // International Journ. of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 20. – P 40861–40868.
4. Mordike, B. L. Improvement of wear properties by laser surface treatment / B. L. Mordike // Proc. 3d Eurohean Cjnf. Laser Treatment of Materials. ECLAT'90. 2 Vol. Eds. H. W. Bergmann, R/ Kupfer. – Vol. 1. – P. 371–376.
5. Чеканова, Н. Т. Исследование влияния мощного CO₂ – лазера и свойства чугунов, применяемых в автомобилестроении: Дисс. канд. тех. наук. – Завод ВТУЗ при Моск. автом. з-де им. И. А. Лихачева, 1981. – 187 с.
6. Ходаковский, В. М. Особенности лазерного упрочнения чугунных деталей судовых технических средств / В. М. Ходаковский, Е. П. Патенкова // Металлообработка. – 2003. – № 4. – С. 26–29.
7. Сафонов, А. Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением / А. Н. Сафонов // МиТОМ. – 1999. – № 1. – С. 7–10.
8. Диаграммы состояний двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 1 / под общ. ред. Н. П. Лякичева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.: ил.
9. Łyżwa K., Otrzymywanie i badanie właściwości nanoproszkyw azotku glinu, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2011.
10. Feldshtein, Eugene On the Efficiency of Laser Alloying of Grey Cast Iron with Tungsten and Silicon Carbides / Eugene Feldshtein, Oleg Devojno, Justyna Patalas-Maliszewska, Marharyta Kardapolava, Iryna Kosyakova // Materials 2023, 16, 6230. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma16186230>. – Date of access: 30.10.2023.
11. Feldshtein, Eugene On the Microstructure, Microhardnes and Wear Behavior of Gray Cast Iron Surface Layer after Laser Strengthening / Eugene Feldshtein, Oleg Devojno, Szymon Wojciechowski, Marharyta Kardapolava, Iryna Kosyakova // Materials 2022, 15, 1075. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma15031075>. – Date of access: 30.10.2023.

Поступила 30.10.2023

луча 100 мм/мин значительно ниже, чем при скорости перемещения лазерного луча 600 мм/мин. Аналогичная картина наблюдается и для лазерного легирования, т. е. образцы после обработки со скоростью перемещения лазерного луча $v = 100$ мм/мин достигают значительно меньших значений интенсивности износа, чем образцы после обработки со скоростью перемещения лазерного луча $v = 600$ мм/мин. Из рис. 5 видно, что диаметр лазерного луча на интенсивность износа не оказывает значительного влияния.

Лазерное легирование позволило значительно уменьшить интенсивность износа – минимальная интенсивность износа наблюдается после лазерного легирования нитридом алюминия при скорости перемещения луча лазера 100 мм/мин и при диаметре 1 мм и 2 мм, и она составляет $0,003$ мм³/км при интенсивности износа необработанного чугуна $0,04$ мм³/км.

Если сравнить значения микротвердости и интенсивности износа при различных режимах (рис. 1 и 5), то можно увидеть, что режимы, при которых наблюдается максимальная микротвердость, не соответствуют режимам, при которых наблюдается минимальная интенсивность износа. Можно предположить, что на микротвердость и на интенсивность износа оказывают влияние различные структурные состояния упрочненного слоя.

Из рис. 4 и 5 видно, что и на фазовый состав и на интенсивности износа оказывают влияние режимы лазерной обработки, т. е. скорость перемещения луча лазера и диаметр лазерного луча [4].

Основной вопрос исследования – существует ли корреляционная зависимость между интенсивностью износа деталей из серого чугуна после лазерного легирования нитридом и факторами, определяющими их структуру (в основном фазовым составом). Для ответа на этот вопрос был проведен корреляционный анализ полученных результатов. Корреляции между основными оптимизационными параметрами (износостойкостью и микротвердостью покрытий) и факторами, определяющими структуру покрытий, оценивались с помощью программы «Approximator».

Для каждой пары факторов были рассчитаны парные коэффициенты корреляции для всех возможных взаимодействий.

Результаты корреляционных расчетов между структурными параметрами и величиной интенсивности изнашивания приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Корреляционные зависимости между фазовым составом и интенсивностью износа деталей из чугуна после лазерного легирования при нагрузке 500 Н

Фаза и микротвердость	Уравнения корреляции	Коэффициент корреляции
<i>AlN</i>		
твердый раствор Fe	$Y = -0,032 + 0,0013X$	0,99
карбиды	нет	нет
нитриды	$Y = 0,042 - 0,1604/X$	0,87
алюминиды	$Y = 0,0205 - 0,0644/X$	0,91
Al	$Y = 0,0218 - 0,0011X$	0,92
Упрочняющая фаза Микротвердость	$Y = 0,0333 - 6072/X$	0,86
	нет	нет

Можно сделать вывод, что на интенсивность износа в первую очередь оказывает влияние количество твердого раствора, что четко прослеживается в табл. 2. Именно между интенсивностью изнашивания и количеством упрочняющей фазы для нитрида алюминия наблюдается максимальный коэффициент корреляции – 0,99. При этом корреляция положительная, то есть максимальное значение интенсивности изнашивания наблюдается при максимальном количестве упрочненной фазы, что подтверждается на рис. 4 и 5.

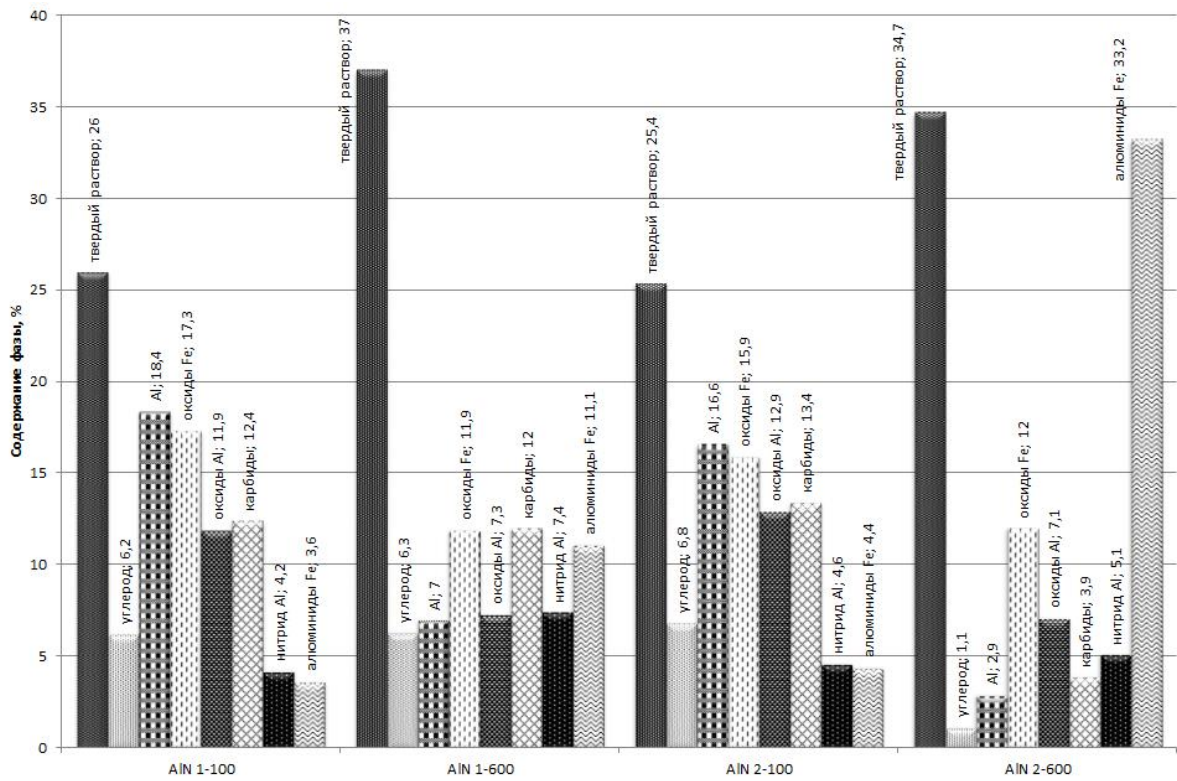


Рис. 4. Фазовый анализ после лазерного легирования нитридом алюминия при различных режимах обработки

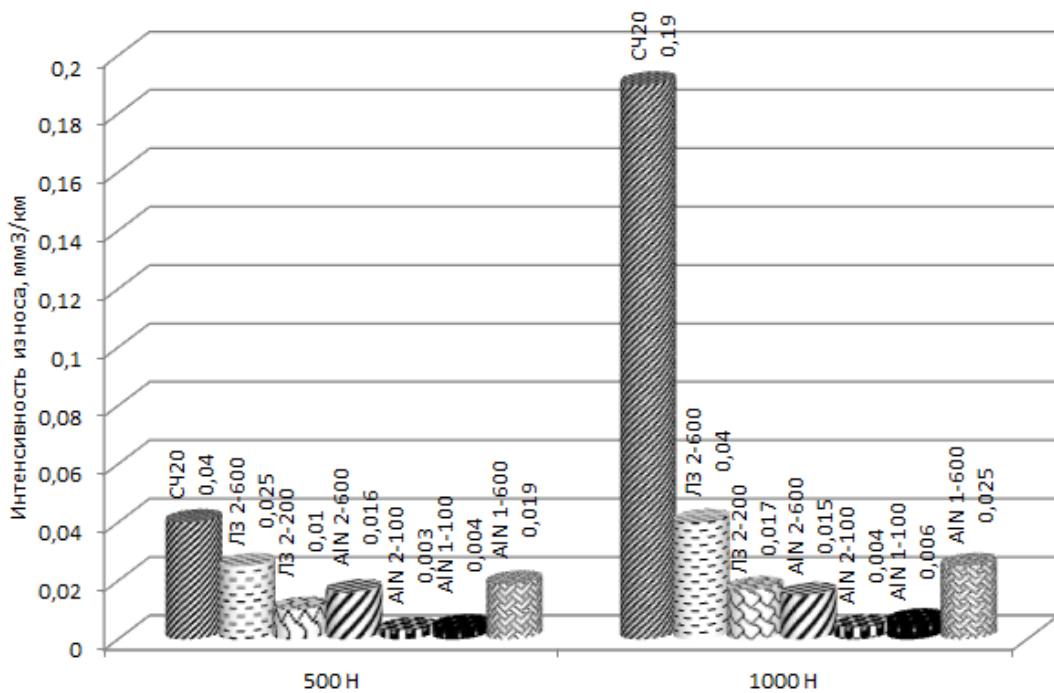


Рис. 5. Диаграмма значений интенсивности износа необработанного чугуна (СЧ20), чугуна после лазерной закалки (ЛЗ) и после лазерного легирования (AIN)

Лазерная закалка уменьшает интенсивность износа и это хорошо видно при высоких нагрузках. Кроме того, интенсивность износа при скорости перемещения лазерного

Как видно из рис. 2 средняя микротвердость в зоне оплавления зависит от скорости перемещения луча лазера. Наибольшая средняя микротвердость наблюдается при скорости перемещения луча лазера 600 мм/мин и составляет 5950,92 МПа.

Так как значение микротвердости коррелируют с режимами обработки, то представляет интерес исследование фазового состава после лазерного легирования при различных режимах обработки. На рис. 3 представлен фазовый состав для серого чугуна в состоянии поставки и после лазерной закалки.

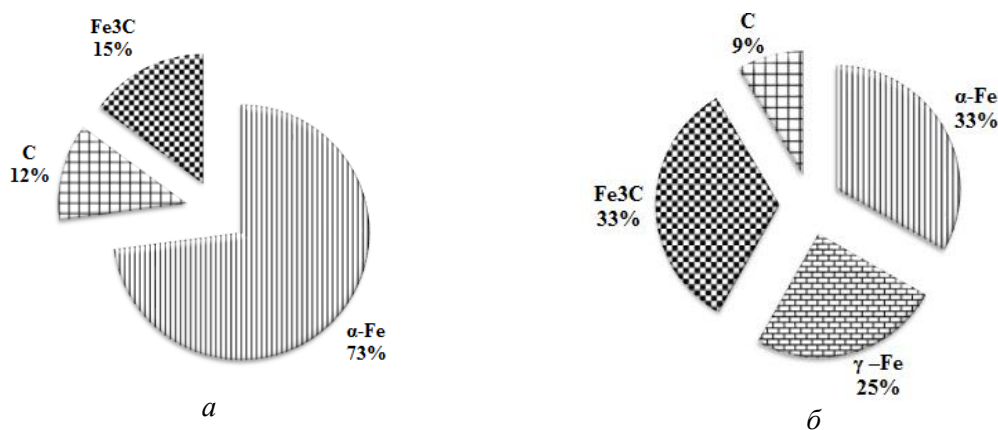


Рис. 3. Фазовый состав чугуна: (а) в исходном состоянии, (б) после лазерной закалки при режимах $V = 100$ мм/мин, $d = 1$ мм

Чугун в состоянии поставки (рис. 3, а) имеет три фазы – α -Fe, цементит и углерод. После лазерной закалки (рис. 3, б), как было выявлено в результате рентгеновского анализа, наблюдаются изменения в содержании основных структурных компонентов – имеются линии γ -Fe, α -Fe, Fe₃C и C, при том, что аустенита в сером чугуне в состоянии поставки вообще не наблюдается. Как было уже доказано [11], количество различных фаз зависит от режимов обработки, например, количество аустенита в серых чугунах после лазерной закалки колеблется в пределах (25–65) %, цементита – (10–45) %, α -Fe – (5–50) %.

Представляет интерес изучить влияние параметров лазерной обработки и легирования на количественный и качественный фазовый состав серого чугуна после лазерного легирования нитридом алюминия, который представлен на рис. 4.

Если сравнить лазерную закалку и лазерное легирование при одинаковых режимах, то можно заметить, что количество твердого раствора, углерода и карбидов меньше при лазерном легировании, чем при лазерной закалке.

Как видно из рис. 4 максимально содержание Al (19 %) и оксидов железа (18 %) наблюдается при минимальной скорости перемещения луча лазера и минимальном диаметре луча лазера ($d = 1$ мм, $v = 100$ мм/мин). При $d = 2$ мм, $v = 100$ мм/мин присутствует максимальное содержание углерода (7 %), карбидов (14 %) и оксидов алюминия (17 %). При увеличении скорости до 600 мм/мин и диаметре лазерного луча 1 мм наблюдается максимальное содержание нитрида алюминия (8 %) и твердого раствора (42 %).

При максимальной скорости обработки и максимальном диаметре лазера ($d = 2$ мм, $v = 600$ мм/мин) получено максимальное содержание алюминидов железа (33 %). При данном режиме обработки также наблюдается максимальная средняя микротвердость в зоне оплавления (рис. 2).

Интенсивность износа при различных режимах лазерного легирования нитридом алюминия (AlN), различных режимах лазерной закалки (ЛЗ) и серого чугуна в состоянии поставки представлена на рис. 5.

В результате исследований были проанализированы влияние режимов лазерной обработки на микротвердость и глубину зоны лазерного воздействия после легирования нитридом алюминия (рис. 1).

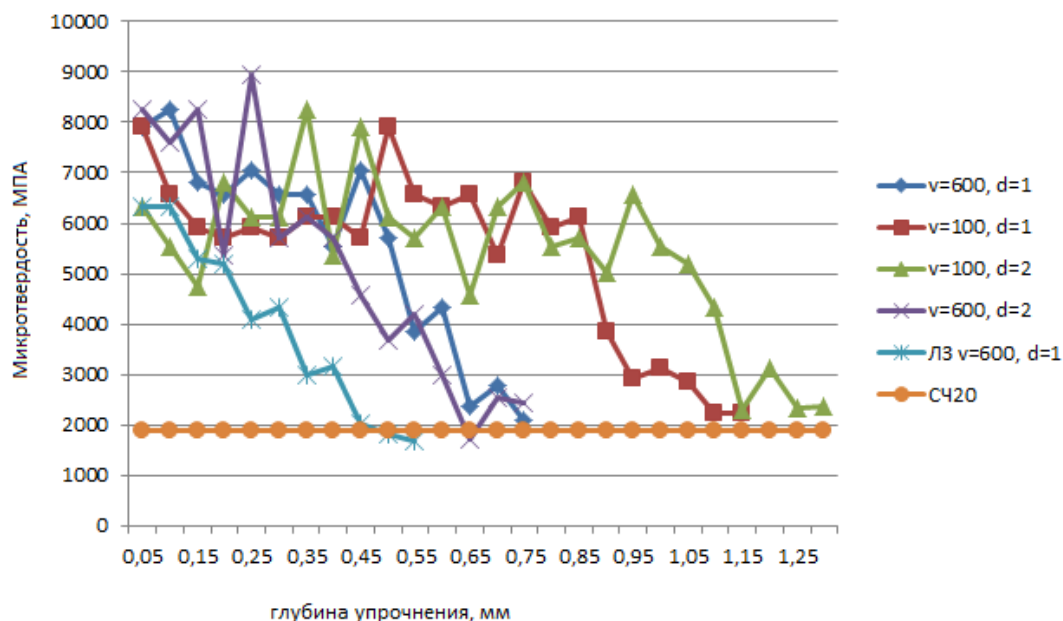


Рис. 1. Зависимость микротвердости и глубины зоны лазерной воздействия после лазерного легирования AlN от скорости и диаметра луча лазера

Как видно из рис. 1, на глубину зоны лазерного воздействия в большей степени влияет скорость перемещения луча лазера. При этом, корреляция отрицательная, т. е. максимальная глубина наблюдается при скорости перемещения луча лазера 100 мм/мин и составляет 1,05–1,2 мм. Между скоростью перемещения луча лазера и микротвердостью наблюдается положительная корреляция, т. е. максимальное значение микротвердости на поверхности наблюдается при скорости перемещения луча лазера 600 мм/мин и составляет 7900–8200 ГПа. График зависимости средней микротвердости в зоне оплавления от режимов обработки представлен на рис. 2.

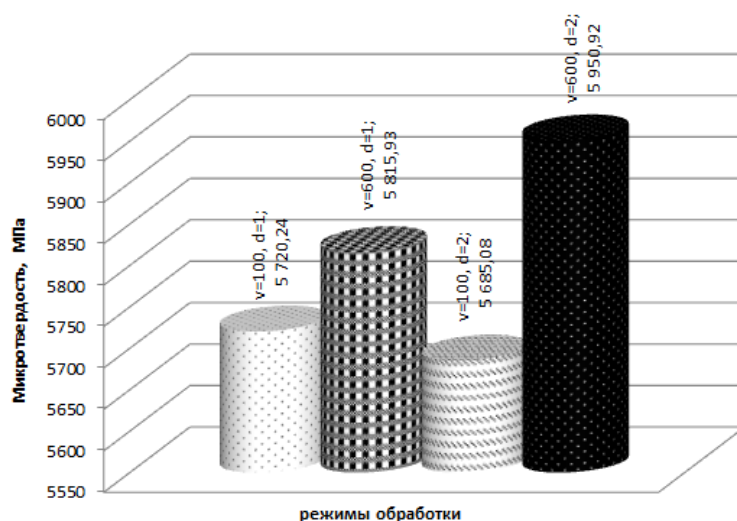


Рис. 2. Зависимость средней микротвердости в зоне оплавления от режимов обработки

Одним из эффективных способов поверхностного упрочнения чугунных деталей является лазерная закалка [3–4]. Однако, значительное повышение свойств поверхностного слоя можно достигнуть лазерным легированием, предусматривающим введение легирующих компонентов в процессе лазерного переплава поверхности. Оно обеспечивает формирование композиционного поверхностного слоя, включающего легированную матрицу с равномерно распределенными твердыми составляющими. Применительно к изделиям из серого чугуна доказана эффективность лазерной обработки с оплавлением поверхности и с добавлением легирующих компонентов, однако, такие исследования носят фрагментальный характер [5–6]. Для непосредственного применения и разработки технологических процессов поверхностного упрочнения чугунных деталей необходимо изучить влияние каждого технологического параметра процесса лазерного легирования на структуру поверхностного слоя, его физико-механические и эксплуатационные характеристики. Информация, полученная в результате этих исследований, позволит выявить механизмы формирования износостойкого слоя и установить связь между параметрами лазерной обработки и трибологическими свойствами.

Целью работы является изучение фазового состава и трибологических свойств деталей из серого чугуна после лазерного легирования нитридом алюминия в условиях трения со смазочным материалом.

В качестве исходного материала использовали серый чугун СЧ20. Он имеет перлитно-ферритную микроструктуру и содержит в %: 3,10–3,40 С, 1,90–2,30 Si, 0,60–0,90 Mn, $\leq 0,15$ % P и S. Серый чугун СЧ20 имеет твердость в состоянии поставки 170–210 HB, предел прочности при растяжении 200 МПа, предел прочности при сжатии 800 МПа и напряжение сдвига 230 МПа.

В качестве легирующего компонента использовали порошковый нитрид алюминия грануляцией 20 мкм, так как он по диаграмме двойных сплавов с железом образует металлические соединения – алюминиды железа, ограниченный твердый раствор как со стороны Fe, так и Al и соединения AlN [8]. Нитрид алюминия характеризуется очень высокой механической прочностью, высокой твердостью (около 12 ГПа) и высокой температурой плавления (2200 °C) [9].

Взаимное влияние диаметра лазерного луча и скорости плавления оценивалось с помощью 2²-факторной схемы, при диаметре луча лазера 1 мм и 2 мм и скорости перемещения лазерного луча 100 мм/мин и 600 мм/мин. Коэффициент перекрытия составлял 1,0. Легирующие компоненты наносились на поверхность чугуна в виде обмазки. После высыхания ее толщина составляла 0,1–0,05 мм.

Исследования микротвердости проводили на приборе ПМТ-3. Исследования интенсивности изнашивания при различных условиях нагружения при трении со смазкой провели на машине трения типа Amsler A–135 по PN-79/H-04329 по схеме «ролик (закаленная сталь 45) – плоский образец с покрытием». Рентгеновские съемки производили на дифрактометре ДРОН 3.0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении в максимально возможном интервале углов от 10° до 75° для качественного и количественного фазового анализа. Результаты рентгеноструктурного анализа были обработаны с помощью программного обеспечения ARSANAL («Автоматизация обработки результатов рентгеноструктурного анализа»).

Результаты и обсуждение. В результате предыдущих исследований [10] было установлено, что после лазерной закалки микротвердость серого чугуна увеличилась в 3,2–3,4 раза, а после лазерного легирования нитридом алюминия – в 5,5–7,9 раз. Поэтому, можно утверждать, что лазерное легирование, в сравнении с лазерной закалкой, является более эффективным способом поверхностного упрочнения для деталей из серого чугуна.

1000 H преимущество легирования очень велико: при применении карбида хрома (Cr_3C_2) – в 15–20 раз, а при применении карбида вольфрама (WC) – даже в 20–30 раз.

При лазерном легировании карбидом вольфрама увеличение скорости лазерного излучения снижает интенсивность изнашивания, а при легировании карбидом хрома (Cr_3C_2) – увеличивает. При низкой скорости лазерного излучения часть карбидов вольфрама растворяется в бронзовой матрице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Devojno O. G., Feldshtein E., Kardapolava M. A., Lutsko N. I. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze. Surf Coat Technol 2019; 358:195–206. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.014>. – Date of access: 13.11.2023.

2. Shah P., Khanna N., Zadafiya K., Bhalodiya M., Maruda R. W., Krolczyk G. M. In-house development of eco-friendly lubrication techniques (EMQL, Nanoparticles + EMQL and EL) for improving machining performance of 15–5 PHSS. Tribol Int 2020; vol. 151:106476.

3. Sirin S., Akincioğlu S., Gupta M. K., Kivak T., Navneet K. A. Tribological performance of vegetable-based oil combined with GNPs and hBN nanoparticles on the friction- wear tests of titanium grade 2. Tribol Int 2023; vol. 181. Article number 108314.

4. Yin T. Y., Zhang S., Wang Z. Y., Zhang C. H., Liu Y., Chen J. Effect of laser energy density on microstructural evolution and wear resistance of modified aluminum bronze coatings fabricated by laser cladding. Mater Chem Phys 2022;285:126191. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126191>. – Date of access: 13.11.2023.

5. Chand R., Sharma V. S., Trehan R., Gupta M. K., Sarikaya M. Investigating the dimensional accuracy and surface roughness for 3D printed parts using a multi-jet printer. J Mater Eng Perform 2023;vol. 32(Issue 3):1145–59.

6. Airao J., Nirala C. K., Bertolini R., Krolczyk G. M., Khanna N. Sustainable cooling strategies to reduce tool wear, power consumption and surface roughness during ultrasonic assisted turning of Ti-6Al-4V. Tribology Int 2022; Volume 169:107494.

Поступила 13.12.2023

УДК 621.793

Косякова И. М., Кардаполова М. А.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НИТРИДОМ АЛЮМИНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Изучено влияние параметров лазерной закалки и легирования нитридом алюминия деталей из серого чугуна на интенсивность износа в условиях со смазочным материалом. Исследованы изменения фазового состава покрытий в зависимости от режимов обработки, а также влияние фазового состава на интенсивность износа.

Одним из широко применяемых материалов в машиностроении является серый чугун. Широкое применение он нашел благодаря своим хорошим литейным свойствам и относительно невысокой стоимости. Однако возникает необходимость в упрочнении поверхностного слоя чугунных деталей [1–2].

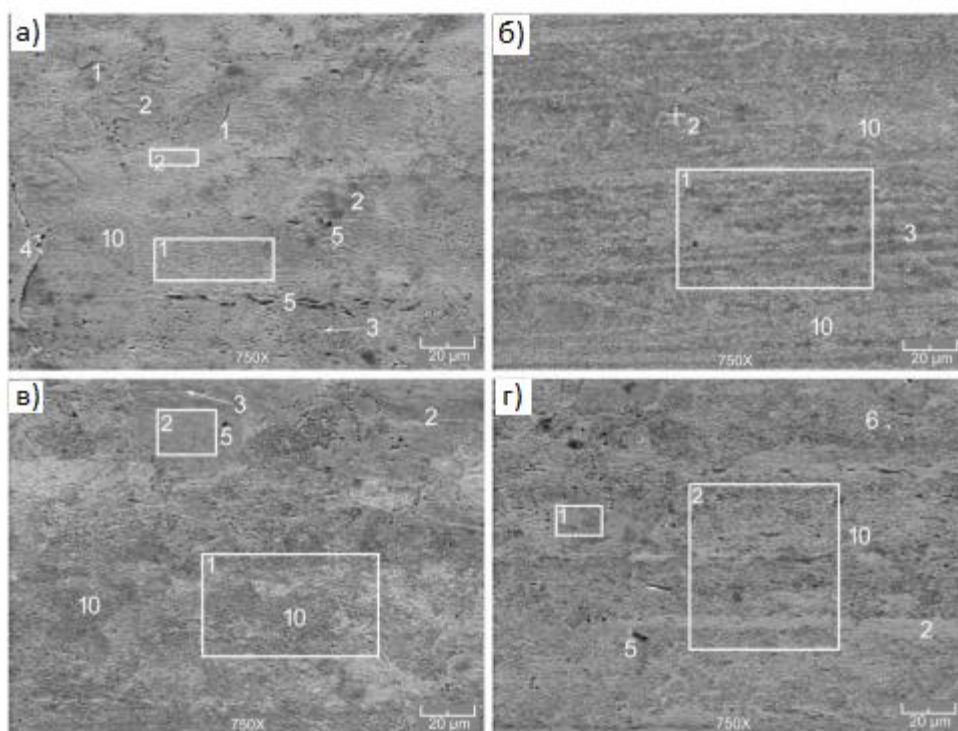


Рис. 8. Изображения изношенных поверхностей, сформированных лазерным легированием карбидами хрома (Cr^3C^2) при различных параметрах лазерной обработки:
a – 100 мм/мин, 1 мм²; *б* – 300 мм/мин, 1 мм²; *в* – 100 мм/мин, 3 мм²; *г* – 300 мм/мин, 3 мм²

Обобщая описанные РЭМ-анализ, можно сделать вывод, что лазерное легирование бронзы твердыми частицами карбидов металлов при лазерном переплаве поверхностного слоя серьезно изменяет свойства и микроструктуру этого слоя. Значительные изменения происходят в процессе трения на изнашиваемых поверхностях. На бронзовых поверхностях формируется губчато-капиллярная текстура с одновременной притиркой и выглаживанием стальных поверхностей. Эти эффекты при дополнительном положительном влиянии смазочного масла, находящегося в микроозерах губчато-капиллярной текстуры, обеспечивают многократное снижение интенсивности изнашивания и могут рассматриваться как основа для дальнейшего научного и практического применения.

Выводы.

В данной работе описано поведение при износе бронзы БрА7Н6Ф, полученной лазерным переплавом и легированной карбидами вольфрама (WC) и карбидами хрома (Cr_2C_3). По результатам исследования можно сформулировать следующие выводы.

Микротвердость уменьшается пропорционально расстоянию от переплавленной поверхности, а глубина упрочнения составляет $\sim 0,3$ мм. Глубина изменения микротвердости практически не зависит от скорости лазерного излучения. Упрочнение карбидами вольфрама (WC) выше на $\sim 10\%$ по сравнению с упрочнением карбидами хрома (Cr_3C_2).

Параметры лазерного легирования практически не влияют на мгновенные коэффициенты трения, которые составляют 0,1–0,12 при нагрузках 500 Н и 1000 Н. Температуры в зоне трения стабильны и невелики, однако при нагрузке 1000 Н они существенно возрастают, достигая ~ 130 °С.

В зависимости от условий лазерного переплава интенсивность изнашивания снижается в 1,3–6,8 раза по сравнению с той, которая достигается при плазменном напылении.

По сравнению с плазменным напылением лазерное легирование твердыми карбидами гораздо эффективнее. При нагрузке 500 Н он имеет преимущество до 5–6 раз, а при нагрузке

100 мм/мин и площади лазерного пятна 3 мм², что видно на рис. 7, в. При других условиях легирования значение плотности энергии лазерного пятна не обеспечивает полного растворения карбидов вольфрама. Их присутствие на поверхностях трения очень велико (рис. 7, а, б, г), а интенсивность изнашивания легированной бронзы низкая, как это было показано на рис. 7, б. В большинстве исследованных случаев микротрещины *T* (1) на изношенных поверхностях отсутствуют, за исключением рисунка 7, г. Поры (5) также присутствуют независимо от значений параметров обработки, а при высоких значениях площади пятна независимо от скорости излучения наблюдаются небольшие области пластификации (2).

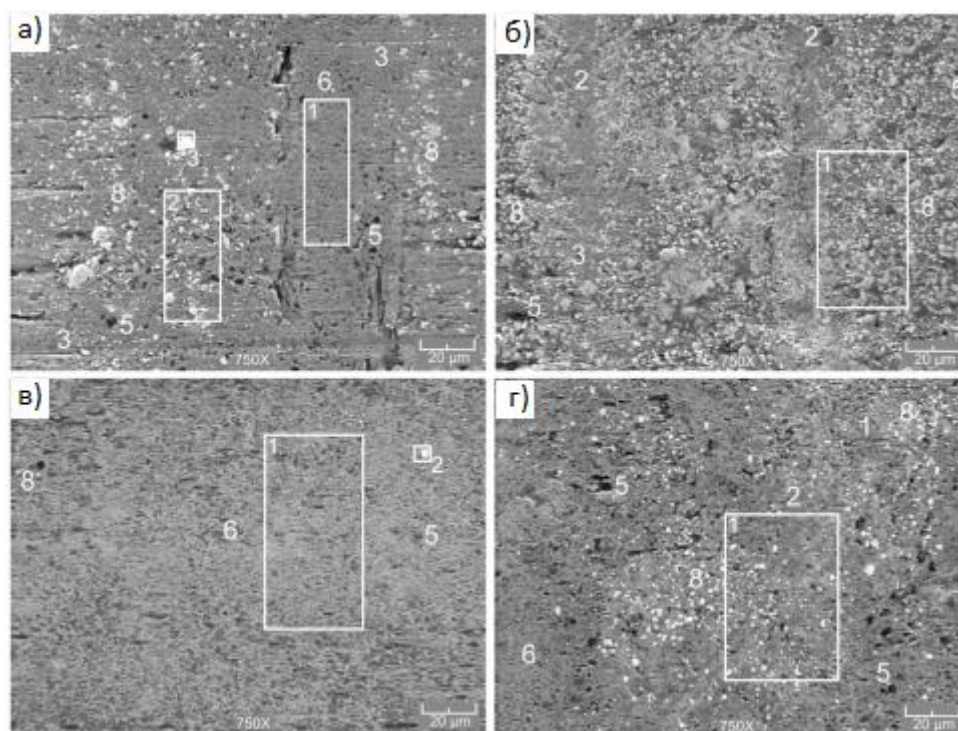


Рис. 7. Изображения изношенных поверхностей, образованных лазерным легированием карбидами вольфрама (WC) при различных параметрах лазерной обработки: а – 100 мм/мин, 1 мм²; б – 300 мм/мин, SLS 1 мм²; в – 100 мм/мин, 3 мм²; г – 300 мм/мин, 3 мм²

Изношенные поверхности образцов после лазерного легирования карбидами хрома показаны на рис. 8. В отличие от легирования карбидами вольфрама, карбиды хрома (10) на изношенных поверхностях значительно уменьшаются. При этом независимо от условий легирования наблюдаются микротрещины (1) и текстурная пластическая деформация (2) участков изношенной поверхности. Присутствуют очень мелкие интерметаллические соединения (единичные следы 3), а также поры (5).

Единичные карбиды хрома были зарегистрированы в порах бронзовой матрицы, как это видно на рис. 8, б, область 2 и рис. 8, г. Размеры карбидов хрома (Cr_3C_2) значительно меньше размеров карбидов вольфрама (WC), что подтверждает растворение первых в бронзовой матрице; изношенные поверхности равномерно окислены; в зону трения впитываются молекулы масла, содержащие серу.

При меньших плотностях энергии (рис. 6, *з*), то есть при минимизации адгезионных изменений, наблюдается губчато-капиллярная текстура. Однако при минимальной плотности энергии на поверхности износа наблюдаются две зоны: зона с губчато-капиллярной текстурой и зона очень гладких полос. Однако при этом появляются довольно крупные обломки и микротрещины (рис. 6, *е*), а также толстый след траектории движения зерен интерметаллида).

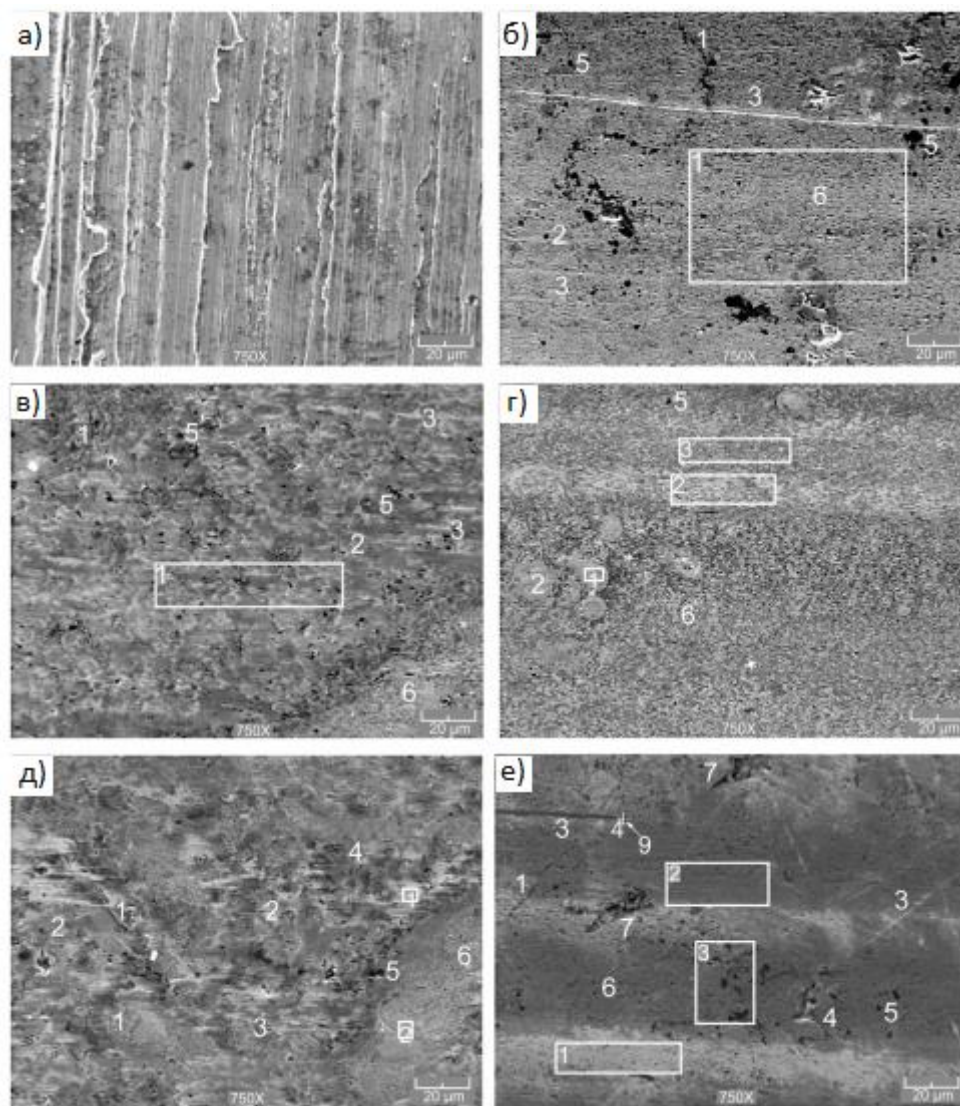


Рис. 6. Изображения поверхности после шлифования (*а*) и изношенных поверхностей, сформированных плазменным напылением (*б*) и лазерным переплавом при различных параметрах лазерной обработки: *в* – 100 мм/мин, 1 мм²; *з* – 300 мм/мин, 1 мм²; *д* – 100 мм/мин, 3 мм²; *е* – 300 мм/мин, 3 мм²

Изношенные поверхности образцов после лазерного легирования карбидами вольфрама показаны на рис. 7. В целом заметно присутствие карбидов вольфрама (WC) (8) при различных условиях трения, но при малой площади лазерного излучения и высокой скорости большая часть карбидов растворяется в бронзовой матрице (рис. 7, *в*). В то же время при различных значениях параметрах лазерной обработки выявляется наличие губчато-капиллярного эффекта (6). Наиболее ярко это явление проявляется при скорости

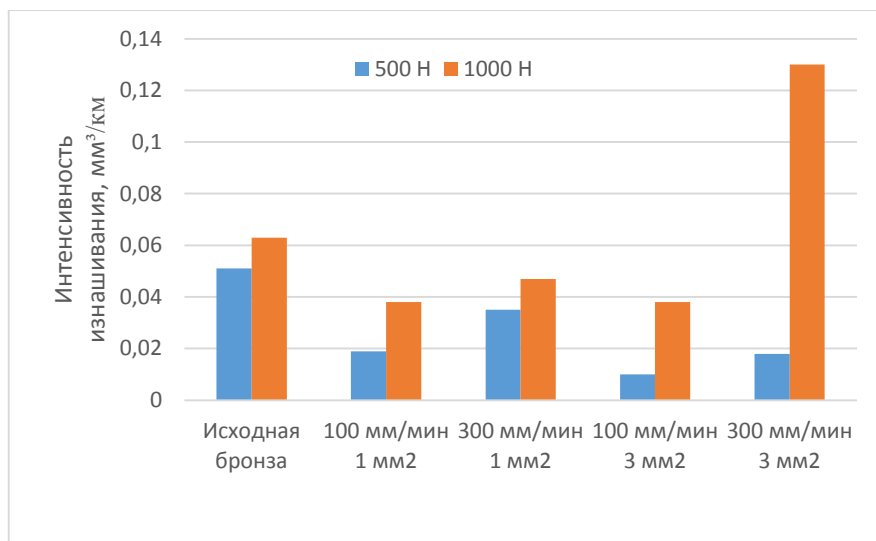


Рис. 5. Значения скорости изнашивания бронзы, напыленной плазмой и переплавленной лазером, при нагрузках 500 и 1000 Н

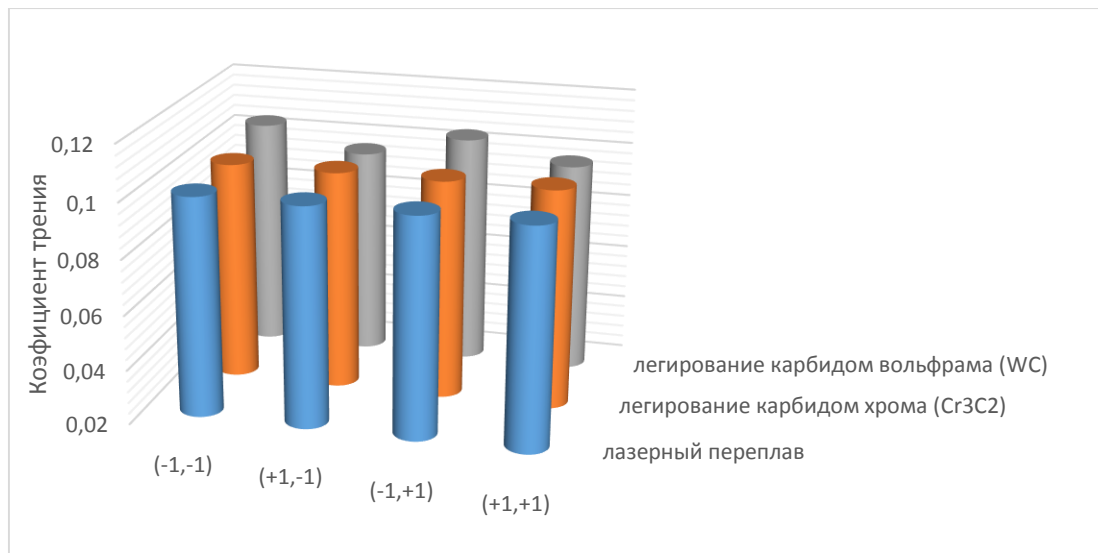
Анализ изменения интенсивности изнашивания позволяет сделать вывод, что по сравнению с плазменным напылением лазерный переплав с последующим лазерным легированием твердыми карбидами значительно эффективнее. При нагрузке 500 Н легирование твердыми сплавами имеет преимущество до 5–6 раз независимо от параметров обработки и вида упрочняющих частиц. Нагрузка 1000 Н является тяжелой. В этих условиях преимущество легирования очень велико: при использовании карбидов хрома (Cr_3C_2) оно составляет 15–20 раз, а при использовании карбидов вольфрама (WC) – даже 20–30 раз.

Выше было сказано, что на интенсивность изменения условий трения большое влияние оказывает плотность энергии лазерного пятна. Этот фактор отвечает за скорость теплового потока через поверхностный слой и возможные фазово-структурные превращения.

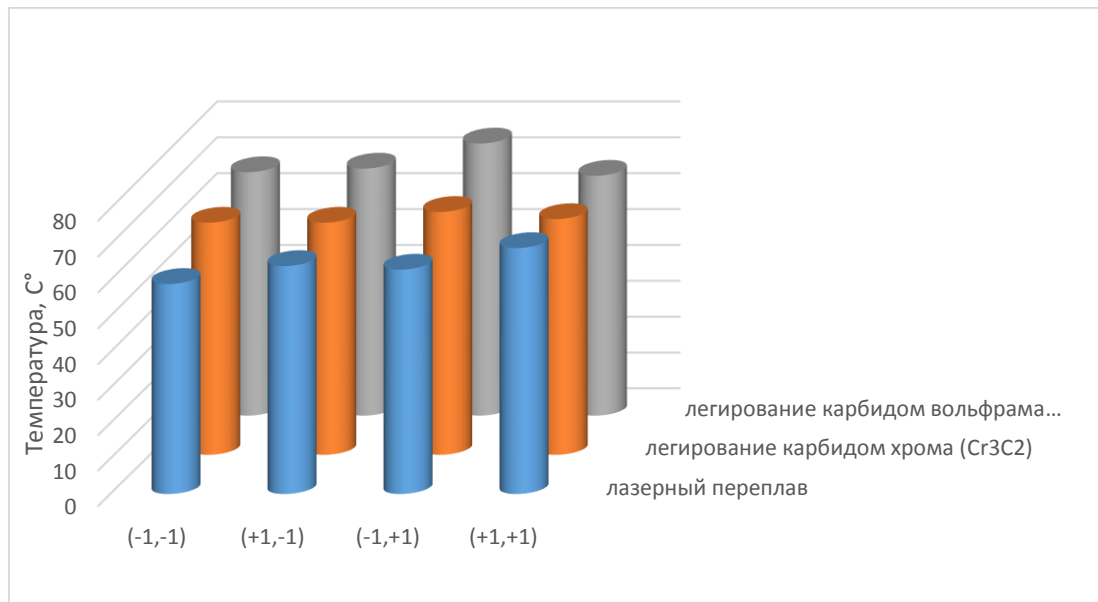
РЭМ-анализ поверхности. Наблюдения за скоростью изнашивания образцов и коэффициентами трения подтверждались изменениями в поверхностном слое изношенных поверхностей исследуемых образцов. Следует отметить, что эксплуатационные и функциональные свойства целостности поверхности в значительной степени зависят от входных параметров технологических процессов [5; 6]. РЭМ-анализ проводился для образцов, испытанных под нагрузкой 1000 Н, поскольку все физико-химические процессы проявляются более интенсивно при больших механических нагрузках и, как следствие, более высоких температурах.

Для характеристики микроструктуры на рис. 6–8 использованы следующие обозначения: 1 – микротрещины; 2 – пластификация; 3 – треки интерметаллидов; 4 – отслоение; 5 – поры; 6 – пористо-капиллярная текстура; 7 – обломки; 8 – карбиды вольфрама (WC); 9 – интерметаллидное зерно; 10 – карбиды хрома (Cr_3C_2).

Импульсное лазерное пятно удаляет или уменьшает размеры микротрещин и закрывает мелкие поры. В исследованном диапазоне параметров лазерной обработки можно выделить два случая формирования морфологии изношенных поверхностей. В одном из них наблюдается преобладание более или менее однородных слоев в виде связанных между собой отдельных участков (рис. 6, в, д). В этих областях можно выделить усиление адгезии, а также появление заломов. Это характерно для меньшей скорости лазерного излучения, 100 мм/мин, независимо от значений площади лазерного пятна. В результате адгезионного разрушения поверхности переплавленной бронзы наблюдается отслоение поверхностного слоя и его шелушение, а абразивный износ практически отсутствует.



а



б

Рис. 4. Влияние параметров лазерной обработки на трибологические свойства (коды 1, -1 и т. д. соответствуют данным табл. 3)

Изменения трения и интенсивности изнашивания являются не только следствием изменения рельефа поверхности. В зависимости от особенностей трибосистемы они включают также изменения состава поверхностного слоя и микроструктуры. Важную роль в этих явлениях играет плотность энергии лазерного пятна [4].

Оценка скорости изнашивания. Результаты сравнения скорости изнашивания покрытий с различными условиями лазерного переплава приведены на рис. 5. В зависимости от условий лазерного переплава скорость изнашивания снижается в 1,3–6,8 раза по сравнению с результатами, полученными для образцов, изготовленных плазменным напылением (исходное состояние испытуемых покрытий).

Контактные поверхности образцов и контртел перед трибологическими испытаниями шлифовались для получения требуемой шероховатости в парах трения. Измерения параметров шероховатости поверхности повторялись 3 раза для определения статистических погрешностей. Было установлено следующее: значения параметра Ra для образцов после лазерного переплава варьировались в диапазоне 0,53–0,61 мкм (разброс 13 %), а Rz – 2,20–2,70 мкм (разброс 18 %). После легирования карбидами вольфрама (WC) значения параметра Ra изменялись в диапазоне Ra 0,41–0,52 мкм (18 % рассеяния), а Rz 1,74–2,0 мкм (13 % рассеяния). После легирования карбидами хрома (Cr_3C_2) значения параметра Ra изменялись в диапазоне 0,53–0,61 мкм (21 % рассеяния), а Rz 2,20–2,70 мкм (13 % рассеяния). Наблюдаемые изменения шероховатости аналогичны изменениям в случаях лазерного легирования другими твердыми частицами [1]. Довольно значительные вариации контролируемых значений обусловлены наличием пор, отдельных задиров и других дефектов, возникающих при шлифовании. Значения параметров шероховатости контртел из закаленной стали были стабильны и равны Ra 0,35–0,38 мкм и Rz 1,1–1,2 мкм (рассеяние ~8 %).

Результаты исследования. Микротвердость и трибологическая оценка. Результаты испытаний на микротвердость приведены на рис. 3. Видно, что значения микротвердости $HV100$ уменьшаются пропорционально расстоянию от переплавленной поверхности и глубина упрочнения составляет ~0,3 мм. Глубина изменения микротвердости после лазерного легирования составляет около 0,6 мм, причем эти изменения практически не зависят от скорости лазерного излучения. Упрочнение слоя, легированного карбидами вольфрама (WC) больше на ~10 % по сравнению с упрочнением карбидами хрома Cr_3C_2 по глубине легирования и они выравниваются в «зоне термического влияния», размер которой составляет ~0,4–0,5 мм.

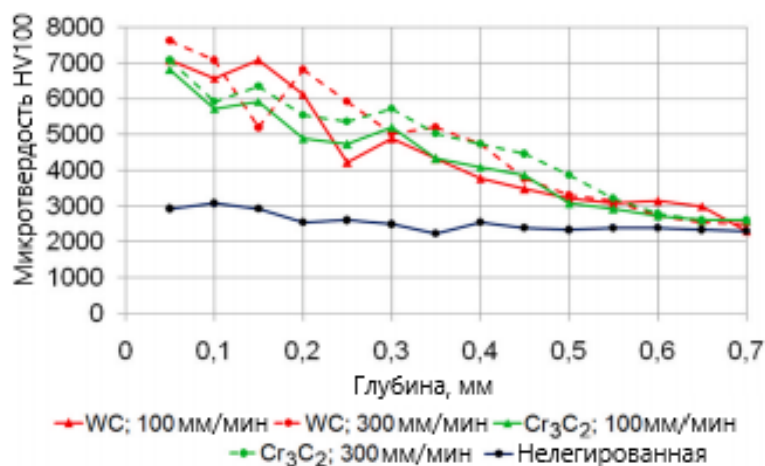


Рис. 3. Изменение распределения микротвердости в зависимости от условий лазерной обработки

На следующем этапе была проведена характеристика коэффициентов трения, которая является одним из основополагающих факторов при характеристике трибологических свойств [2; 3]. Исследования процесса трения после лазерной обработки под нагрузкой 500 Н показали, что параметры армирования не оказывают существенного влияния на значения мгновенных коэффициентов трения и температур в зоне трения, как это показано на рис. 4. Важно также отметить, что значения температур под нагрузкой 1000 Н увеличиваются в 1,5–1,8 раза, достигая ~130 °С, а значения коэффициентов трения остаются практически неизменными. Указанные детали отличаются от других исследований.

В качестве материала подложки использовалась сталь 45. Для легирования поверхностного слоя использовались твердые керамические частицы карбида вольфрама WC и карбида хрома Cr_2C_3 (рис. 2). Размер частиц составлял 2–50 мкм, несколько более крупных конгломератов были удалены механическим просеиванием.

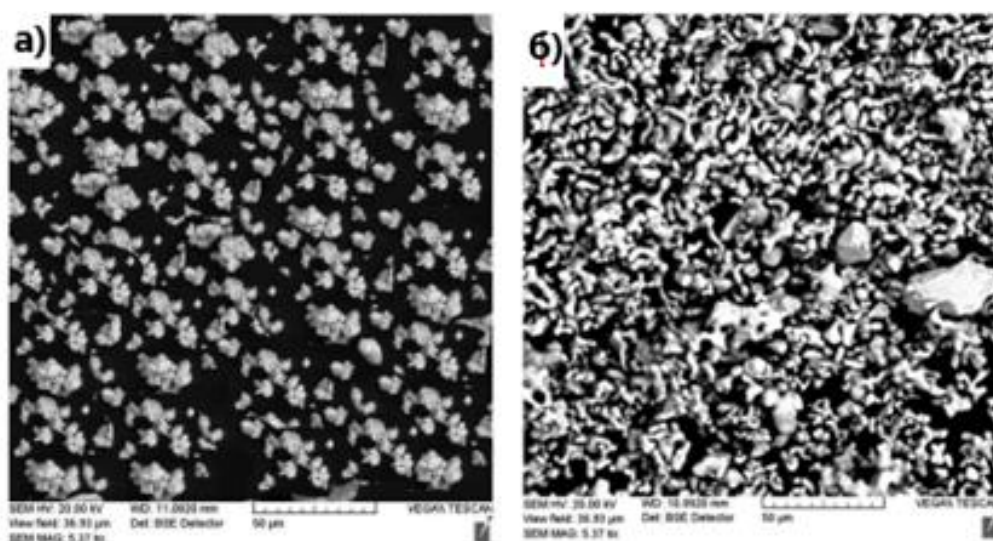


Рис. 2. Используемые твердые частицы:
 а – карбид вольфрама (WC); б – карбид хрома (Cr_3C_2)

Перед нанесением покрытия поверхность образцов была предварительно обработана дробеструйным методом. Нанесение бронзового слоя осуществлялось с помощью плазмотрона ПП-25. Ток дуги составлял 200 А, рабочее напряжение – 90–100 В. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался технический азот. Расход плазмообразующего газа составлял 2,5 м³/ч, транспортирующего – 0,020–0,025 м³/ч. Толщина слоя покрытия составляла 0,6–0,7 мм. Расстояние от сопла плазмотрона до напыляемой поверхности составляло 120 мм. В указанных условиях был достигнут коэффициент расхода порошка 83–86 %, а производительность составила около 7 кг/ч.

Сравнивались три вида лазерных покрытий: бронза после лазерного переплава, бронза упрочненная карбидами вольфрама WC , и бронза упрочненная карбидами хрома Cr_2C_3 . Эти частицы наносились на поверхность напыленного вида покрытия в виде шликера. Толщина слоя шликера составляла около 0,1 мм, в качестве связующего использовался клей БФ-2.

Лазерная обработка проводилась с помощью волоконного иттербиевого лазера YLR-2000 мощностью 2 кВт и длиной волны излучения 1,064 мкм. Размеры и скорости прямоугольного пятна лазера использовались в соответствии с полным факторным экспериментом 2² типа (табл. 3).

Таблица 3 – Параметры лазерной обработки

Скорость лазерного пятна, мм/мин		Площадь лазерного излучения		
Значение	Код	Размер	Площадь	Код
100	–1	2×0,5	1	–1
300	1	2×0,5	1	–1
100	–1	3×1	3	1
300	1	3×1	3	1

лиз особенностей трибологического поведения бронзовых покрытий при высоких нагрузках. Кроме того, слишком мало информации дается об изменении трибологических характеристик во времени, о детализации микродефектов на поверхностях трения, о поведении твердых упрочняющих частиц, вводимых в поверхностный слой бронзы, и т. д. Недостаточно информации и о деталях изношенных поверхностей контртел.

Целью данного исследования стал анализ особенностей эксплуатации бронзовых покрытий после армирования карбидами вольфрама (WC) и карбидами хрома (Cr_2C_3) с помощью иттербиевого волоконного лазера. В работе отражены характеристики механизмов износа и целостности поверхности бронзовых покрытий БрА7Н6Ф, изготовленных с различными исходными параметрами. Решение этих вопросов важно как для развития научных знаний в области функционально-эксплуатационных свойств твердых покрытий, так и для их практического применения.

Методика исследования. В качестве базового материала покрытия использовалась бронза БрА7Н6Ф. Материал имеет двухфазную структуру (рис. 1, а), состоящую из (α) твердого раствора (раствор Al и Ni в Cu) и ($\alpha + \gamma'$) эвтектоидов, представляющих собой смесь (α) фазы и γ' – твердого раствора на основе соединения $Cu_{32}Al_{19}$ со сложной кубической решеткой. В табл. 1 приведен химический состав, а в табл. 2 – механические свойства бронзы БрА7Н6Ф.

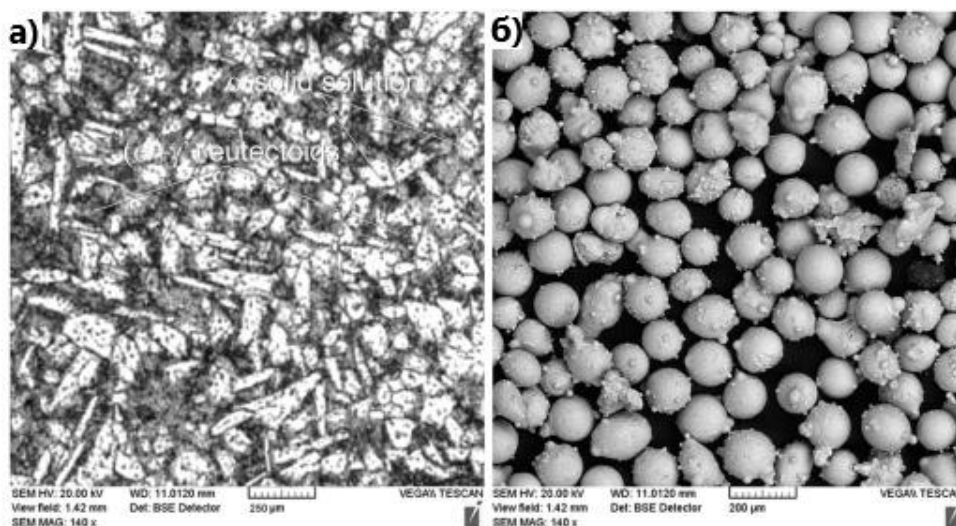


Рис. 1. Микроструктура исследуемой бронзы (а) и частицы в исходном состоянии (б)

Таблица 1 – Химический состав БрА7Н6Ф

Элемент	Al	Ni	P	Cu
Содержание, %	7	5,5	1,2	остальное

Таблица 2 – Механические свойства БрА7Н6Ф

Твердость, HRB	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
92,0–97,0	640–725	330–380	760

Для нанесения покрытия использовались частицы размером 80–100 мкм (рис. 1, б). Было установлено, что в этом случае не возникает проблем с их прилипанием и засорением сопла плазмотрона, а также с их неравномерным нагревом в плазменном потоке.

Таким образом, применение искусственного интеллекта в машиностроении позволяет повысить производительность, снизить затраты на производство и уменьшить количество ошибок в процессе работы. Это также дает возможность предсказать, какие материалы и оборудование нужны для оптимальной работы производственной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экономика и организация производства: пособие для студентов / Л. М. Короткевич [и др.]; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Инженерная экономика». – Минск : БНТУ, 2021. – 55 с.

2. Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Организация подготовки производства» для направления специальности 1-27 01 01-08 Экономика и организация производства (приборостроения) [Электронный ресурс] / Белорусский национальный технический университет, кафедра дисциплине «Инженерная экономика»; сост.: Н. В. Зеленковская [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023.

Поступила 30.11.2023

УДК 621.793.72:533

Кардаполова М. А., Касач Ю. И., Косякова И. М.

К ВОПРОСУ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МЕДИ, УПРОЧНЕННОГО ВЫСОКОТВЕРДЫМИ КАРБИДАМИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье исследован процесс покрытий в условиях граничного трения со смазкой на основе бронзы БрА7Н6Ф, полученных гибридным методом: сочетанием плазменного напыления и лазерной обработки с дополнительным легированием шликера карбидами вольфрама (WC) и карбидами хрома (Cr₃C₂). Исследовалось влияние параметров лазерного излучения (скорость лазерного и площадь лазерного луча) при контактных нагрузках 500 Н и 1000 Н. Показана эффективность лазерного легирования и с помощью электронной микроскопии изменение микроструктуры поверхности после изнашивания в виде образования на бронзовых поверхностях губчато-капиллярной текстуры с одновременным выглаживанием стальных поверхностей.

Введение. Лазерное легирование поверхностей с использованием добавочных легирующих соединений в настоящее время является эффективным процессом обработки поверхностей. В процессе лазерного легирования происходит модификация поверхностного слоя различными соединениями за счет их добавления в расплав. Тонкий слой соединения предварительно наносится на подложку, затем расплавляется и интенсивно перемешивается под воздействием лазерного луча, а при затвердевании образуется новый поверхностный слой с заданными свойствами.

Модифицирование поверхностного слоя деталей трения твердыми частицами по-прежнему остается передовым направлением лазерной обработки поверхности, а сплавы на основе меди находят широкое применение в промышленности. Однако имеющиеся данные о деталях технологии лазерного легирования и эксплуатационной эффективности этого процесса недостаточно систематизированы. В частности, отсутствует глубокий ана-

и квалификации исполнителей. Для этого этапа необходимы: многоагентные системы способные одновременно к многозадачности, обработке больших объемов информации и оптимизации; трансформирующие системы, ориентированные на оценку и достижение результатов, человеческие ресурсы как инструмент достижения результата; компьютерное зрение, обеспечивающее обработку и анализ изображений или видео и др.

Организационная подготовка включает в себя планирование и организацию всех видов ресурсов и действий, которые необходимы для эффективного функционирования производственных процессов. На этой стадии выполняется анализ рынка и потребностей потребителей, осуществляется планирование всех производственных ресурсов. Внедрение искусственного интеллекта позволяет исключить недостаток информации, отслеживать изменения в работе оборудования и своевременно выявлять технические проблемы (неисправность оборудования, технические сбои и т. д.), определять потребность в ресурсах.

Внедрение искусственного интеллекта в подготовку производства связано не только со стремлением к научно-технологическому прогрессу, но и со стремлением достичь повышения производительности труда и качества готовой продукции, снизить трудоемкость и затраты на производство и реализацию продукции.

Оценить эффект от внедрения искусственного интеллекта в подготовку производства практически невозможно. Один из существующих на данный момент методов – имитационное моделирование, реализованное через метод Монте–Карло. Данный подход ориентирован на создание модели и ее многократную проверку; сбор, обработку и анализ статистических данных. Критериями оценки выступают расходы и доходы от внедрения объектов искусственного интеллекта в подготовку производства. Основопологающими является также такие критерии как снижение трудоемкости и затрат на производство продукции.

Организационно-экономический эффект от применения искусственного интеллекта при подготовке производства в машиностроении представлен в табл. 1 [2].

Таблица 1 – Организационно-экономический эффект от применения искусственного интеллекта при подготовке производства в машиностроении

Наименование искусственного интеллекта	Организационно-экономический эффект			
	повышение производительности	снижение трудоемкости	снижение затрат	повышение качества
Система контекстной помощи				
Технологии виртуальной и дополненной реальности				
Рекомендательные системы				
Интеллектуальные системы				
Многоагентные системы				
Компоненты робототехники и сенсорики				
CASE-технологии				
Компонентная технология				
Трансформирующие системы				
Классифицирующие системы				
Компьютерное зрение				
Интеллектуальные базы данных				
Системы распределенного реестра				
Квантовые технологии				
Большие данные				

- планирование, использование искусственного интеллекта для разработки оптимального плана производства;
- оптимизация инфраструктуры, анализ периодически производит цифровую двойку физических систем для ее оптимизации.

Одна из главных областей, где искусственный интеллект демонстрирует свою силу, это подготовка производства. Именно в процессе подготовки производства искусственный интеллект максимально эффективен, так как большинство этапов весьма трудоемки и подразумевают использование большого количества временных и финансовых затрат.

Организация подготовки производства включает следующие этапы: научно-исследовательский, проектно-конструкторский, технологический и организационный [1; 2].

В процессе подготовки производства искусственный интеллект может быть внедрен в большинство перечисленных этапов (рис. 1).

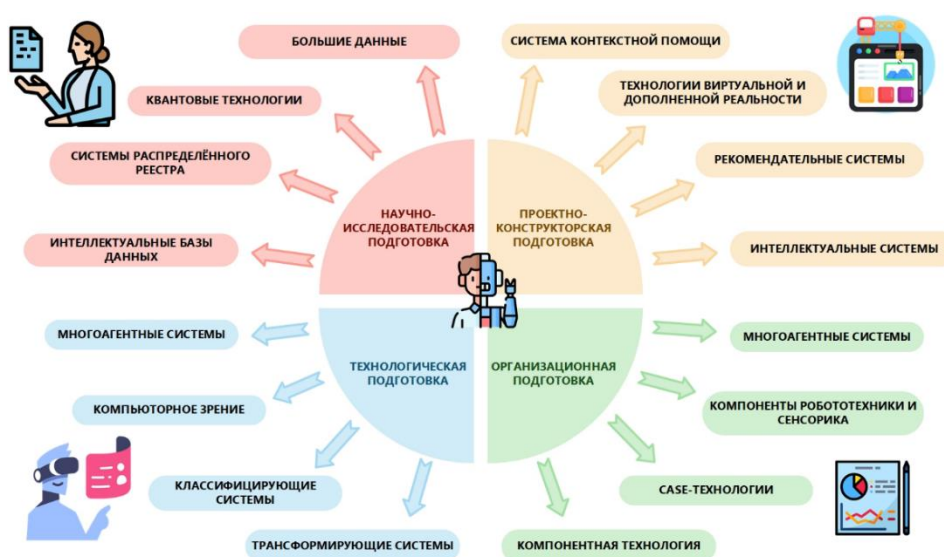


Рис. 1. Использование искусственного интеллекта

В основе научно-исследовательской деятельности – умственная активность, результатом которой является разработка интеллектуального продукта, который может носить как овеществленную (новые формы организации, инновационная продукция), так и не овеществленную форму (инновационные технологии и инновационная продукция). Данный этап включает генерацию идей и оценку объективности их реализации, проведение экспериментальных работ. Требуется обработка больших объемов информации, характеризуется максимальной затратноемкостью и непредсказуемостью. Сократить длительность научно-исследовательской деятельности и оптимизировать полученный результат позволяет внедрение инструментов: обрабатывающих большие объемы данных, выполняющих сложные физико-математические расчеты, создающих интеллектуальные базы данных и базы цифровых транзакций (событий).

Проектно-конструкторская подготовка направлена на разработку и создание проектов, чертежей, необходимых для производства продукции. В процессе этой стадии могут возникать вопросы, связанные с контролем качества, ограниченными ресурсами и т. д. Для решения этих проблем важно использовать технологии, которые ведут подсчет ресурсов в режиме реального времени и сравнивают каждую единицу произведенного продукта с заданным стандартом.

Технологическая подготовка включает выбор исходного сырья, подбор типового технологического процесса и технологического оснащения, определение средств контроля и испытаний, установления режима работы, средств автоматизации (механизации)

5. Краснобаев, А. Г. Конструирование структуры композиционных материалов на основе железа с заданными функциональными свойствами: дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / А. Г. Краснобаев. – Ростов-на-Дону, 2005. – 198 с.

6. Панин, В. Е. Новые материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий / В. Е. Панин, В. А. Клименов, С. Г. Псахье. – Новосибирск: Наука, 1993. – 153 с.

7. Тучинский, Л. И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки / Л. И. Тучинский. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.

8. Дьячкова, Л. Н. Закономерности высокотемпературной инфильтрации при получении антифрикционных материалов системы железо-медь / Л. Н. Дьячкова, А. Н. Леонов, П. А. Витязь, М. М. Дечко // Докл. НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56. – № 4. – С. 124–131.

9. Дьячкова, Л. Н. Закономерности формирования структуры псевдосплавов системы порошковая сталь – медный сплав, получаемых инфильтрацией / Л. Н. Дьячкова, П. А. Витязь // Докл. НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56. – № 5. – С. 106–114.

10. Дьячкова, Л. Н. Порошковые материалы на основе железа с повышенными механическими и триботехническими свойствами. – Минск : Белорусская наука, 2020. – 203 с.

Поступила 30.11.2023

УДК 004.89

Зеленковская Н. В., Горенкова М. А., Ясюкевич А. Д.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В настоящее время человечество достигло плато в определенных областях науки и технологий, что затрудняет разработку новых революционных идей. Поэтому рациональным будет движение не только вверх, но и вширь, то есть улучшение и модернизация уже имеющихся процессов и продуктов. В век автоматизации и оптимизации в приоритете стоит производство, так как численность населения растет, как и нужда в материальном обеспечении. Одной из самых важных целей в области науки является освоение искусственного интеллекта, так как его огромные возможности и потенциал позволят ускорить и облегчить многие трудоемкие процессы не только в производстве, но и в медицине, образовании, повседневной жизни и т. д.

Машиностроение – высокотехнологичная отрасль, где на производстве выполняется множество трудоемких монотонных и рутинных операций. Внедрение и применение искусственного интеллекта в машиностроении имеет огромный потенциал, так как обеспечивает автоматизацию, улучшение точности и оптимизацию производства.

Искусственный интеллект – сфера науки и технологии, в которой компьютеры и машины способны выполнять задачи, решаемые с помощью интеллекта человека. Может использоваться для оптимизации рабочих процессов, распознавания и исправления ошибок, анализа данных и предоставления ценной информации для принятия управленческих решений.

Основными направлениями применения искусственного интеллекта являются:

– прогнозирование, анализ данных позволяет предсказывать потребность в ресурсах и снимает необходимость ручной проверки;

– отслеживание качества, автоматизированное отслеживание производственных процессов анализирует множество данных для предотвращения ошибок и повышение качества продукции;

Введение добавок твердых смазок в виде свинца, сульфидов, селенидов в каркас позволяет существенно снизить коэффициент трения псевдосплавов (рис. 5).

Наиболее эффективно снижает коэффициент трения добавка 5 % свинца – с 0,016 до 0,007 при одном и том же давлении схватывания. А повысить предельное давление схватывания можно введением твердых керамических добавок [10].

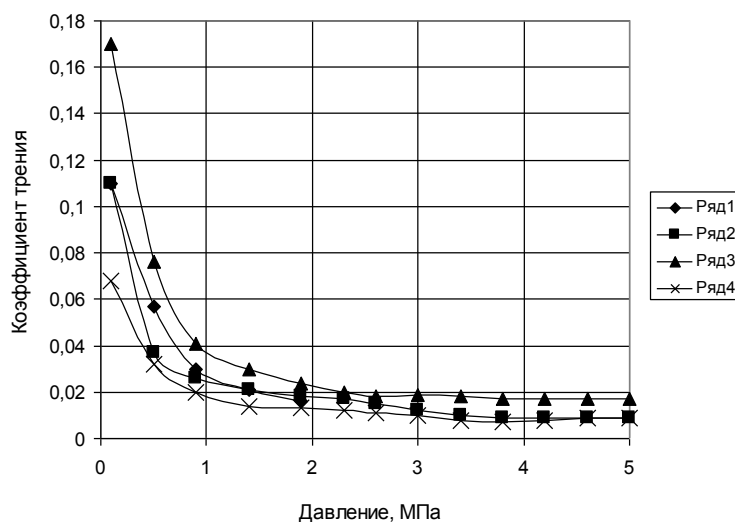


Рис. 5. Влияние давления на коэффициент трения псевдосплавов на снеге каркаса из стали ЖГр0,5 с добавкой твердой смазки, инфильтрированного медно-оловянным сплавом: ряд 1 – 0 % добавки; ряд 2 – 0,5 % MoS₂; ряд 3 – 0,8 % S; ряд 4 – 5 % Pb

Выводы.

Исследовано влияние состава на триботехнические свойства инфильтрированных медью стальных каркасов. Показано, что псевдосплавы, получаемые инфильтрацией пористых каркасов на основе железа медным сплавом, имеют более высокие механические и триботехнические свойства, чем получаемые прессованием и спеканием. На коэффициент трения в большей степени влияет содержание меди, на износостойкость и предельное давление схватывания – твердость стального каркаса, соответственно, содержание в нем углерода, так, при содержании меди 25 % интенсивность изнашивания при повышении углерода с 0,3 до 1,8 % уменьшается в 3–4 раза в зависимости от времени изнашивания, а при содержании меди 15 % – в 2–4 раза соответственно. Выявленный эффект снижения интенсивности изнашивания псевдосплавов, полученных инфильтрацией, с увеличением времени испытания говорит об их хорошей прирабатываемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин, Г. М. Проблемы технического обновления различных отраслей машиностроения / Г. М. Сороркин // Трение и износ. – 2001. – Т. 22. – № 3. – С. 322–331.
2. Гаркунов, Д. Н. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин / Д. Н. Гаркунов. – М: МСХА, 2002. – 626 с.
3. Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение/ А. А. Батаев, В. А. Батаев. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 400 с.
4. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия, материалы, технология, свойства, области применения. Справочник / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1985. – 624 с.

содержании меди 15 % – в 2–4 раза соответственно. Выявленный эффект снижения интенсивности изнашивания псевдосплавов, полученных инфильтрацией, с увеличением времени испытания говорит об их хорошей прирабатываемости.

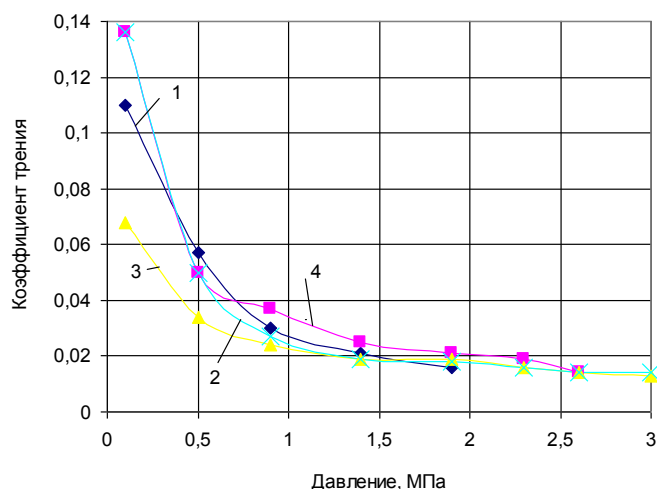


Рис. 3. Влияние давления и содержание углерода в каркасе на коэффициент трения псевдосплав, полученного инфильтрацией медным сплавом:
1 – 0,3 %; 2 – 0,8 %; 3 – 1,2 %; 4 – 1,8 %

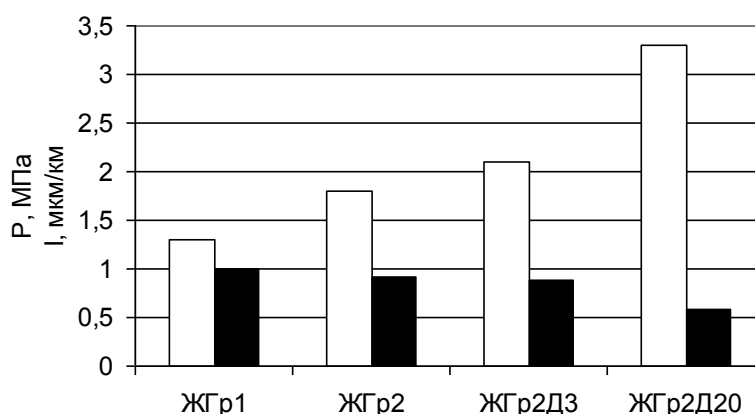


Рис. 4. Влияние содержания меди на предельное давление схватывания и интенсивность изнашивания (при $P = 2,8$ МПа, $V = 4$ м/с) псевдосплав, получаемого прессованием и спеканием:
□ – предельное давление схватывания (P); ■ – интенсивность изнашивания (I)

Таблица 1 – Влияние содержания углерода, меди и состояния каркаса на износостойкость при $P = 5$ МПа, $V = 6$ м/с псевдосплав, полученного инфильтрацией

Время изнашивания, ч	Интенсивность изнашивания, мкм/км						
	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	2,0
Содержание графита, %	25	15	15	15	15	25	15
Содержание меди, %	спеч.	спеч.	неспеч.	спеч.	спеч.	спеч.	спеч.
Состояние каркаса	спеч.	спеч.	неспеч.	спеч.	спеч.	спеч.	спеч.
2	0,87	1,85	0,69	0,463	0,347	0,23	0
5	0,805	1,02	0,648	0,37	0,278	0,185	0,185
10	0,506	0,602	0,463	0,255	0,278	0,185	0,139

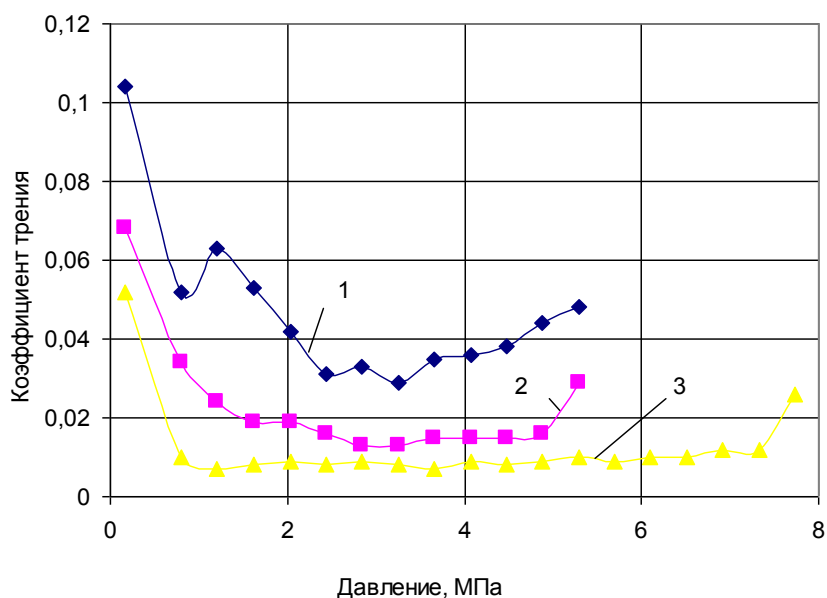


Рис. 1. Влияние давления на коэффициент трения антифрикционных материалов на основе железа:
 1 – псевдосплав, полученный инфильтрацией каркаса плотностью 85 % из материала, $Fe + 1 \%Gr$ инфильтратом $Cu + 5 \%Sn$; 2 – псевдосплав, $Fe + 1 \%Gr + 15 \%Cu + 5 \%Sn$, полученный прессованием и спеканием; 3 – компактная бронза БрО10

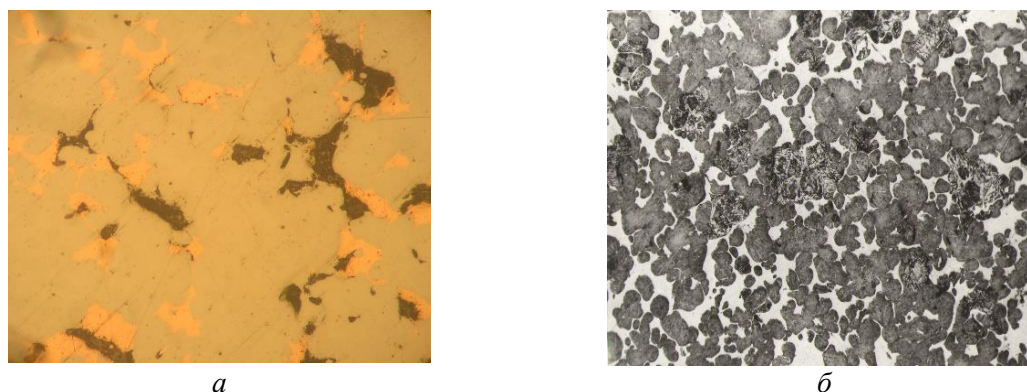


Рис. 2. Микроструктура псевдосплава ЖГр1Д25, полученного различным способом:
 а – прессование и спекание, не травлено; б – инфильтрация, травлено. X350

Свойства псевдосплавов, получаемых инфильтрацией, определяются составом пористого стального каркаса и составом, содержанием и морфологией инфильтрата. Свойства псевдосплавов повышаются с увеличением содержания меди и углерода. Необходимо отметить, что, если на коэффициент трения в большей степени влияет содержание меди и в меньшей – содержание углерода (рис. 3), то износостойкость и предельное давление схватывания определяется преимущественно твердостью стального каркаса, соответственно, содержанием в нем углерода (рис. 4, табл. 1). При наличии в структуре каркаса псевдосплава свободного цементита в виде разорванной или сплошной сетки при содержании углерода более 1,5 % износостойкости псевдосплава существенно возрастает, так при содержании меди 25 % интенсивность изнашивания при повышении углерода с 0,3 до 1,8 % уменьшается в 3–4 раза в зависимости от времени изнашивания, а при

порошковых материалов можно варьировать их составом, пористостью, введением твердых керамических добавок и добавок соединений, выполняющих роль твердых смазок, образующих на поверхности трения разделительную пленку.

Неограниченными перспективами для работы в условиях трения обладают композиционные материалы, состоящие из компонентов с различающимися физико-химическими свойствами – псевдосплавы [3; 4], которые получают прессованием и спеканием, а также методом инфильтрации спрессованных или спеченных каркасов. Метод инфильтрации позволяет получать высокоплотные, соответственно высокопрочные, материалы. Наиболее широко в промышленности применяются псевдосплавы сталь – медный сплав, поскольку имеют широкий диапазон свойств, получаемых варьированием состава стального каркаса и инфильтрата в виде медного сплава. Кроме того, поскольку основой материала является железо, псевдосплавы значительно дешевле антифрикционных материалов на основе медных сплавов.

Метод инфильтрации позволяет получать изделия с уникальным комплексом физико-механических (низкая пористость, высокая прочность и теплопроводность, ктлр, близкий ктлр компактных сталей и др.) триботехнических (низкий коэффициент трения, высокая износостойкость), функциональных (высокие электропроводность, коррозионная стойкость, теплостойкость, демпфирующие свойства) характеристик, благодаря чему они находят широкое применение в промышленности для изделий различного назначения [5; 6].

Инфильтрация может производиться принудительно, когда угол смачивания между инфильтратом и каркасом более 90°C , либо самопроизвольно, когда угол смачивания стремиться к 0 [7], кроме того, необходимо учитывать возможность взаимодействия в процессе инфильтрации материала инфильтрата и каркаса, поскольку при межфазном взаимодействии жидкой и твердой фаз каркасная структура может переходить в матричную, а в случае, если прочность инфильтрированного материала обеспечивается каркасом, такая трансформация структуры недопустима. Одним из методов снижения вредного влияния взаимодействия жидкой и твердой фаз является их направленное легирование.

При получении материалов методом инфильтрации необходимо учитывать, что жидким металлом могут заполниться только открытые и тупиковые поры, а степень их заполнения зависит от размера пор и изменения их размеров в процессе инфильтрации [8; 9].

Для повышения свойств *Fe–Cu* композиционных материалов в железо вводится углерод и легирующие элементы (*Ni*, *Cr*, *Mo*, *V* и др.), в медь – *Sn*, *Zn*, *Cr*, *Ni* и др., а также применяются термическая, термомеханическая и химико-термическая обработки.

Основная часть. В работе исследовали взаимосвязь состава и триботехнических свойств антифрикционных инфильтрированных медными сплавами каркасов из порошковых сталей.

Сравнительные испытания триботехнических свойств выявили преимущества псевдосплавов, полученных инфильтрацией, по сравнению с псевдосплавами, полученными традиционными методами порошковой металлургии, и компактной бронзой, особенно по предельному давлению схватывания и коэффициенту трения при больших давлениях (рис. 1). Это объясняется структурой и теплофизическими свойствами материала. Псевдосплавы, полученные по традиционной технологии порошковой металлургии, имеют высокую (до 20 %) пористость размером более 100 мкм, неоднородную структуру и дискретное расположение медной фазы (рис. 2, *а*), из-за чего теплопроводность их низкая, а в полученных инфильтрацией, пористость не превышает 10 % и медная фаза располагается равномерно по границам частиц и зерен и в стыках зерен (рис. 2, *б*), что обеспечивает повышенную теплопроводность.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ИНФИЛЬТРИРОВАННЫЕ МЕДНЫМИ СПЛАВАМИ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, СТРУКТУРА, ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

1. Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

2. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
Минск, Беларусь

Представлены результаты исследования влияния состава на структуру и триботехнические свойства инфильтрированных медью каркасов на основе железа. Показана актуальность проведенных исследований, приведена методика получения материалов, приборы и методы исследования их структуры и триботехнических свойств. Показано, что псевдосплавы, получаемые инфильтрацией пористых каркасов на основе железа медным сплавом, имеют более высокие механические и триботехнические свойства, чем получаемые прессованием и спеканием. Установлено, что состав каркаса, его пористость и режимы получения оказывают существенное влияние на морфологию структуры и свойства инфильтрированных материалов. Псевдосплавы, полученные по традиционной технологии порошковой металлургии, имеют высокую (до 20 %) пористость размером более 100 мкм, неоднородную структуру и дискретное расположение медной фазы, полученные инфильтрацией, имеют пористость менее 10 %, а медная фаза располагается равномерно по границам частиц и зерен с в стыках зерен. Увеличение содержания меди в материале приводит к повышению триботехнических свойств, как материалов, получаемых прессованием и спеканием, так и инфильтрацией, а повышение содержания углерода в стальном каркасе обеспечивает высокую износостойкость и предельное давление схватывания. При наличии в структуре каркаса псевдосплава свободного цемента в виде разорванной или сплошной сетки при содержании углерода более 1,5 % износостойкость псевдосплава существенно возрастает, так при содержании меди 25 % интенсивность изнашивания при повышении углерода с 0,3 до 1,8 % уменьшается в 3–4 раза в зависимости от времени изнашивания, а при содержании меди 15 % – в 2–4 раза соответственно. Коэффициент трения инфильтрированных материалов в большей степени зависит от содержания меди, износостойкость и предельное давление схватывания – от твердость стального каркаса. Выявлено, что псевдосплавы, полученные инфильтрацией, обладают хорошей прирабатываемостью.

Введение. Основными узлами, определяющими срок службы машин и механизмов, являются узлы трения, долговечность которых зависит от характеристик антифрикционных материалов подшипников скольжения [1; 2]. Параметрами, характеризующими эксплуатационные свойства современных антифрикционных материалов, являются необходимые триботехнические свойства, а для тяжелых условий работы – еще и высокие прочность, теплопроводность, термостойкость, самосмазываемость.

Преимущественно для подшипников скольжения применялась литая бронза, однако уровень ее триботехнических и механических свойств недостаточен для работы в условиях высоких нагрузок, поэтому были созданы порошковые композиционные материалы, обладающие высоким комплексом механических и триботехнических свойств. Технология порошковой металлургии позволяет создавать материалы, получить которые традиционной металлургией невозможно. Триботехнические и механические свойства

При анализе полученных данных (рис. 6, 7) было установлено, что имеется существенная зависимость распределения твердости от режимов ТВЧ-оплавления, с достаточно сложным характером. Это связано с тем, что разогревание образцов происходит на поверхностном слое основного материала. Так на режимах *в* (рис. 6) и *а* (рис. 7) видно, что практически нет изменения микротвердости на границе перехода от основного материала к материалу покрытия. Это свидетельствует о том, что при таких режимах шло интенсивное их перемешивание по всей глубине расплава. На режимах *з*, *д*, *е* (рис. 6) и *б*, *в*, *е* (рис. 7) произошло частичное перемешивание материала покрытия с основой, при этом на поверхности образца сохранились свойства нанесенного самофлюсующегося сплава. На режимах *а*, *б* (рис. 6) и *з* (рис. 7) перемешивание практически не произошло. Исходя из этого можно считать, что их можно считать оптимальными вариантами, так как режимы не приводят к перемешиванию материала покрытия с материалом заготовки и достигается высокая средняя по оплавленному слою твердость – 5770–6630 Мпа.

Выводы.

1. Доказана возможность оплавления износостойких покрытий с помощью индукционного нагрева с одновременной закалкой из жидкого металлического состояния без разрушения их целостности.

2. За счет закалки достигается удовлетворительное качество поверхности, причиной чего является влияние направленного водяного охлаждения струями жидкости под углом в 45° в сторону от индуктора, что значительно уменьшает гидродинамическое воздействие на зону расплава металла.

3. Исследование микротвердости показало, что режимы индукционного оплавления существенно влияют на получаемую твердость покрытия.

4. При различных режимах оплавления происходит как полное термодиффузионное перемешивание материала покрытия с основой, так и частичное их перемешивания, что дает возможность управлять свойствами получаемых покрытий.

5. Наиболее оптимальным режимом в исследованном диапазоне режимных параметров является режим с мощностью индуктора 80 кВт, частотой вращения детали 25 Гц, скоростью перемещения индуктора в диапазоне от 2 до 3 мм/сек, зазором между индуктором и охлаждающим устройством не более чем 4 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие токов высокой частоты на структуру напыленных никелевых покрытий / Е. А. Зверев, В. Ю. Скиба, Т. Г. Мартынова, Н. В. Вахрушев // Технология машиностроения и материаловедение. – 2018. – № 2. – С. 84–87.

2. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О. Г. Девойно [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – 280 с.

3. Ивашко В. С. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий / В. С. Ивашко, И. Л. Куприянов, А. И. Шевцов. – Мн.: Навука і тэхнік, 1996. – 375 с. – ISBN 5-343-01583-2.

4. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. Х12 В. Н. Попова; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с., ил.

5. Структура и свойства износостойких покрытий: монография / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязь. – Мн.: БГАТУ, 2006. – 327 с.

Поступила 02.12.2023

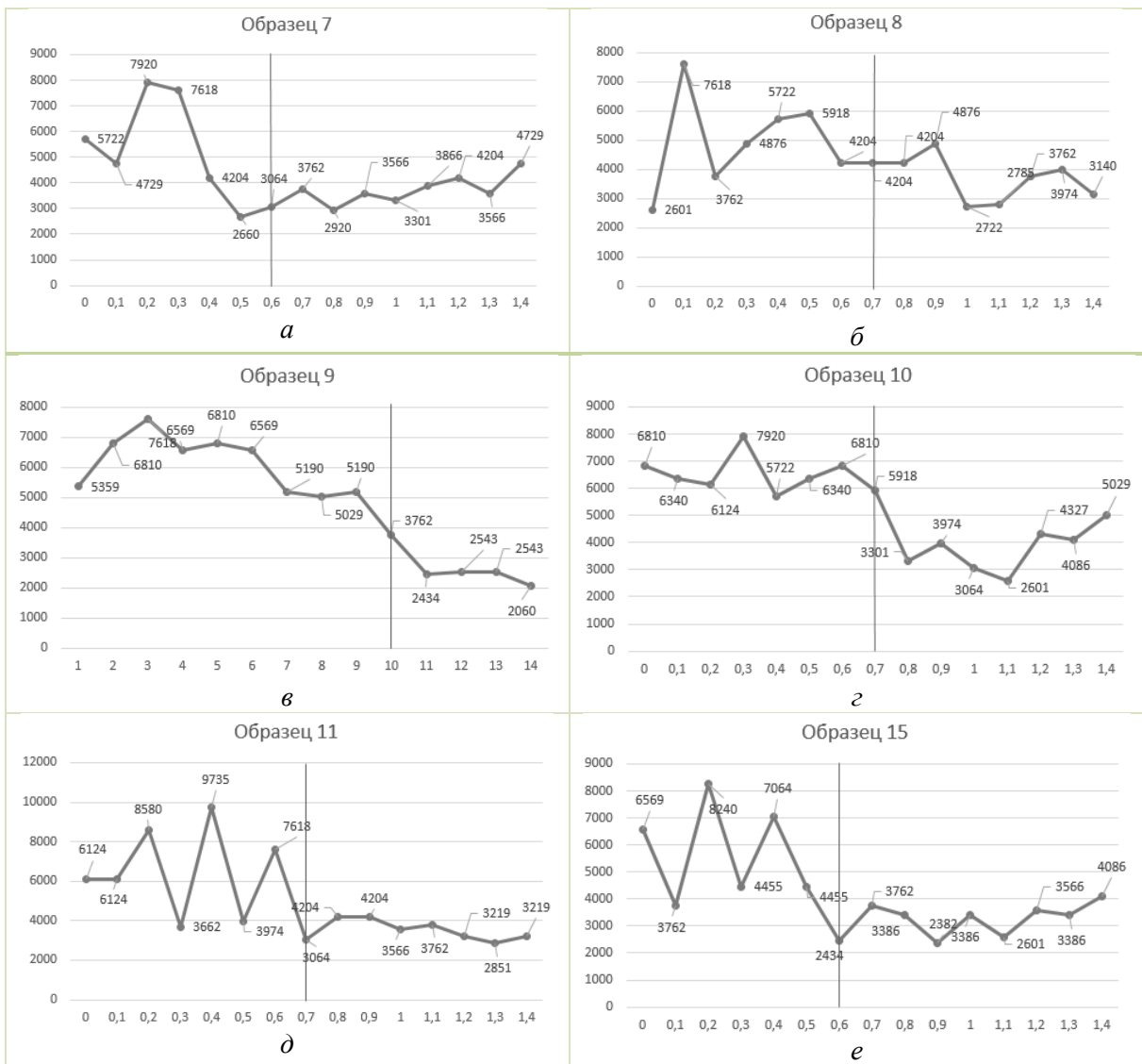


Рис. 7. Графики изменения твердости по глубине:
а – е – режимы 7–11 и 15 соответственно

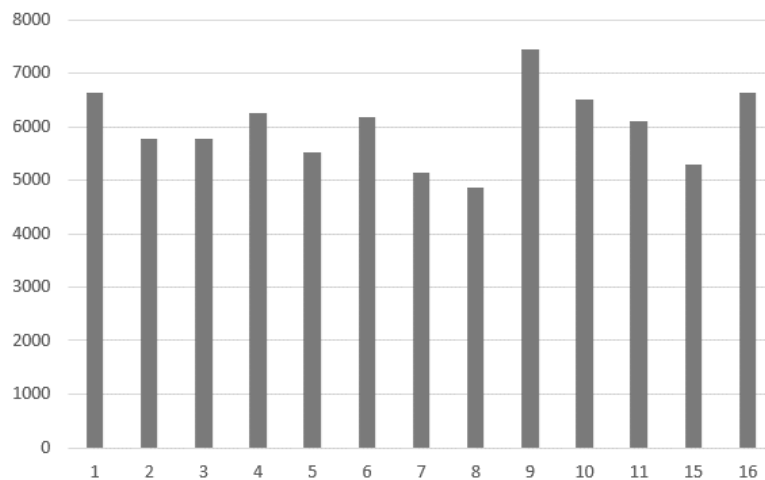


Рис. 8. Диаграмма средней микротвердости покрытий образцов

имел место развитый микрорельеф поверхности, а также эффект рваной резьбы. Это связано с тем, что омывание образца производился под прямым углом к образцу (рис. 3, а). В следствие чего под механическим воздействием струи воды произошло формирование развитого микрорельефа поверхности. На текущем этапе работы при обработке деталей использовался спреер доработанного вида (рис. 3, б), по сравнению с предыдущей конструкцией. В данном спреере отверстия расположены под углом 45 градусов, что привело к значительному уменьшению механического воздействия на зону расплава (рис. 5).

Исследование микротвердости покрытия. Результаты испытаний на микротвердость исследуемых образцов покрытий, полученных на данном этапе исследования, представлены ниже в виде графиков (рис. 6, 7), где значения по оси X – глубина измерения (мм), а по оси Y – твердость материала (МПа).

При исследовании твердости с помощью микротвердомера (рис. 6, 7), было выявлено, что режимы индукционного оплавления существенно влияют на получаемую твердость покрытия, средняя твердость покрытия варьируется от 4870 до 7930 Мпа (рис. 8).

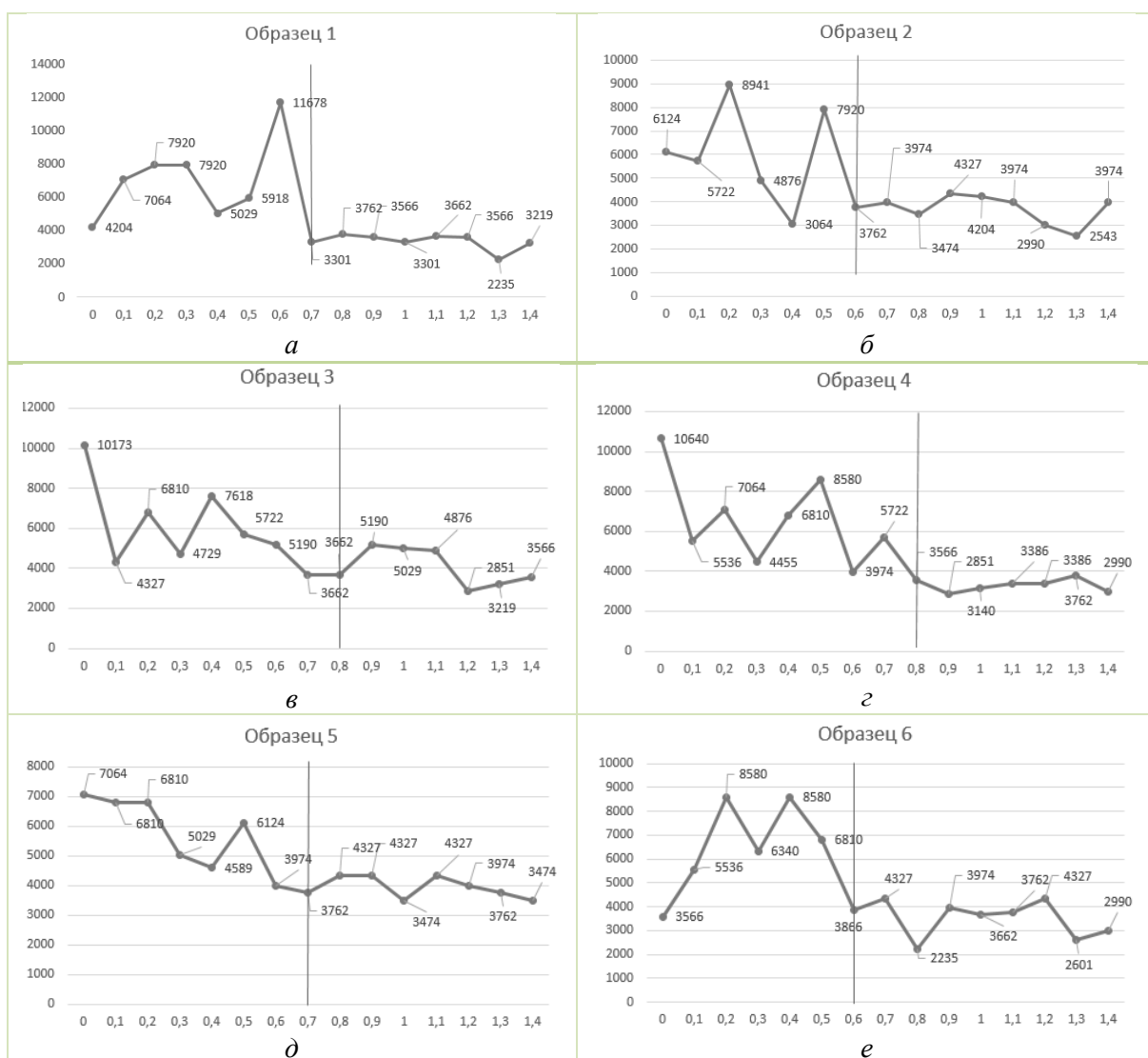


Рис. 6. Графики изменения твердости по глубине:
а – е – режимы 1–6

Процесс подготовки металлографических шлифов состоял из следующих этапов: резка, запрессовка, механическая подготовка (шлифование).

Оценивались следующие параметры получаемых покрытий:

- наличие трещин, морфология поверхности – визуально;
- микротвердость покрытий с использованием микротвердомера ПМТ-3.

Исследования микротвердости проведены на приборе ПМТ-3 путем вдавливания в испытуемый образец четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136° при нагрузке 50 г (0,49 Н) ГОСТ 9450–76.

Результаты исследования.

Исследование морфологии поверхности. На рис. 4 изображен общий вид образцов после оплавления на первоначальном этапе исследования и, соответственно, на рис. 5 изображен общий вид образцов на текущем этапе.



Рис. 4. Общий вид образцов после оплавления на первоначальном этапе



Рис. 5. Общий вид образцов после оплавления на текущем этапе

В ходе исследования морфологии выявлено, что после оплавления покрытия методом ТВЧ, с одновременной его закалкой в исследованном диапазоне режимов обработки, трещин в покрытии не обнаружено, что подтверждает предположение о возможности закалики из расплава. Это связано со спецификой нагрева в условиях ТВЧ, вследствие того, что порошки не ферромагнитные, а токи ТВЧ возбуждаются на поверхности основного металла и плавление покрытия происходит, преимущественно, по механизму кондуктивной теплопередачи. В итоге происходит выравнивание температуры стальной детали и покрытия, что предотвращает трещинообразование. Анализ морфологии покрытия после оплавления показал, что возникает достаточно однородные по шероховатости и морфологии поверхности. Следует заметить, что на первоначальном этапе исследований (рис. 4)

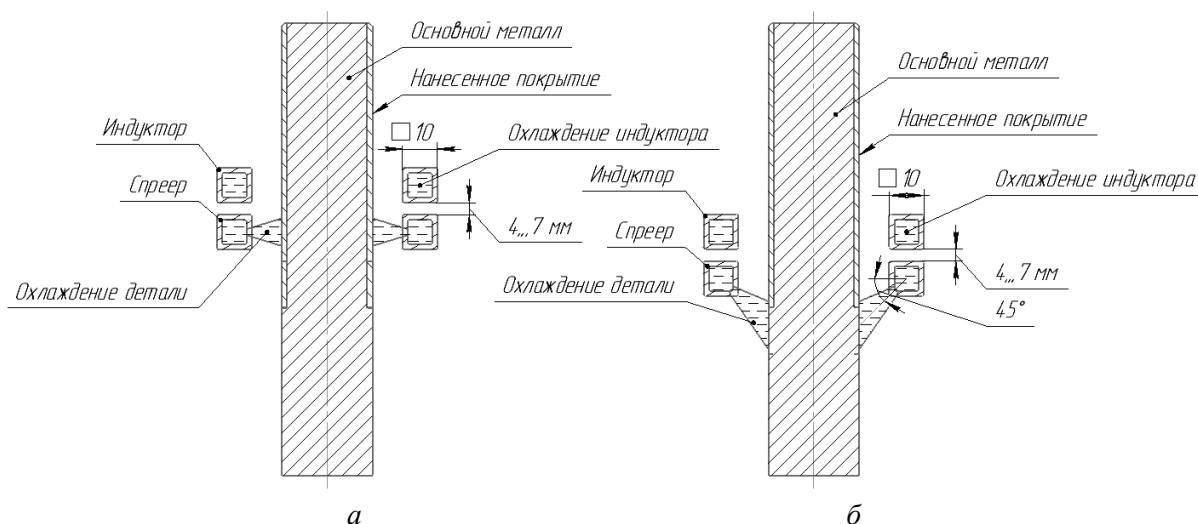


Рис. 3. Конструкция индукторов:
a – на первоначальном этапе исследования; *б* – на текущем этапе исследования

Таблица 1 – Условия оплавления образцов на первом этапе

Номер образца	Мощность, кВт	Скорость подачи, мм/сек	Частота вращения, Гц
1	100	2	10
2	100	2	50
3	100	от 1,5 до 2	25
4	100	2	10
5	95	2	6
6	85	1,85	10
7	90	1,5	6
8	95	1,5	6

Таблица 2 – Условия оплавления образцов на данном этапе исследования

Номер образца	Мощность, кВт	Скорость подачи, мм/сек	Частота вращения, Гц	Выдержка, сек	Зазор, мм
1	80	2,5	25	4	4
2	80	2	25	4	4
3	80	1,5	25	4	4
4	80	2,5	25	5	4
5	100	2,5	25	2	4
6	100	3	25	2	4
7	100	3,5	25	2	4
8	100	2,5	50	2	4
9	100	2,5	75	2	4
10	80	1,5–2,5	25	4	7
11	80	3	25	4	7
15	90	4	25	4	7

Для изучения твердости покрытий подготовили шлифы. Они изготавливались в виде поперечного среза. В нашем случае покрытия были средней толщины.

Газопламенное напыление производили на установке ТРУ-БПИ. В качестве горючего газа использовали смесь МАФ и кислорода, в качестве транспортирующего – воздух. Давление МАФ составило – 0,12 МПа, давление кислорода (ГОСТ 5583-79) – 0,4 МПа, давление воздуха 0,18 м³/ч, дистанция напыления – 170 мм, производительность горелки – 6 кг/ч.

На все прутки было нанесено покрытие толщиной 1,5 мм на диаметр. Материал порошка ПР-НХ17СП4 с грануляцией от 40 до 100 микрон. В состав данного порошка входят: 74,3 % никеля, 1 % углерода, 17 % хрома, 4,1 % кремния, 3,6 % бора. Твердость покрытия по HRC 55–60.

Оплавление покрытия производили на установке индукционного нагрева, при частоте поля – 53 кГц, диаметре индуктора – 40 мм. Резкое охлаждение оплавленной зоны на данном этапе исследования производилось омыванием ее струями воды с помощью отверстий в охлаждающем устройстве под углом в 45° (рис. 1).

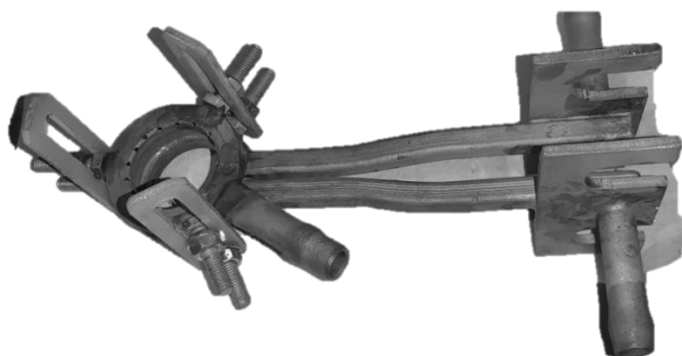


Рис. 1. Индуктор для установки индукционного нагрева

На рис. 2 показан принцип действия оплавления ТВЧ в режиме закалки.

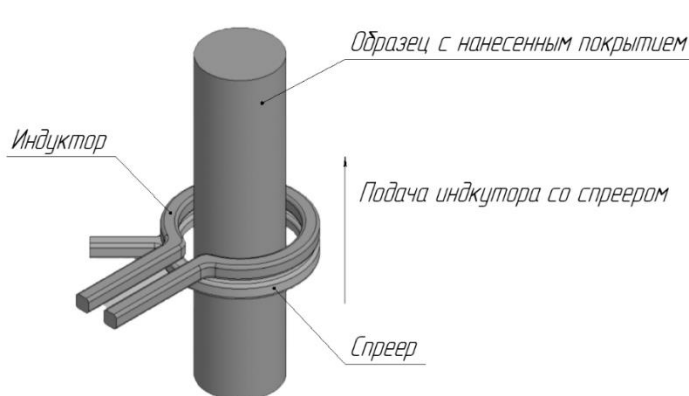


Рис. 2. Принцип действия оплавления ТВЧ в режиме закалки

В качестве варьируемых параметров использовали скорость перемещения (от 1,5 до 4,5 мм/сек), частоту вращения (от 6 до 75 Гц), мощность индуктора (от 80 до 100 кВт), выдержка перед началом перемещения индуктора (от 2 до 5 сек) и зазор между индуктором и охлаждающим устройством (от 4 до 7 мм).

Исследование проводилось в два этапа. На первоначальном этапе использовались режимы оплавления образцов, указанные в табл. 1, а также спреер имел отверстия, перпендикулярные к оси вращения образцов (рис. 3, а). На текущем этапе использовались режимы, указанные в табл. 2, а также спреер с отверстиями под углом в 45° (рис. 3, б).

Вследствие чего обоснованно восстановление деталей и узлов с помощью методов газотермического напыления и оплавления.

Газотермическое напыление порошковых материалов представляет собой процесс образования на поверхности изделия покрытия из нагретых до плавления частиц распыляемого материала с использованием теплоты сжигания горючей смеси или теплоты дугового разряда в газовых средах [3].

Существующую технологию газотермического напыления в зависимости от применяемого источника тепловой энергии можно разделить на два основных вида: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом, и плазменное напыление, где источником нагрева частиц порошка служит плазменный факел, образующийся при пропускании плазмообразующего газа через зону горения электрической дуги [3]. При этом газопламенное напыление обеспечивает возможность нанесения покрытий, изготовленных из металлов и полимеров, а также имеет невысокую стоимость оборудования для напыления [4].

Для формирования газотермических покрытий используют широкую гамму порошков, выпускаемых специализированным предприятием, среди которых представляют интерес самофлюсующиеся порошки [5]. Наиболее широкое распространение получили сплавы на основе никеля, которые представляют собой многокомпонентную систему $Ni-Cr-B-Si-C$. Данный порошок обеспечивает высокую износостойкость и коррозионную стойкость сплава, относительно небольшую температуру плавления сплава за счет образования в сплаве при оплавлении сложной легкоплавкой эвтектики системы $Ni-B-Si$, преимущественно $\gamma + Ni + Ni_3B$ [5]. Никелевые сплавы за счет своего химического состава после напыления предполагают операцию оплавления.

Наиболее распространенными методами оплавления являются: оплавление газопламенной горелкой, лазерное оплавление, оплавление в печи и высокочастотный индукционный нагрев, однако многие из них требуют охлаждения вместе с деталью. Так, при оплавлении газопламенной горелкой или в печи необходим объемный нагрев детали. Некоторые методы позволяют оплавливать детали без объемного нагрева. К таким методам можно отнести методы лазерной обработки и оплавления с помощью ТВЧ, при этом последний обеспечивает высокую производительность.

Никелевые сплавы являются структурно-чувствительными из-за чего режимы оплавления сильно влияют на их свойства. Например, лазерная обработка, где обеспечиваются высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к повышению стойкости в 2–3 раза. Однако, несмотря на перспективность такого метода, он обладает важным недостатком в виде низкой производительности. Оплавление с помощью ТВЧ, в свою очередь, в известных работах предполагает низкие скорости охлаждения.

С учетом сказанного, целью исследования была выбрана разработка технологии получения защитных покрытий газотермическим напылением с последующим оплавлением ТВЧ в режиме закалки из жидкого состояния.

Оборудование и методики проведения исследования. Для исследования использовали цилиндрические образцы из стали 40Х диаметром 26 миллиметров и длиной 120 миллиметров.

Поверхность подготавливали дробеструйной обработкой. Данный метод является наиболее эффективным и производительным, обеспечивающим как очистку поверхности от адсорбированных масляных и оксидных пленок, так и активацию основы вследствие интенсивного перенаклепа. Применялись следующие режимы дробеструйной обработки: давление воздуха 0,6 МПа, диаметр сопла 8 мм, дистанция 40–50 мм. В качестве абразивного материала использовалась чугунная колотая дробь ДЧК-1,8 ГОСТ 11964-81 со средним размером частиц 1,8 мм.

17. Сафонов, Е. Н. Закалка поверхностного слоя деталей машин плазменной дугой прямого действия / Е. Н. Сафонов, И. С. Дружинин, Н. В. Орлова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 9. – С. 23–30.

18. Поверхностное упрочнение сталей плазменной закалкой / В. А. Линник [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1983. – № 4. – С. 2–4.

19. Коротков, В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шакуров // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23–27.

20. Немчинский, А. Л. Тепловые расчеты термической обработки / А. Л. Немчинский. – Л. : Судпром, 1953. – 106 с.

21. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

22. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при действии движущегося нормально-кругового источника нагрева / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – С. 188–193.

23. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при локальной поверхностной плазменной закалке / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич // Актуальные проблемы прочности: материалы междунар. науч. конф., г. Минск, 23–27 мая 2022 г. / под ред. В. В. Рубаник. – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 375–376.

Поступила 13.02.2023

УДК 621.793

Девойно О. Г., Рудницкий А. Ю., Володько А. С., Вегера И. И.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ИНДУКЦИОННЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ В РЕЖИМЕ ЗАКАЛКИ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье описана возможность использования метода оплавления с помощью ТВЧ с одновременной закалкой из жидкого состояния никелевых самофлюсующихся сплавов. В статье исследовались макрогеометрия поверхности, а также влияние режимов на трещинообразование в полученном покрытии и твердость поверхности. В работе приводится информация о влиянии режимов индукционной обработки на трещинообразование и на физико-механические свойства. В работе показана возможность использования метода ТВЧ с одновременной закалкой омытием струями воды из расплавленного состояния для оплавления покрытий из никелевого сплава. В статье констатируется, что, управляя режимами оплавления, можно изменять физико-механические свойства.

Введение. В настоящее время инженерия поверхности играет все более возрастающую роль в получении изделий с заданным уровнем поверхностных свойств [1]. Использование износостойких, коррозионностойких, жаростойких, химически стойких, электроизоляционных, теплоизоляционных и других видов покрытий позволяет резко сократить потери металлов, расход ресурсов на их возмещение и дает возможность повысить качество, надежность и долговечность машин и оборудования [2]. Это значительно сокращает себестоимость их обслуживания за счет снижения затрат на ремонтные работы, снижения количества запасных комплектующих, а также уменьшение простоя машин.

Результаты исследований послужили основой для совершенствования процесса упрочнения стали 45, управления механическими свойствами упрочненного поверхностного слоя и получения микротвердости (560–670) HV_{0,1}, что в 2,2 раза выше микротвердости исходного материала. Толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от 0,5 до 0,7 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. – Мн. : Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч, В. И. Комар. – Киев : Тэхника, 1990. – 109 с.
3. Сафонов, Е. Н. Поверхностное упрочнение деталей из стали и чугуна плазменной закалкой / Е. Н. Сафонов // М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 28 с.
4. Сафонов, Е. Н. Плазменная закалка деталей машин: монография / Е. Н. Сафонов // М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.
5. Поверхностное упрочнение инструментальных сталей и сплавов при нагреве высококонцентрированной плазменной струей / С. С. Самотугин, О. Ю. Нестеров, В. А. Мазур [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 23–28.
6. Шнайдер, Б. И. Микроплазменная обработка материалов / Б. И. Шнайдер. – Киев : Наукова думка, 1976. – 56 с.
7. Самотугин, С. С. Свойства инструментальных сталей при плазменном упрочнении с оплавлением поверхности / С. С. Самотугин, Н. Х. Соляник, А. В. Пуйко // Сварочное производство. – 1994. – № 11. – С. 20–24.
8. Алибеков, С. Я. Плазменное упрочнение деталей машин / С. Я. Алибеков, М. В. Шалагин, С. В. Сластихина, Е. В. Соловьева, Р. С. Сальманов // Вестник технологического университета. – 2013. – Т. 16, в. 17. – С. 218–219.
9. Коротков, В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов. – Челябинск : Металл, 1993. – 144 с.
10. Балановский, А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А. Е. Балановский. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с.
11. Влияние плазменно-дуговой обработки на структурные превращения и поверхностное упрочнение углеродистых и легированных сталей / Д. С. Ставрев, Л. М. Капуткина, С. К. Киров [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 9. – С. 16–19.
12. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
13. Сазонов, М. И. Теоретические и экспериментальные исследования процесса поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента / М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский // Вестник Брестского государственного технического университета. – Серия: Машиностроение. – Брест: БрГТУ, 2013. – С. 28–31.
14. Davis, J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics / J. R. Davis // ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 319 p.
15. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1983. – 359 с.
16. Влияние плазменно-дуговой обработки на структурные превращения и поверхностное упрочнение углеродистых и легированных сталей / Д. С. Ставрев, Л. М. Капуткина, С. К. Киров [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 9. – С. 16–19.

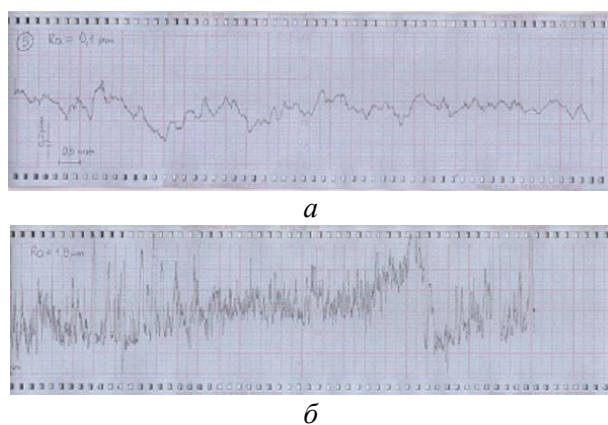


Рис. 8. Профилограмма поверхности образцов после термообработки:
a – без оплавления поверхности; *б* – с оплавлением поверхности

Большое влияние на изменение шероховатости поверхности оказывает ток дуги, скорость движения источника и объемы расхода газов. Эксперименты показали, что шероховатость поверхности в диапазоне (0,1–20) мкм для образцов из стали 45 можно получать, варьируя процентным отношением смеси защитных газов аргон/азот. Установлено, что при 30 % содержании азота и 70 % аргона в смеси термообработка происходит без оплавления поверхности, повышение же процентного содержания азота приводит к оплавлению поверхности (технологические параметры процесса: ток дуги $I = 26$ А, скорость перемещения источника $v = 11,7$ мм/с). Оплавление поверхности можно получить также, изменяя скорость движения источника при постоянстве других технологических параметров.

Заключение. По результатам исследований установлено:

- в процессе термообработки плазменным источником энергии за счет высоких скоростей нагрева и охлаждения в упрочняемой стали формируется поверхностный слой структура и свойства которого недостижимы для традиционных способов упрочнения (объемная закалка, ТВЧ и др.);
- достигается высокая производительность процесса;
- при упрочнении без оплавления не требуется финишной обработки рабочей поверхности детали;
- наименьшая шероховатость поверхности порядка 0,2 мкм получается при воздействии дуги в защитной 100 % среде аргона при $v = 11,7$ мм/с, $I = 26$ А;
- появление в упрочненном слое сжимающих напряжений и остаточного аустенита исключает процесс трещинообразования деталей;
- минимальные деформации деталей при термообработке позволяют повысить точность их изготовления;
- достигается высокий КПД нагрева по сравнению с другими методами термообработки;
- плазменная установка является мобильной, отличается простотой эксплуатации и обслуживания.

Таким образом, на основе экспериментальных исследований установлены зависимости между мощностью генератора плазмы, током и напряжением электрической дуги, объемами защитного и плазмообразующего газов. Получены зависимости микротвердости стали от режимов термообработки в области воздействия источника плазмы.

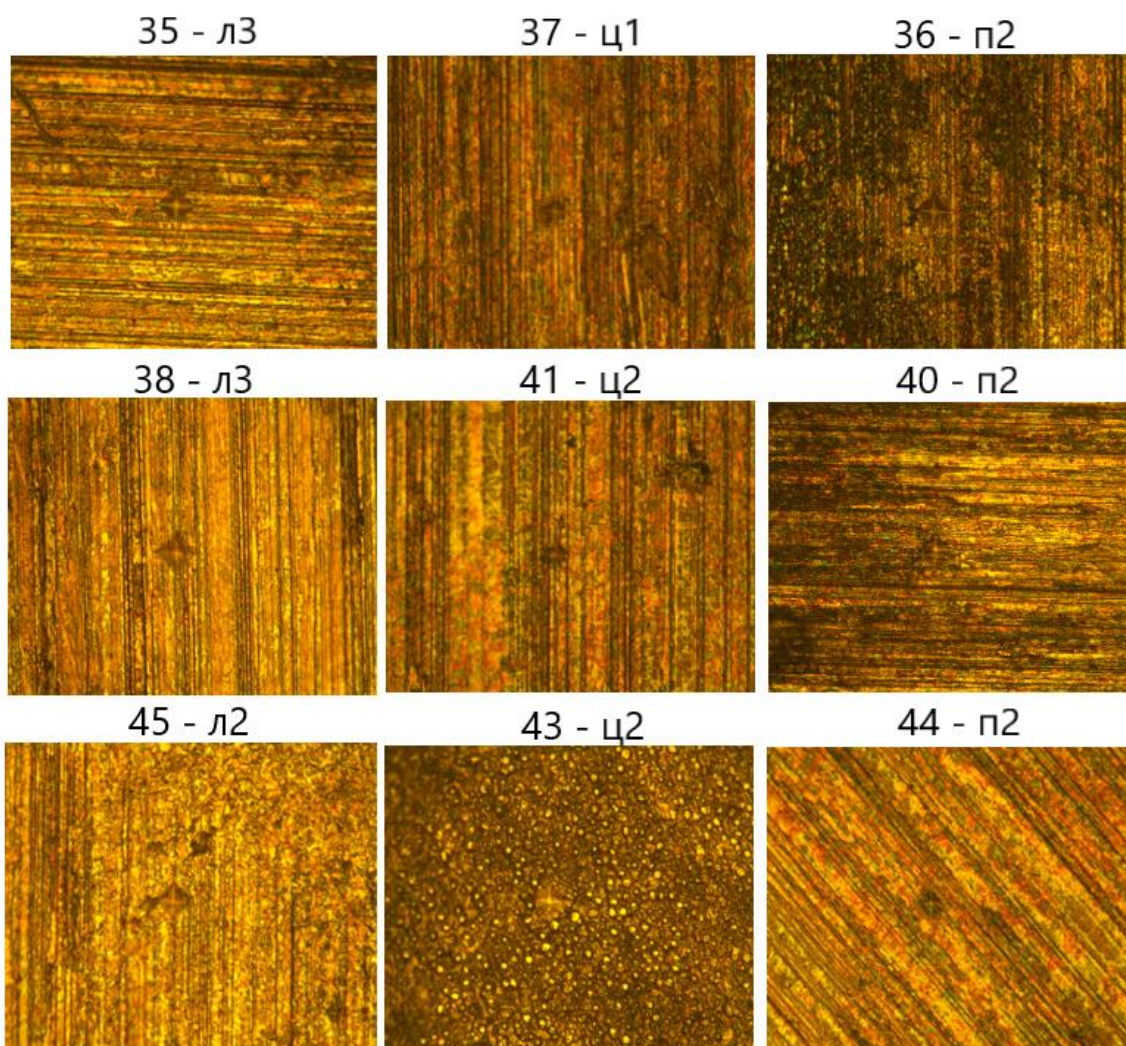


Рис. 7. Микроструктура поверхности упрочненной зоны

Анализируя профилограммы, можно заключить, что шероховатость поверхности порядка $Ra = 0,2$ мкм после механической обработки образцов сохраняется такой же и после обработки плазменной дугой.

Как видно из рис. 7, поверхность образца с оплавлением имеет сложный рельеф, обусловленный системой впадин и гребней. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при закалке поверхности в твердой фазе целесообразно применить аргон в качестве защитного газа, который в меньшей степени, чем азот, обжимает дугу. В результате снижается плотность потока энергии, которую поглощает поверхность, и температура поверхностного слоя металла получается ниже температуры его плавления.

Согласно [12; 14], плазменная закалка сталей без оплавления поверхности является наиболее распространенной, т. к. обеспечивает сохранение необходимых качеств поверхности изделия (шероховатость), которые получены механической обработкой. В этом случае процесс поверхностной плазменной закалки используется как финишная операция. Необходимые значения твердости, размеры зоны воздействия струи и другие параметры можно регулировать в широких пределах. В случаях, когда для детали необходимо получить особенные эксплуатационные свойства или к шероховатости рабочей поверхности не предъявляются высокие требования, используют плазменную закалку с оплавлением поверхности.

В табл. 1 указаны режимы плазменной закалки поверхности и результаты измерения микротвердости в точках по длине дорожки.

Таблица 1 – Режимы плазменной закалки и значения микротвердости

Номер дорожки	d , мм	h , мм	U , В	I , А	v , см/с	$G_{осн}(Ar)$, л/мин	$G_{защ}(Ar)$, л/мин	Микротвердость HV		
								слева (л)	центр (ц)	справа (п)
35	1,8	1,4	39	23	10	10	60	379,498	525,916	365,344
36			38	22	26	8	60	418,747	484,35	461,372
37			39	23	26	10	80	368,889	571,976	373,049
38			39	23	20	10	80	380,359	561,788	398,864
40			40	23	20	10	80	447,63	525,653	424,195
41			42	26	20	10	80	482,081	675,484	550,808
43			42	26	16	10	80	502,831	693,988	522,978
44			42	26	16	10	80	572,892	663,479	499,025
45			39	23	16	10	80	499,607	573,536	487,471

Примечание: d – диаметр сопла; h – расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности; U – напряжение дуги; I – ток дуги; v – скорость движения источника нагрева; $G_{осн}(Ar)$ – расход основного газа; $G_{защ}(Ar)$ – расход защитного газа.

На рис. 6 показано распределение микротвердости стали 45 по ширине дорожки.

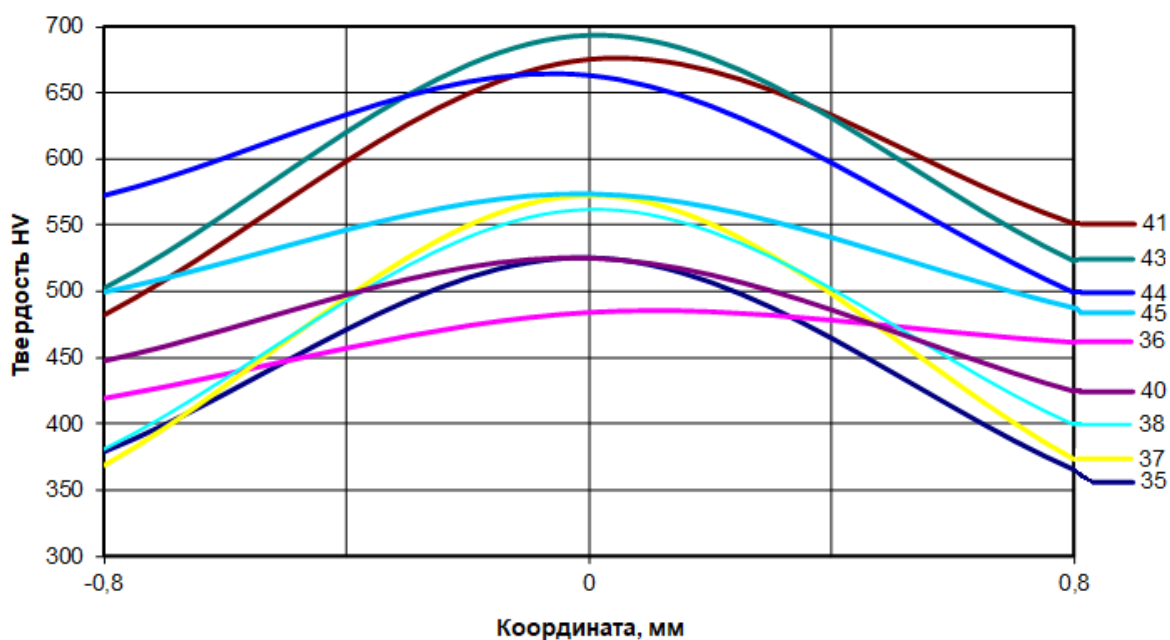


Рис. 6. Зависимости микротвердости стали 45 по ширине дорожки

На рис. 7 показана микроструктура поверхности упрочненной зоны образца в зависимости от режимов плазменной закалки. На каждой дорожке произведено девять замеров микротвердости. Точки промеров распределены по длине следующим образом: по три точки вначале участка (слева); по центру (центр); в конце участка (справа).

без оплавления и шероховатость поверхности остается такой же, как и при механической обработке в исходном состоянии. Эксперименты показали, что поверхностное упрочнение сталей высококонцентрированным источником нагрева можно осуществлять с оплавлением и без оплавления поверхности (из жидкого состояния; в твердой фазе).

С помощью системы *Mistral 070705* построена топография поверхности образцов из стали 45 без оплавления и с оплавлением (рис. 4).

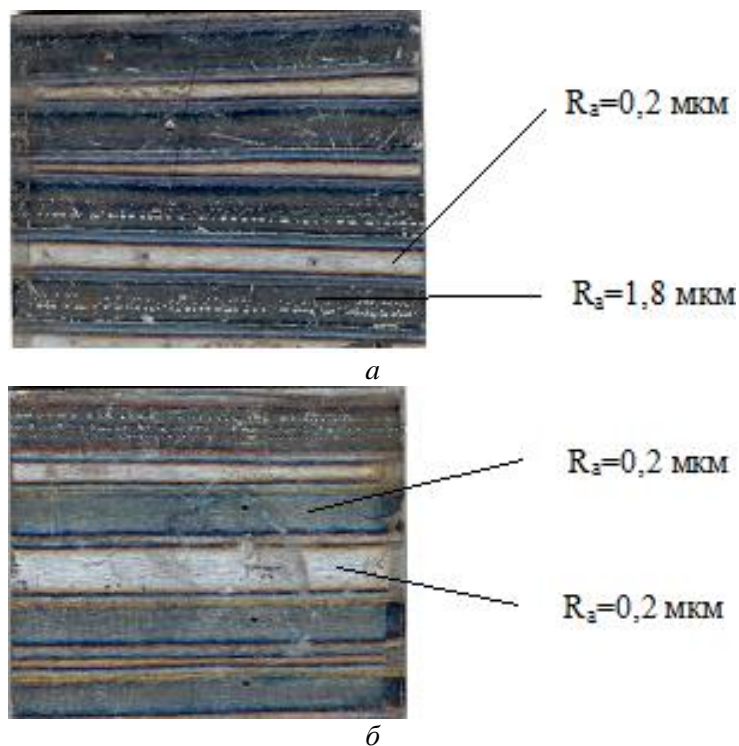


Рис. 4. Микрогеометрия поверхности образцов после термообработки:
 а – с оплавлением поверхности; б – без оплавления поверхности

На рис. 5 показано распределение микротвердости стали 45 по глубине упрочняющего слоя.

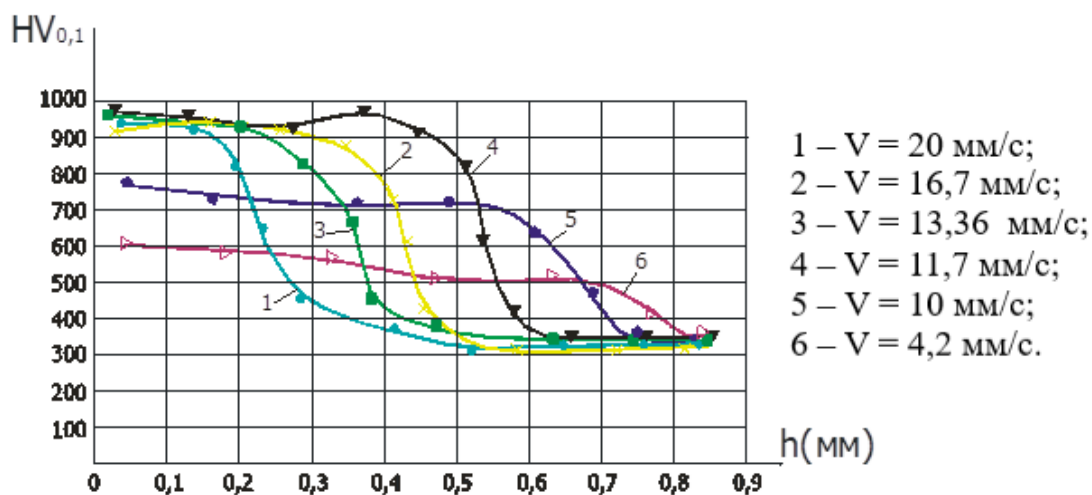


Рис. 5. Зависимости распределения микротвердости стали 45 по глубине поверхностного слоя

оплавления поверхностного слоя. Во втором случае упрочненная зона не требует финишной обработки.

Проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги при токах (7–30) А, при этом напряжение дуги составляет (14–35) В в зависимости от соотношения расходов аргона и азота.

Для исследования свойств упрочненного поверхностного слоя применялись металлографический, фазовый, рентгеноструктурный анализы. Шероховатость Ra поверхностного слоя определялась с помощью измерительного комплекса с лазерным сканированием *Mistral 070705* фирмы *Brown&sharpe* с программным обеспечением *PC-dmis PRO Software*, позволяющего производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля (точность измерения 0,003 мм). Для определения влияния плазменной дуги на микроструктуру и свойства стали выполнен металлографический анализ образцов в форме параллелепипеда с нанесенной плазменной дорожкой.

Для определения оптимальных режимов термообработки, помимо экспериментальных исследований, использовались результаты численного решения задачи нестационарной теплопроводности при воздействии движущегося локального источника нагрева на основе разработанного алгоритма [22].

Результаты исследования процесса. Для совершенствования процесса поверхностной плазменной закалки в качестве материала выбрана сталь 45, свойства которой достаточно изучены при обработке лазером, микроплазменной дугой и другими методами [1–6]. Этот факт позволяет оценить достоверность результатов поверхностного плазменного упрочнения с помощью разрабатываемого метода. При термообработке осуществляется высокоскоростной нагрев с быстрым охлаждением, что приводит к упрочнению зоны нагрева, т. е. вследствие оговоренных превращений создается слой с высокой степенью дискретности мартенсита. Рассматриваемая сталь содержит менее 0,5 % углерода и при фазовых превращениях его кристаллы имеют форму пластин.

Выполнен микроструктурный анализ сталей при термообработке образцов с использованием аргона и азота в качестве защитных газов. Типичная микроструктура поверхностного слоя стали 45 при термообработке в защитной среде аргона приведена на рис. 3. Зона влияния плазменной струи имеет форму сегмента и по своему строению аналогична зоне влияния при термообработке стали лазером и электронным лучом.

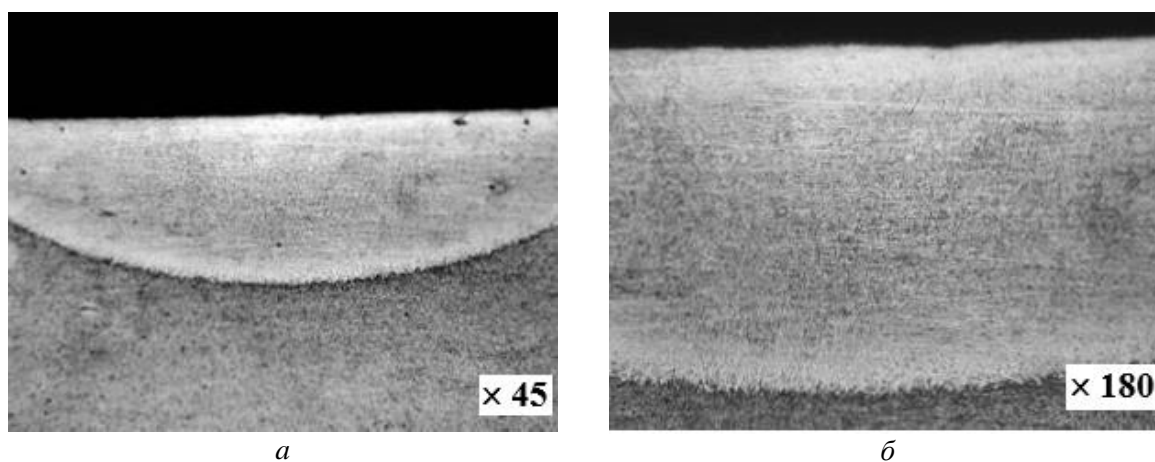


Рис. 3. Микроструктура стали 45 при термообработке в среде аргона: a – зона влияния плазменной струи; b – микроструктура зоны нагрева

Воздействие плазменной дуги на поверхность образца приводит к изменению микрогеометрии поверхности. При упрочнении в твердой фазе закалка металла происходит

источник питания обеспечивает горение дуги при напряжениях (14–35) В и токах дуги до 30 А. Поджиг дуги производится при помощи высоковольтного ВЧ-генератора, который подключен одним полюсом к катоду плазмотрона, другим – к его соплу. Перед запуском устанавливаются заданные расходы рабочего газа (аргона) и защитного газа (азота), задается определенная скорость перемещения. Затем на плазмотрон подается напряжение от силового источника и включается ВЧ-генератор, который обеспечивает пробой газового зазора между катодом и соплом. В этот момент сопло служит поджигающим электродом. По образовавшемуся искровому каналу развивается дежурная дуга между катодом и соплом. Ток дуги устанавливается в пределах (4–6) А и ограничивается переменным сопротивлением R (включено в электрическую цепь между соплом и анодом). Под действием потока аргона слаботочная дуга выдувается из плазмотрона и замыкается на анод-деталь. Приложенное напряжение к плазмотрону от силового источника обеспечивает загорание основной дуги между катодом и анодом, а дежурная дуга автоматически отключается.

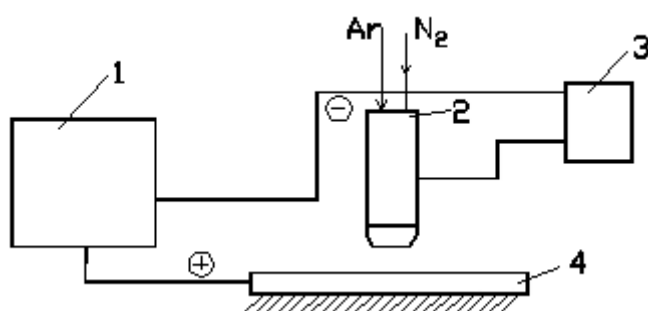


Рис. 2. Принципиальная схема установки для поверхностного упрочнения:
 1 – силовой источник питания; 2 – модернизированный плазмотрон;
 3 – высокочастотный генератор; 4 – упрочняемая деталь

Аргон и азот подаются из баллонов высокого давления через редукторы и вентили. Измерение расходов газов осуществляется с помощью ротаметров *PM-0,63 ГУЗ*.

В результате скоростного локального нагрева поверхности детали плазменной дугой до высоких расчетных температур и дальнейшего охлаждения изделия, которое достигается высокоскоростным отводом тепла во внутренние его слои, в материале происходят структурные превращения. Так как объем нагреваемого под дугой металла мал, происходит быстрый отвод тепла в тело образца. Исследование скоростей нагрева и охлаждения в зависимости от режимов работы плазмотрона проведены в работах [21; 22]. При воздействии высококонцентрированного источника тепла в зоне термического влияния образуется мартенситно-аустенитная структура. Следует отметить, что структурные превращения при плазменном упрочнении происходят в основном также, как и при объемной закалке, однако, высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к увеличению плотности дислокаций и термонапряжений в кристаллической решетке, что существенно увеличивает твердость поверхностного слоя. Так [3], например, твердость стали при объемной закалке (48–53) HRC, закалке ТВЧ (51–56) HRC, плазменной закалке (54–59) HRC. Основное достоинство плазменной закалки заключается в существенном увеличении твердости приповерхностного слоя изделия и сохранении исходных свойств металла в его внутренних слоях, что повышает сопротивление усталости и изнашиванию детали, и что недостижимо при традиционных методах упрочнения. Отметим также, что глубина модифицированного слоя при воздействии плазменного источника нагрева варьируется в пределах (0,5–2,5) мм, ширина упрочняющей зоны – (5–15) мм [4]. Процесс плазменного упрочнения может осуществляться с оплавлением и без

генераторов плазмы и режимов технологических процессов упрочнения изделий из различных материалов. В связи с этим дальнейшее совершенствование технологий плазменного упрочнения в настоящее время является актуальной задачей [1–19].

Процесс поверхностного упрочнения осуществляется перемещением генератора плазмы постоянного тока с расчетной скоростью относительно рабочей поверхности детали, который генерирует плазменную дугу, взаимодействующую с поверхностью упрочняемой детали.

Анализ литературных источников показал, что исследователи уделяют большое внимание процессам упрочнения с помощью лазерного воздействия. Для способов упрочнения, где используются локальные источники тепла, особый интерес представляют исследования температурных полей в зоне нагрева, скоростей нагрева и охлаждения металла при движущемся источнике [20–23]. Согласно [1; 16], воздействие высококонцентрированных источников нагрева на поверхность стальных изделий приводит к структурным, фазовым и аллотропическим превращениям в металле. Исходя из этого изучение влияния тепловых процессов на формирование упрочненного поверхностного слоя с целью получения оптимальных прочностных и износостойких свойств, обусловленных этими превращениями, представляет практически важную задачу. Для анализа физико-механических параметров в поверхностном слое металла необходимо определить оптимальные режимы процесса упрочнения, которые зависят главным образом от характеристик генератора плазмы: тока и напряжения дуги; вида защитного и плазмообразующего газов; расстояния от среза сопла генератора плазмы до поверхности детали; скорости движения источника.

Постановка задачи. Для реализации метода поверхностного упрочнения стальных изделий создана экспериментальная установка, состоящая из роботизированного комплекса *Advercut K6090T* с разработанным к нему узлом крепления плазменного генератора (рис. 1).

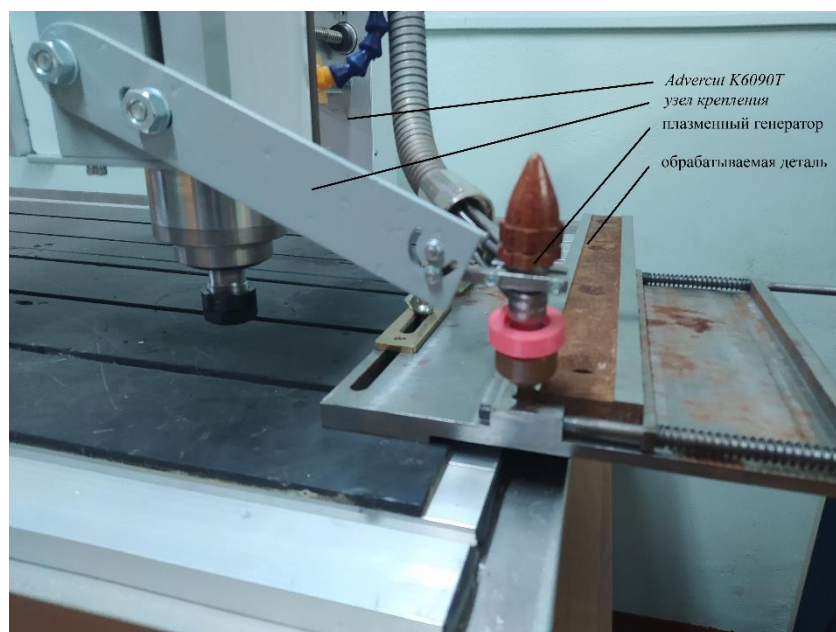


Рис. 1. Фрагмент экспериментальной установки для поверхностного плазменного упрочнения стальных изделий

Установка состоит из силового источника питания дуги 1, плазмотрона постоянного тока 2, устройства ВЧ-поджига дуги 3, упрочняемой детали 4 (рис. 2), а также систем газоснабжения плазмотрона аргоном, азотом и системы водоохлаждения. Силовой

5. Привод соосных исполнительных органов проходческого комбайна. (ВУ) Полезная модель № 9587 (Е 21С 31/00) от 04.014.2013. Оpubл. БИ 30.10.2013. / В. Я. Прушак [и др.].

6. Басалай, Г. А. Удельные затраты энергии на работу соосных роторов проходческого комбайна / Г. А. Басалай. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXI МНТК «Чтения памяти Р. В. Кубачека», проведенной в рамках Уральской промышленной декады 6–7 апреля 2023 г. / под общ. ред. Ю. А. Лагуновой. – Екатеринбург УГГУ, 2023. – С. 21–25.

7. Привод исполнительного органа проходческого комбайна. (ВУ) Патент № 14177 (Е 21С 31/00) от 30.01.2009. Оpubл. БИ 30.08.2010 / Г. А. Басалай [и др.].

8. Планетарный исполнительный орган проходческо-очистного комбайна. (ВУ) Полезная мод. № 9284 (Е 21С 31/04) от 21.12.2012. Оpubл. БИ 30.06.2013 / Г. А. Басалай [и др.].

9. Привод спаренного планетарного исполнительного органа проходческо-очистного комбайна. (ВУ) Полезная мод. № 10189 (Е 21С 31/04) от 16.12.2013. Оpubл. БИ 30.06.2014 / Г. А. Басалай [и др.].

Поступила 2.11.2023

УДК 621.791

Веремейчик А. И.¹, Овчинников Е. В.², Онысько С. Р.¹, Сазонов М. И.¹,

Хвисевич В. М.¹, Хеук М. В.¹

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО
ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА
ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 45**

1. Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»,

Брест, Беларусь

2. Учреждение образования «Гродненский государственный университет

им. Я. Купалы», Гродно, Беларусь

На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса поверхностного плазменного упрочнения изделий из стали 45, определены оптимальные энергетические параметры генератора плазмы плазменной установки, кинематические параметры источника плазмы, теплофизические характеристики поверхностного слоя металла, что позволяет усовершенствовать процесс упрочнения и создавать поверхностный слой металлоизделий с управляемыми механическими свойствами.

Введение. Повышение срока службы деталей машин и механизмов остается актуальным вопросом и в настоящее время. Для решения этой проблемы в машиностроительной отрасли применяются различные упрочняющие технологии, в которых используются термические методы упрочнения: объемная закалка, электронно-лучевые, катодно-дуговые, лазерные и плазменные методы.

Как показала практика, технология плазменного поверхностного упрочнения является наиболее доступной, рациональной, экономически и экологически эффективной по сравнению с другими технологиями упрочнения изделий концентрированными источниками нагрева где используется сложное и дорогостоящее оборудование, предъявляются высокие требования к его техническому состоянию [1]. Способы плазменного упрочнения, имея упомянутые достоинства, постоянно совершенствуются, что обусловлено необходимостью разработки новых методик для получения оптимальных характеристик

2. С целью снижения удельных затрат энергии на фрезерование горной породы и увеличения производительности проходческо-очистного комбайна в его сдвоенном исполнительном органе, включающем левый и правый планетарные механизмы фрезерования, каждый из которых содержит основной редуктор и раздаточный редуктор, на корпусах раздаточных редукторов закреплены с возможностью поворота друг относительно друга две рукояти с режущими дисками, каждая рукоять снабжена дополнительными резцами, установленными в резцедержателях, закрепленных на рукояти, с возможностью осуществления опережающего снятия слоя породы по контуру внешних траекторий резцов режущих дисков, при этом режущие кромки дополнительных резцов расположены в плоскости, перпендикулярной осям переносного вращения рукоятей с режущими дисками [8].

3. Одним из рациональных вариантов модернизации сдвоенного планетарно-дискового исполнительного органа является также непараллельное расположение осей переносного вращения дисков левого и правого механизмов [9], что существенно уменьшает площадь центральной зоны забоя, в которой происходит фрезерование массива породы одновременно зубками дисков левого и правого механизмов.

Выводы.

1. В результате выполненных натурных экспериментов в реальных горно-технологических условиях рудника на проходческом комбайне при различной скорости подачи его на забой получены средние значения сил сопротивления резанию породы на одном зубке, а также удельные затраты мощности на работу роторов. С увеличением толщины снимаемого слоя породы зубками сила сопротивления резанию возрастает, однако удельные затраты мощности на единицу объемной производительности существенно снижаются.

2. Для повышения эффективности исполнительных органов проходческого и проходческо-очистного комбайнов предложены три варианта модернизации исполнительных органов. В первом случае достигается существенное снижение металлоемкости конструкции привода соосных роторов и увеличение его КПД за счет упрощения кинематической схемы.

Во втором варианте модернизации достигается более рациональный режим фрезерования горной породы дисками планетарных механизмов по периферийным зонам выработки за счет дополнительных зубков, установленных на рукоятях.

В третьем варианте с непараллельными осями переносного вращения дисков сдвоенного планетарного механизма обеспечивается существенное уменьшение центральной зоны забоя, в которой работают зубки левого и правого механизмов.

Таким образом, модернизация сдвоенного планетарно-дискового исполнительного органа по второму и третьему вариантам обеспечивает существенное уменьшение образования мелкой и пылевидной фракций и, одновременно, снижение удельных затрат мощности на единицу объемной производительности комбайна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смычник, А. Д. Технология и механизация разработки калийных месторождений : учеб. пособие / А. Д. Смычник, Б. А. Богатов, С. Ф. Шемет. – 2-е изд., доп. и перераб. – Мн. : Юнипак, 2005. – 224 с.

2. Горные машины : учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2. Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых / Г. В. Казаченко, В. Я. Прушак, Г. А. Басалай. – Минск : Вышэйшая школа, 2018. – 228 с.

3. Устройство и эксплуатация проходческого комбайна ПКС-8М / В. А. Данилов [и др.] ; под ред. В. Я. Прушака. – Мн. : Тэхналогія, 2010. – 175 с.

4. Горные машины. Практикум : учебное пособие. / Г. В. Казаченко, Г. А. Басалай, Г. И. Лютко. – Минск : Вышэйшая школа, 2020. – 200 с.

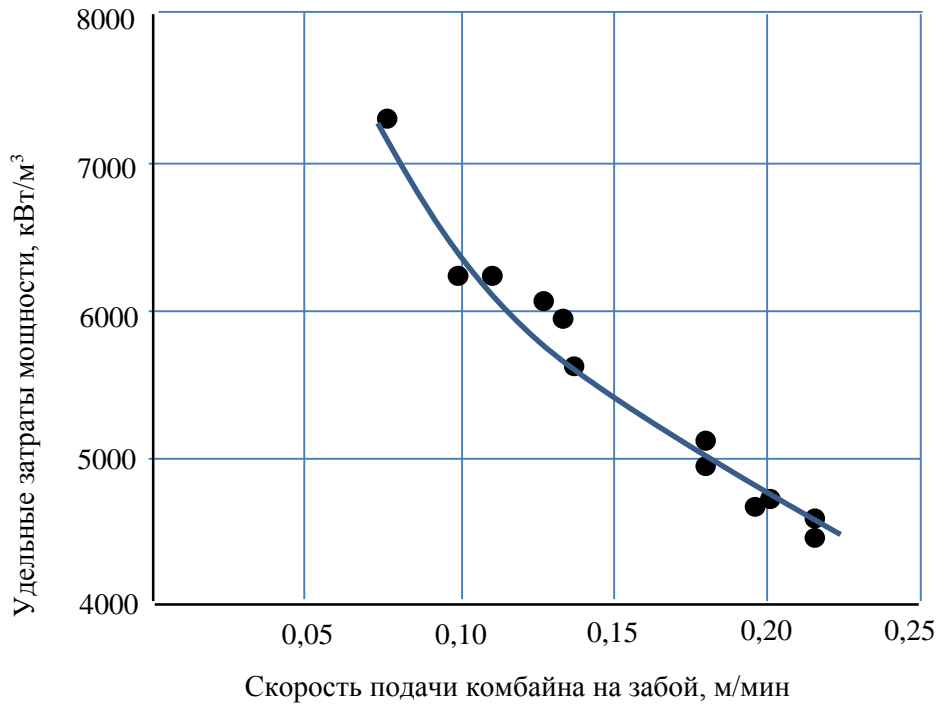


Рис. 4. Зависимость удельных затрат мощности на единицу объемной производительности от скорости подачи комбайна на забой

Основные варианты модернизации исполнительных органов.

1. Оптимизацию конструкции привода соосных роторов проходческого комбайна типа КРП-3 предлагается провести путем его модернизации по схеме одномоторного привода вместо двухмоторного, как показано на рис. 5. Для этого рекомендуется использовать электродвигатель мощностью 240 кВт вместо двух – по 132 кВт. Первая ступень 1 привода может быть выполнена в виде двухступенчатого цилиндрического редуктора с соосными ведущим и ведомым валами [7], или в виде двухступенчатой планетарной передачи. В результате, за счет упрощения кинематической схемы и исключения циркуляции мощности во внутренних контурах повысится КПД привода.

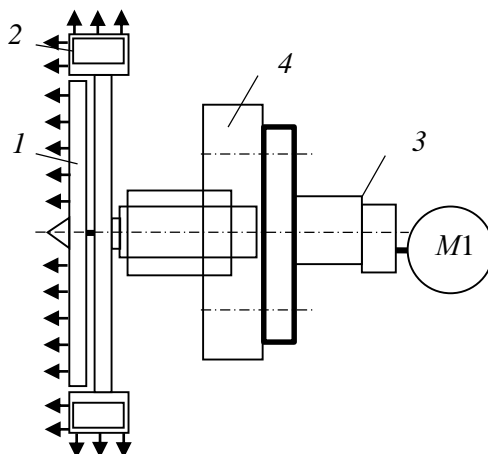


Рис. 5. Схема одномоторного привода соосных роторов:
 1 – центральная ступень привода; 2 – крестовина с ковшами; 3 – первая ступень привода;
 4 – распределительный редуктор второй ступени привода

определенной линии резания разнo удаленной от оси вращения роторов. Принимая во внимание то, что толщина стружки и ширина линии резания для всех зубков одинаковы, в первом приближении принято допущение, что и силы сопротивления резанию на всех зубках также одинаковы. Однако для более глубокого анализа следует учитывать, что кривизна траекторий, а также линейная скорость резания конкретного зубка существенно зависит от радиуса окружности, по которой проходит линия его резания. В свою очередь, и затраты энергии в единицу времени на каждом зубке следует определять с учетом их линейных скоростей резания.

Обработка данных, полученных при непосредственном измерении электрических параметров при работе комбайна в забое, выполнялась с использованием программы PowerGraph. Результаты расчета средней силы сопротивления резанию на каждом зубке при четырех скоростях подачи комбайна на забой представлены на рис. 3.

С учетом того, что на центральном роторе фрезерование горной породы обеспечивается в каждой из 15 линий резания одним зубком, то можно констатировать, что толщина снимаемого ими слоя (толщина стружки) в зависимости от указанных на графике четырех скоростей подачи комбайна на забой при частоте вращения ротора около 13,2 об/мин составила примерно 8, 10, 13 и 17 мм. На крестовине с ковшами при частоте вращения около 7 об/мин расположены по два зубка в линиях резания, поэтому с незначительным допущением можно считать, что толщина стружки также соответствует вышеуказанным значениям для зубков центрального ротора.

На рис. 4 представлена зависимость удельных затрат мощности на единицу объемной производительности от скорости подачи комбайна на забой. Из графика видно, что, как и следует из теории резания (фрезерования) горных пород, с увеличением толщины снимаемого слоя породы зубками силы сопротивления резанию на зубках возрастает, однако удельные затраты мощности на единицу объемной производительности существенно снижаются по экспоненциальному закону. Этот вывод следует учитывать при выборе рабочей скорости подачи комбайна на забой.

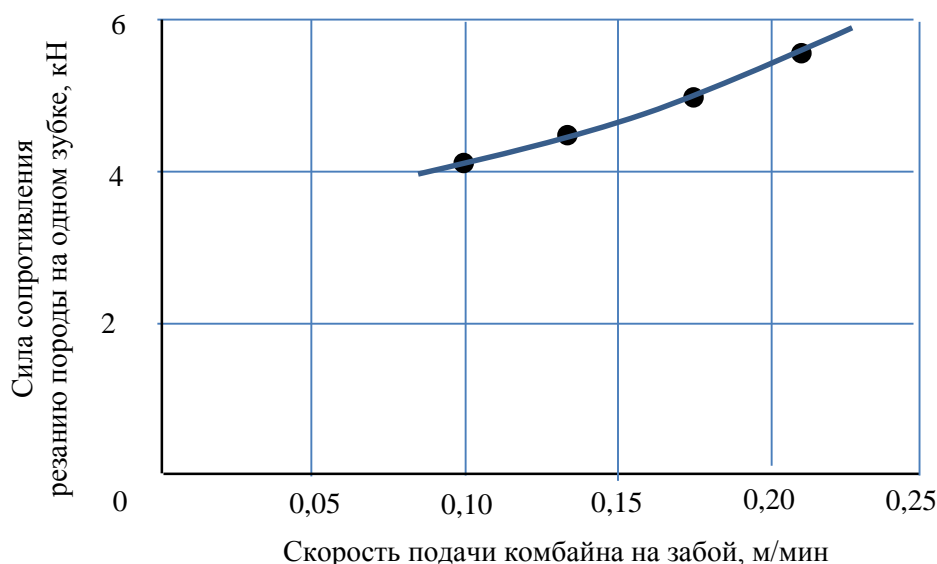


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления резанию породы на одном зубке от скорости подачи комбайна на забой

площади забоя ведется этими комбайнами с значительным перекрытием в его центральной части дисками левого и правого планетарных механизмов, что приводит к нежелательному увеличению содержания мелкой фракции в общей массе отбитой породы, и как следствие, увеличению удельных затрат энергии.

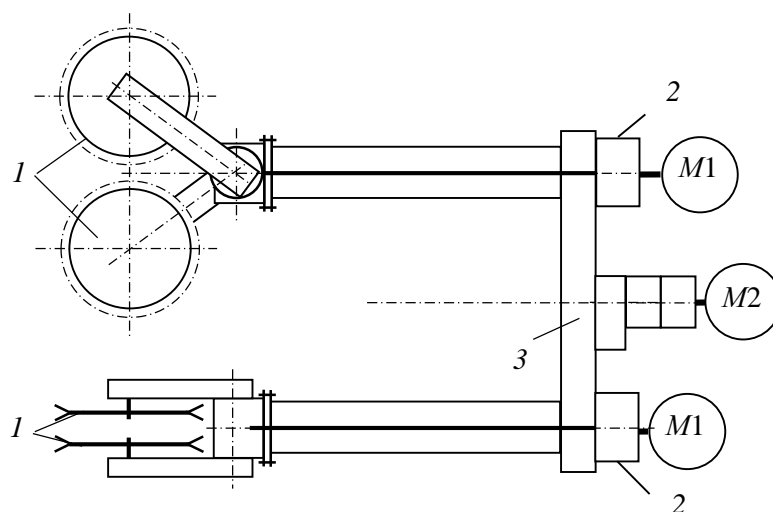


Рис. 2. Схема привода сдвоенного планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна:

1 – режущие диски левого и правого планетарных механизмов; 2 – приводы относительного вращения дисков; 3 – общий привод переносного вращения дисков

Диски планетарных механизмов оснащены тангенциальными резцами РКС-1, имеющими конусную рабочую кромку. Благодаря двойному вращательному движению зубков вместе с дисками в этом режиме происходит полуоткрытое резание, что обеспечивает снижение удельных затрат энергии на разрушение породы по сравнению с закрытым, как отмечалось выше при анализе исполнительного органа комбайна с соосными роторами.

В рассмотренных типах комбайнов бермовые фрезы выполняют двойную функцию – фрезерование массива породы по формируемой плоской форме штрека с одновременным перемещением шнеками сфрезерованной горной массы по почве выработки в поперечном направлении для эффективного зачерпывания ее ковшами наружного ротора или подачи ее в приемный люк скребкового конвейера.

Общим для двух типов комбайнов является то, что они работают в режиме расчетной подачи машины на забой с помощью гусеничного движителя, а также одновременной отработкой массива по всему контуру поперечного сечения.

Цель исследований – проведение серии натурных экспериментов на серийном проходческом комбайне в реальных горно-технологических условиях рудников и на их основе определение нагрузок на зубках, а также удельных затрат энергии на работу соосных роторов.

В результате проведения экспериментов на проходческом комбайне КРП-3-66/1140 при проходке подготовительных горных выработок на руднике 5РУ ОАО «Беларуськалий» получены значения токов и напряжений питания основных электродвигателей привода соосных роторов при фрезеровании зубками разрабатываемого массива горной породы в четырех режимах работы комбайна, характеризующихся различной скоростью подачи его на забой [6].

Исходя из принципиальной схемы расстановки зубков на роторах принято, что на формирование суммарного момента сопротивления фрезерованию породы оказывают влияние моменты сопротивления фрезерованию от каждого зубка, расположенного на

низмами. Комбайны выполняют в основном проходку транспортных, конвейерных и вентиляционных штреков арочной формы, а также сбоек между ними, при формировании шахтных полей для отработки плодородных пластов очистными комплексами.

Первый тип составляют современные проходческие комбайны КРП-3, в которых при однотипном комбинированном исполнительном органе с предыдущим поколением комбайнов типа ПКС-8 в виде соосно расположенных центрального трехлучевого ротора и наружного ротора (крестовины с ковшами), принципиальное изменение претерпел спаренный электромеханический привод соосных роторов, в котором используются отдельные трехступенчатые редукторы с двухступенчатыми планетарными передачами (рис. 1, а, б).

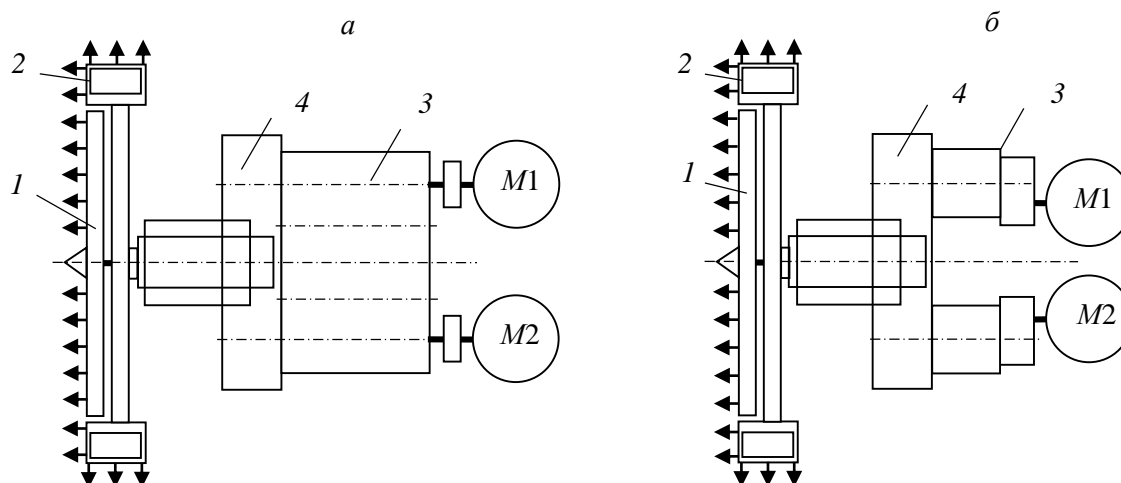


Рис. 1. Схемы двухмоторных приводов соосных роторов проходческих комбайнов:
 а – ПКС-8; б – КРП-3 [5]; 1 и 2 – центральный и внешний роторы;
 3 и 4 – редукторы привода

Основной исполнительный орган комбайна, т. е. центральный ротор и крестовина с ковшами оснащены по фронту основными породоразрушающими элементами, т. е. тангенциальными резцами (зубками) типа Д6.22, а по периферии ковшей – радиальными резцами типа ШБМ. Зубки Д6.22 конструктивно выполнены с твердосплавными вставками в виде цилиндрических стержней диаметром 14 мм, имеющих фронтальную клиновидную рабочую часть. По способу взаимодействия зубков Д6.22 с массивом породы исходя из конструкции их рабочих кромок и круговой траектории их движения как на центральном роторе так и на крестовине с ковшами можно констатировать, что в этом режиме происходит закрытое резание. В результате такого взаимодействия каждого зубка с массивом по фронту забоя формируется ширина полосы, равная трем слагаемым: ширина рабочей части зубка и две боковые треугольные зоны интенсивных сколов породы шириной до 1,3 относительно глубины резания (толщины стружки).

Ко второму типу относятся проходческо-очистные комбайны КПО-10,5 (КПО-8,5) со спаренными двухдисковыми планетарными механизмами фрезерования, выполненными по схеме перпендикулярно расположенных осей дисков в относительном и переносном их вращении (рис. 2). При этом оси переносного вращения дисков левого и правого механизмов параллельны. Диски комбайна работают на полный захват, т. е. ширина фрезерования равна внешнему диаметру диска по концам режущих кромок зубков. Это значит, что в секторах плавного входа и выхода зубков в зонах контакта с массивом породы образуется мелкая фракция. Следует также отметить, что фрезерование массива по

Басалай Г. А.

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФРЕЗЕРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНОЙ ПОРОДЫ
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ**

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Выполнен анализ конструкций исполнительных органов двух основных типов проходческих и проходческо-очистных комбайнов, а также представлены результаты натурных экспериментов на проходческом комбайне с соосными роторами при его работе в условиях рудника разрабатываемого месторождения калийных солей, проведенных с целью определения нагрузок на зубках от сил сопротивления резанию породы, а также удельных затрат энергии на работу фрезерующих механизмов. Предложены основные направления повышения эффективности работы исполнительных органов проходческих комбайнов за счет модернизации фрезерующе-погрузочных механизмов, а также оптимизации процессов взаимодействия породоразрушающих элементов (зубков) с массивом горной породы.

Введение. Основным технологическим процессом при промышленной разработке Старобинского месторождения калийных солей подземным способом в Республике Беларусь за более чем полувековой период является механизированная отработка плодородных горизонтов проходческими и очистными комплексами машин с транспортированием горной породы по горным выработкам участковыми скребковыми и магистральными ленточными конвейерами к пунктам перегрузки в скипы шахтных подъемных машин. В этой связи, эффективность работы технологического комплекса машин и оборудования в рудниках определяется удельными энергозатратами, во-первых, на фрезерование массива горной породы исполнительными органами проходческих, проходческо-очистных и очистных комбайнов, во-вторых, на работу системы рудничного конвейерного транспорта. В настоящее время максимальные суммарные годовые объемы выдаваемой на земную поверхность горной породы из пяти рудников для ее дальнейшего обогащения на четырех солеобогатительных фабриках ОАО «Беларуськалий» составляют около 40 млн. тонн, из которой производят до 8,0 млн. т. высококачественных калийных удобрений. Следует отметить, что в энергетическом балансе добычи и обогащения полезного ископаемого до 80 % занимают затраты, сопровождаемые одновременным фрезерованием, транспортированием, подъемом на поверхность, отделением при обогащении и складированием пустой горной породы. Поэтому, все более остро ставятся задачи на ближайшую перспективу, в том числе, и в направлении повышения эффективности работы исполнительных органов проходческих комбайнов за счет модернизации фрезерующе-погрузочных механизмов, а также оптимизации процессов взаимодействия породоразрушающих элементов (зубков) с массивом горной породы.

Анализ исполнительных органов основных типов проходческих комбайнов. На рудниках ОАО «Беларуськалий» в основном технологическом процессе широко используются два типа проходческих комбайнов в подавляющем большинстве от отечественного производителя – ЗАО «СИПР с ОП» [1–4]. Они оснащены различными по конструктивному исполнению и принципу взаимодействия с массивом горной породы фрезерующими меха-

износо- и коррозионной стойкости СПП при использовании МАО. На основании проведенных исследований разработана технология ГФУЛ 202001.00.00.000 МАО шарового пальца автомобиля МАЗ, что повысило производительность обработки на 20 %.

Заключение. 1. В результате компьютерного моделирования топографии МП в рабочем зазоре при МАО СПП получена двумерная графическая модель с отображением величины градиента магнитной индукции, позволяющая выявить градиентные зоны концентрации магнитной индукции. Экспериментально подтверждено увеличение режущей способности ФАП, 60–75 % вытесняемого ФАЗ металла переходит в микростружку, что вызвано действием теплового эффекта, возникающего от индукционных токов в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала.

2. Предложены новые составы СОТС, повышающие производительность МАО СПП в 1,5–2 раза и уменьшающие шероховатость обрабатываемой поверхности в 2,5–3 раза.

3. Установлен синергический эффект взаимного влияния параметров градиента магнитной индукции, магнитной проницаемости ФАП и свойств СОЖ при МАО СПП и определен его вклад в обеспечение шероховатости обработанной поверхности (R_a , мкм) – 46,8 % и для производительности (ΔG , мг/(см²·мин) – 45,9 % и приведено физическое толкование полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радзевич, С. П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С. П. Радзевич. – Киев : Вища школа, 1991. – 192 с.

2. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.

3. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.

4. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.

5. Энциклопедия машиностроения. Т. III. Технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский [и др.]. – Машиностроение, 2000. – Т. 3. – 420 с.

6. Маляренко, А. Д. Технологические основы управляемого формообразования / А. Д. Маляренко, И. П. Филонов. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ БГПА, 1999. – 212 с.

7. Безъязычный, В. Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении / В. Ф. Безъязычный [и др.] ; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. – М.: Машиностроение, 2007. – 538 с.

8. Акулович, Л. М. Влияние свойств рабочей технологической среды на шероховатость поверхности и производительность при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, М. М. Дечко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67. – № 1. – С. 39–48.

9. Милых, В. И. Автоматизированное формирование расчетных моделей турбогенераторов для программной среды FEMM / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 7–14.

10. Акулович, Л. М. Микрорезание абразивными зёрнами при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер.фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 3. – С. 49–59.

Поступила 20.11.2023

Порядок значимости основных технологических факторов показывает, что на характеристики тонкой кристаллической структуры (σ_1 , σ_{II} и D), обеспечивающие рост физико-механических и эксплуатационных свойств СПП тел вращения, наибольшее влияние оказывает зернистость порошка. Математико-статистические модели активированного процесса MAO, которые были получены центральным композиционным ротатабельным униформ-планированием экспериментов, обеспечили установление рациональных диапазонов технологических параметров. Путем оптимизации основных параметров как механизма самоорганизации, которые описываются регрессионными моделями, основанными на многофакторном планировании экспериментов, получены рациональные диапазоны режимов обработки, что приводит к не хаотичному расположению зерен ФАП, а по строго ориентированным цепочкам. Осуществление процесса микрорезания постоянно обновляющимися режущими кромками зерен ФАП на основании предлагаемых режимов MAO обеспечивает интенсификацию массы срезаемого металла и качества обработки. Установлено, что для повышения производительности G необходимо применять следующие значения технологических режимов: $B > 0,8$ Т, $A > 2$ мм, $V > 0,25$ м/с, $V_p = 2-4$ м/с; для снижения шероховатости обработанной поверхности Ra: $V_o = 0,6-1,0$ м/с, $V_p = 2-4$ м/с, $t = 40-70$ с, $Ra_o = 0,4-0,8$ мкм. Использование рациональных режимов технологических параметров, обеспечивающих компромиссный вариант сочетания максимальной производительности обработки и минимальной шероховатости поверхности при комплексном воздействии компонентов РТС, приводит к самоорганизации цепочек зерен ФАП, которые производят целенаправленное микрорезание при реализации принципа самозатачивания. Установлено, что формирование микрорельефа поверхности при MAO определяется комплексным воздействием магнитного, абразивного и физико-химического факторов, состоящем в проявлении магнитно-пластического эффекта, возникновении индукционных токов, инициируемых воздействием МП, и образовании окисных пленок.

Первоначально изменение высоты микронеровностей характеризуется их резким уменьшением, которое осуществляется преимущественно абразивным резанием. На последующей стадии уменьшение высоты микронеровностей происходит путем сглаживания вершин микровыступов, сформированных в период абразивного резания и удаления окисных пленок. Снижение высоты микронеровностей и увеличение радиуса их округления не сопровождается изменением их шага, микрорельеф поверхности характеризуется шероховатостью $Ra = (0,02-0,08)$ мкм. Сформированный MAO слой отличается уменьшением микротвердости по мере удаления от поверхности и повышением микротвердости, по сравнению с исходной, до 20 % при глубине ее распределения (20–40) мкм. Металлографическим анализом установлено, что содержание остаточного аустенита в поверхностном слое, составляющем (50–100) мкм, снижается в среднем в 1,4 раза по сравнению с результатами MAO СПП, полученных другими исследователями. Рентгеноструктурные исследования показали, что при MAO СПП осуществляется увеличение остаточных сжимающих напряжений по сравнению с результатами, полученными другими исследователями, в среднем на 30 %.

В результате испытаний на износостойкость образцов из легированных сталей установлено, что после MAO СПП коэффициент трения уменьшается на (15–20) %, а средняя интенсивность изнашивания составила $8,2 \cdot 10^{-8}$ мкм/км. В ходе исследований установлено, что образцы СПП, обработанные MAO, после 288 часов коррозионных испытаний, имели покрытие продуктами коррозии только на 61 % в отличие от образцов – после токарной обработки, термообработки и шлифования, процент покрытия продуктами коррозии которых составил 93, 82, 73 соответственно, что показывает повышение

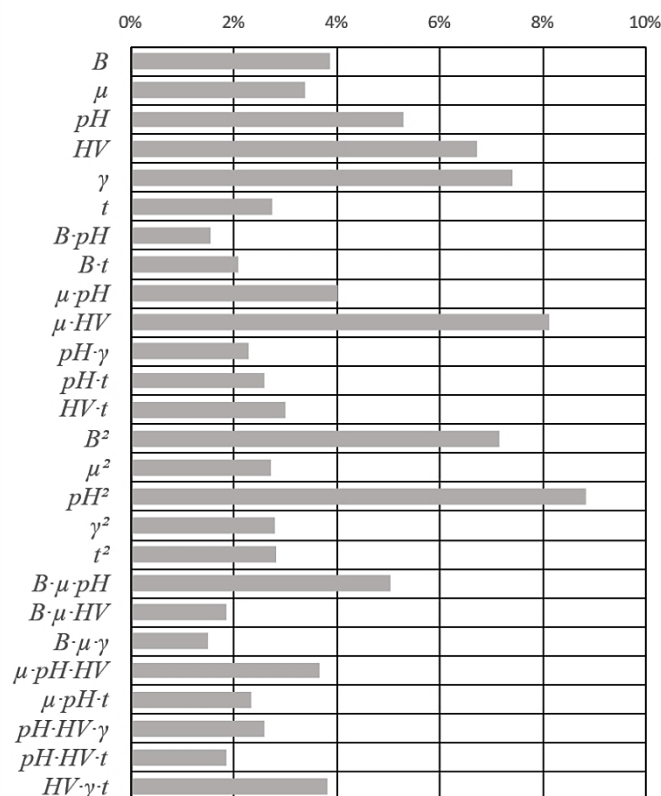


Рис. 3. Относительный вклад факторов МАО и их взаимодействий в изменение шероховатости обработанной поверхности в процессе МАО

$$\begin{aligned}
 Ra = \exp(-2,3649 - 0,0831X_1 + 0,0729X_2 - 0,1139X_3 + 0,1450X_4 + 0,1597X_5 + \\
 + 0,0591X_6 - 0,0332X_1X_3 - 0,0448X_1X_6 + 0,0869X_2X_3 - 0,1752X_2X_4 + \\
 + 0,0493X_3X_5 - 0,056X_3X_6 - 0,0648X_4X_6 + 0,154X_1^2 + 0,0587X_2^2 + \\
 + 0,1904X_3^2 + 0,0601X_5^2 + 0,0609X_6^2 + 0,1088X_1X_2X_3 - 0,0401X_1X_2X_4 - \\
 - 0,0322X_1X_2X_5 - 0,0788X_2X_3X_4 + 0,0502X_2X_3X_6 - 0,0561X_3X_4X_5 + \\
 + 0,0398X_3X_4X_6 - 0,0823X_4X_5X_6,
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta G = \exp(-1,3527 + 0,0976X_1 + 0,1457X_3 - 0,0522X_4 + 0,0542X_6 - \\
 - 0,025X_1X_2 - 0,0213X_1X_3 - 0,0383X_1X_4 - 0,0288X_1X_5 - 0,0415X_2X_3 + \\
 + 0,063X_2X_4 - 0,0215X_2X_6 - 0,0438X_1^2 - 0,0567X_1X_2X_3 - 0,0286X_1X_2X_4.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Выявлено, что по степени влияния как на отдельные параметры, так и на их совокупность в порядке убывания значимости технологические факторы МАО располагаются в ряды (4) и (5), которые показывают, что влияние технологических факторов на производительность (G) аналогично влиянию на шероховатость (Ra).

$$\Delta G: pH \rightarrow B \rightarrow t \rightarrow HV, \tag{4}$$

$$Ra: \gamma \rightarrow HV \rightarrow pH \rightarrow B \rightarrow \mu \rightarrow t. \tag{5}$$

возмущенный диаметр поперечного сечения порового канала не превышает 0,02 мм. Поэтому в качестве СОТС для МАО СПП рекомендуется применять полусинтетические СОТС, диапазон значений кинематической вязкости которых составляет (30–40) сСт, а в их составе имеется (5–10 %) нефтяных масел. Созданы новые виды полусинтетических СОТС с применением сульфатированной соли лауриновой кислоты $C_{12}H_{25}SO_4Na$, мас. % (55–60), что позволяет получить необходимый комплекс свойств по причине высокой стойкости пенного столба. Результаты испытаний показали высокую эффективность при обработке деталей из подшипниковой стали. Вторым вариантом заключается в создании лигносульфонатного компонента, мас. % 10, в базовой структуре СОТС, обладающего высокой реакционной способностью. Проведенные испытания МАО стали 20 показали высокую эффективность СОТС с наличием лигносульфонатного компонента при уменьшении расхода СОТС на 20 % соответственно. Проведенные испытания данного вида СОТС показали, что производительность процесса МАО алюминиевых сплавов АЛ–6 и Д16 в среднем на 1,5 и 1,6 раза выше, чем СинМА-1.

Кроме влияния каждого компонента РТС на результаты МАО, экспериментально установлено проявление эффектов их взаимодействия, заключающихся в том, что изменение некоторого технологического параметра одного компонента РТС приводит к самоорганизованному изменению технологических параметров других компонентов РТС, что в конечном итоге приводит к изменению в целом свойств РТС. На основе анализа экспериментальных данных по выявлению эффектов взаимодействия в качестве управляющих факторов при МАО определены обобщенные параметры компонентов РТС (таблица). Градиент магнитной индукции B определяет силовое воздействие МП на ФАЗ по величине и направлению, а время обработки t – продолжительность этого воздействия; магнитная проницаемость μ и микротвердость HV абразива связаны с магнитными свойствами ФАП и режущей способностью ФАЗ; вязкость СОЖ γ ; водородный показатель (кислотность) pH характеризуют технологические свойства СОТС.

В результате проведенных исследований получены уравнения регрессии в нормированных координатах (2) и (3), определяющие зависимости шероховатости поверхности Ra , мкм и производительности процесса МАО ΔG , мг/(см²·мин) от управляющих технологических факторов, что позволило установить синергический эффект взаимодействия компонентов РТС при МАО беговых дорожек шариковых подшипников и определить относительный вклад каждого из физических управляющих факторов: в повышение производительности (ΔG , мг/(см²·мин) при двухфакторных взаимодействиях ($\mu \cdot HV$ – 9 %, $\mu \cdot pH$ – 6,5 %) и трехфакторных ($B \cdot \mu \cdot pH$ – 7,5 %, $B \cdot \mu \cdot HV$ – 4 %); в достижение требуемой шероховатости поверхности ($Ra = 0,1$ мкм) – при двухфакторных взаимодействиях ($\mu \cdot HV$ – 8,2 %, $\mu \cdot pH$ – 4 %) и трехфакторных ($B \cdot \mu \cdot pH$ – 5 %, $HV \cdot \gamma \cdot t$ – 3,8 %), рис. 3.

Оценка относительного вклада факторов МАО показала, что количественно синергический эффект в результате их взаимодействия составляет для шероховатости обработанной поверхности (Ra , мкм) – 46,8 % и для производительности (ΔG , мг/(см²·мин) – 45,9 %. Относительный суммарный вклад одиночных факторов имеет численное значение – для шероховатости (Ra , мкм) – 29,1 %, а для производительности (ΔG , мг/(см²·мин) – 48,2 %. Взаимное влияние или синергия компонентов РТС состоит в том, что МП осуществляет формирование цепочечной структуры ферроабразивной «щетки», что определяет давление на ФАП и приводит к деформированию срезаемого слоя обрабатываемой поверхности. Воздействие СОТС проявляется в смачиваемости и охлаждении обрабатываемой поверхности, нагреваемой при возникновении пинч-эффекта, что, в свою очередь, повышает пенообразующую способность СОТС и ее проникающую способность в поровое пространство ферроабразивной «щетки». ФАП определяет степень увеличения магнитной проницаемости рабочего зазора как зоны на границе двух сред.



Рис. 2. Форма стружек (x250) (а) и следы микрорезания (x100) (б) после МАО

Одновременно абразивному резанию способствует снижение предела текучести материала, связанное с проявлением магнитоэластического эффекта [10]. Проведенные исследования стружкообразования при МАО показали, что критерием использования геометрических фигур в качестве моделей ФАЗ должна быть форма режущей кромки. Анализ формы ФАЗ, полученных методом распыления состава, показывает, что наибольшей степенью взаимодействия зерна и обрабатываемой СПП обладают форма в виде эллипсоида вращения. Установлена зависимость между величиной площади поперечного сечения зерна S , глубиной его внедрения h , радиусом округления режущей кромки ρ и углом ε при вершине:

$$S = 0,179 \times h^{0,896} \times \rho^{0,567} \times \varepsilon^{0,508}. \quad (1)$$

Экспериментально установлено, что наиболее эффективными для МАО СПП являются ФАП с ферромагнитной матрицей, полученные методом распыления и покрытые прочной химически инертной абразивной оболочкой, а также содержащие включения тугоплавких карбидов, оксидов, боридов. Показатели магнитной проницаемости таких ФАП превышают 6,5 мкГ/м, абразивная способность достигает уровня (5–10) мг/(см²·мин), что позволяет обеспечить их проникновение в труднодоступные участки СПП тел вращения для достижения требуемых показателей производительности и качества процесса МАО.

На удаление выступов неровностей существенное влияние оказывают СОТС. В настоящее время для МАО сложнопрофильных поверхностей в качестве СОТС применяют эмульсии на основе эмульсолов ЭТ, ЭГТ, Э–2. Однако наличие грубодисперсной (10⁻¹–1) мм фазы таких эмульсий приводит к быстрому прекращению фильтрации СОТС ферроабразивной «щетки», сопровождающемуся разрушением ФАЗ, полученных «керметной технологией» и образованием субстрата, состоящего из субмикронных ферромагнитных частиц Fe определенной концентрации и срезаемой стружки. Подобное разрушение приводит к резкому повышению центров кристаллизации масляных глобулей, и парафинированные масляные глобули выпадают в виде тонкодисперсной и объемной взвеси, осаживаемой на микрорельефе зерен ФАП, что уменьшает режущую способность. Альтернативой эмульсолам ЭТ, ЭГТ, Э–2 предложены синтетические СинМА–1 и СинМА–2 ТУ 38.5901176–91, изготовленные на основе ПАВ и синтетических жирных кислот, но они не обеспечивают такой производительности, как эмульсии. При этом наблюдается повышенный износ зерен ФАП. Размер дисперсной фазы частиц синтетических СОТС (СинМА–1) составляет (10⁻⁴–10⁻⁶) мм, полусинтетических – (10⁻²–10⁻³) мм, масляных (ЭГТ, Э–1, Э–2) – (10⁻¹–1) мм соответственно. Проведенный расчет величины пор в ферроабразивной «щетке» с размерностью зерен (0,1–0,16) мм показывает, что не-

0,25 Тл. В пространстве вне рабочего зазора происходит выпучивание магнитного потока, заключающееся в его вытеснении из рабочего зазора и образование флюкуляции, величина которой равна 0,07 Тл, что составляет около 7 % от общей величины магнитного потока.

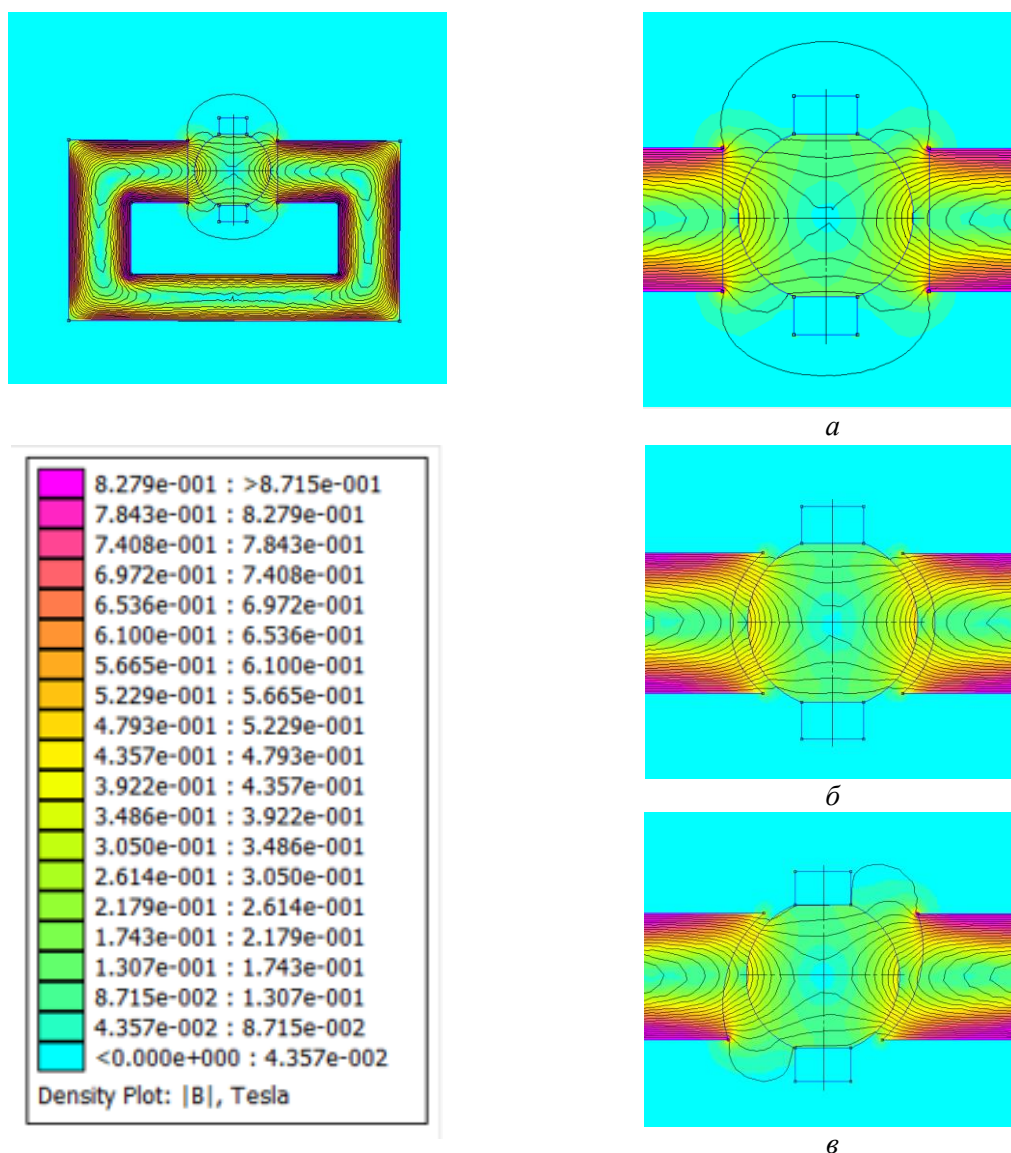


Рис. 1. Топография МП в рабочем зазоре при МАО наружных сферических поверхностей: а – плоский; б – эквидистантный; в – серповидный

Концентрации градиента магнитной индукции оказывают влияние на стружкообразование. Экспериментально установлено, что оптимальные условия стружкообразования при размерности зерен ФАП $\Delta = (160 / 125)$ мкм обеспечивают глубину резания $(0,28-0,51)$ мкм при величине магнитной проницаемости РТС в зазоре $(8-20)$ мГн/м. Экспериментально подтверждено увеличение режущей способности ФАП, при котором $(60-75)$ % вытесняемого ферроабразивным зерном металла переходит в микростружку, что вызвано действием теплового эффекта, возникающего от индукционных токов в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала (рис. 2). В результате исследования процесса микрорезания единичным зерном выявлено, что глубина царапины при наложении магнитного поля увеличивается в $(1,5-1,6)$ раза.

зазоре сложного профиля целесообразно проводить как математическим моделированием, так и компьютерным моделированием с использованием программы Femm, а также экспериментальными методами для решения осесимметричных задач [9]. Это аргументировано тем, что цепные методы расчета обеспечивают большую погрешность, поскольку модель трехмерного МП заменяется упрощенной. Аналитические методы требуют трудоемких вычислений, а в ряде случаев их применение невозможно. Результат решения системы уравнений Максвелла был определен выбором граничных условий при том, что модельное решение имеет большое количество ограничений и подразумевает ряд допущений, поэтому полученные результаты являются оценочными. Однако установление напряженности магнитного поля H в любой точке рабочего зазора обеспечивает одинаковый диапазон значений магнитной индукции B на каждом локальном участке, что позволяет определить пространственное расположение магнитного потока в рабочем зазоре и рациональную конструкцию магнитопровода в зависимости от выбранной технологической схемы обработки.

Численное решение полученных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных осуществляли методом конечных элементов с использованием программных комплексов Femm 4.2. Это позволяет получить более точные зависимости величин градиента магнитной индукции от геометрической формы и размеров рабочего зазора, существенно сократить сроки разработки конструкций магнитных систем. Также были проведены исследования пространственного распределения магнитного потока в рабочем зазоре с использованием экспериментальных методов для решения осесимметричных задач. Полученные результаты этих исследований позволили установить, что наиболее действенным способом изменения плотности магнитного потока в рабочем зазоре является регулирование межполюсного расстояния, что обеспечивает самоформирование в рабочем зазоре режущего контура абразивной «щетки» адекватно заданной форме обрабатываемой поверхности.

Распределение магнитного поля ЭМС в виде двумерной модели, развернутой в пространстве, представлено на рис. 1.

В области плоского зазора наибольшая концентрация линий магнитной индукции достигается в его средней части между поверхностью разрыва магнитопровода и максимальным диаметром неполной сферы исследуемого образца (0,74 Тл). На верхней и нижней границах рабочего зазора величина магнитной индукции у поверхности разрыва магнитопровода составляет величину (0,16–0,18) Тл. Изменение рабочего зазора на два порядка (от 0,5 мм до 5 мм) существенно уменьшает величину поля до 0,05 Тл. В пространстве вне рабочего зазора происходит выпучивание магнитного потока, заключающееся в вытеснении магнитного потока из рабочего зазора и образовании флокуляции, величина которой равна 0,13 Тл, что достигает порядка 15 % от общей величины магнитного потока (рис. 1, а).

В эквидистантном зазоре (рис. 1, б) наблюдается достаточно равномерное распределение магнитного поля по радиусу объекта и низкий уровень образования флокул за границами рабочего зазора. Сближение полюсов электромагнита и образующей сферической поверхности ограничивается длиной цепочек, создающих необходимую магнитодвижущую силу. Распределение магнитной индукции при зазоре 0,5 мм и 5 мм составляет значения 0,69 Тл и 0,071 Тл соответственно.

При использовании встречно направленных асимметрично серповидных наконечников (рис. 1, в) величина магнитной индукции на поверхности разрыва магнитопровода у верхней границы рабочего зазора составляет 0,57 Тл, на нижней – 0,83 Тл, в средней части – 0,72 Тл. При величине рабочего зазора $\delta = 1$ мм происходит наиболее равномерное распределение магнитного поля в рабочей зоне (от 0,83 Тл до 0,33 Тл). При увеличении зазора до 5 мм наблюдается плавное уменьшение магнитной индукции от 0,83 Тл до

на первом этапе математическое моделирование, основанное на получении многофакторных уравнений, описывающих поведение технологического процесса, и его многокритериальную оптимизацию с помощью построенной математической модели. На втором этапе – управление процессом МАО, направленным на стабилизацию и равномерность давления ФАЗ по всей площади СПП тел вращения изменением потоками магнитной индукции с организацией обратных связей. Интенсификация удаления выступающих на обрабатываемой поверхности неровностей при МАО связана как с необходимостью создания новых видов СОТС и ФАП, так и с разработкой метода расчета топографии МП и управления величиной его градиента.

Основная часть. Сложившееся положение в области технологии МАО СПП тел вращения вызвано отсутствием научно обоснованных параметров РТС, включающей компоненты: ФАП, из которого формируется режущий инструмент; магнитное поле (МП), которое удерживает ФАП в рабочем зазоре и формирует из него абразивную «щетку»; смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), облегчающие процесс резания и повышающие интенсивность срезания неровностей. В то же время у исследователей о режущем инструменте при МАО сложилось устойчивое представление только как о ФАП без учета роли СОТС, МП и синергизма компонентов РТС. Это часто приводит к ошибкам при выборе параметров и назначении режимов МАО, а в результате – к непроизводительным потерям и пониженным эксплуатационным свойствам деталей.

Экспериментально установлено, что применяемые ФАП, полученные методом «керметной технологии», а также механические смеси, имеют недостаточные магнитную проницаемость, микротвердость и период стойкости. Эти показатели свойств ФАП при их высокой стоимости являются аргументом проведения научных исследований в направлении создания новых структур и свойств ФАП. Для повышения производительности МАО и качества поверхностей требуется управление градиентом магнитной индукции в зоне резания при минимальных размерах концентраторов магнитного поля и их правильном расположении относительно обрабатываемого изделия. Используемые при МАО масляные СОТС имеют низкие показатели фильтрации при обработке труднодоступных участков СПП, что приводит к высокой степени сводовой кольматации РТС и быстрой потере режущей способности. Синтетические СОТС имеют высокую стоимость, низкие смазывающее, диспергирующее и пластифицирующее действия, неравномерность распределения порции по объему РТС. Проблема повышения производительности МАО СПП тел вращения и качества обработанной поверхности заключается в научном обосновании рациональных параметров РТС с учетом синергизма их параметров, обеспечивающих микрорезание постоянно обновляющимися режущими кромками зерен ФАП при реализации принципа самозатачивания. При этом принято допущение, что ФАЗ контактируют с обрабатываемой поверхностью по вершинам микронеровностей, которые являются концентраторами силовых линий МП.

На основании проведенного анализа выявлена необходимость:

- создания новых видов ФАП и СОТС, имеющих повышенные абразивные, магнитные, смазочные, охлаждающие и моющие свойства;
- установления механизма и методов активирования МАО СПП тел вращения;
- определения оптимальных параметров компонентов РТС, обеспечивающих синергизм их свойств и самоорганизацию процесса срезания неровностей поверхности;
- формирования топографии магнитного поля в зоне резания для обеспечения заданных геометрических и физико-механических свойств поверхностного слоя после МАО.

Сложность расчета МП для МАО СПП обусловлена нестационарностью градиента магнитного потока в рабочей зоне, вызванной его изменением в пространстве и во времени. На основе анализа цепных и полевых методов расчета магнитных систем установлено, что исследования пространственного распределения магнитного потока в рабочем

цессе МАО ферроабразивные зерна (ФАЗ) в свободном состоянии помещают в магнитное поле, под действием которого они ориентируются так, что к обрабатываемой поверхности обращены их наиболее острые кромки. В результате этого на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания эластичным инструментом. Под действием магнитного поля в процессе обработки происходит переориентация незакрепленных ФАЗ, которые стремятся сориентироваться наибольшей осью перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2–3 раза снижает затраты на инструмент. МАО обеспечивает шероховатость поверхности по параметру $Ra = 0,01 \dots 0,4$ мкм, снижение температуры резания по сравнению с традиционными методами абразивной обработки, что способствует образованию нового качества поверхности и структуры поверхностного слоя.

Постановка задачи исследования. Ранее проведенные исследования позволили создать технологии МАО и оборудование для ее реализации, в основном, деталей простой геометрической формы. Что касается финишной обработки СПП, то достигнутый уровень исследований позволил разработать технологии и оборудование для МАО режущих лезвийных и медицинских инструментов, лопаток газотурбинных двигателей, базирующиеся на использовании больших кольцевых зазоров и индукторов на постоянных магнитах (ИПМ). Однако такой подход для обработки СПП тел вращения является неэффективным из-за низкой производительности, высокого энергопотребления из-за использования крупногабаритных электромагнитных систем (ЭМС), большого расхода дорогостоящего ферроабразивного порошка (ФАП). Вместе с тем, оптимизировать традиционными методами параметры и режимы технологического процесса МАО не представляется возможным, так как однозначно прогнозировать результаты обработки невозможно из-за особенностей динамической модели процесса МАО, состоящих в том, что:

- ФАЗ имеют стохастическую геометрию и при МАО случайным образом распределены на обрабатываемой поверхности;
- режущая способность ферроабразивной щетки зависит от степени уплотнения ФАЗ, что также носит стохастический характер;
- интенсивность резания каждым ФАЗ зависит как от степени воздействия магнитного поля на компоненты рабочей технологической среды, так и от магнитной проницаемости ФАЗ, а также от свойств смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Указанные особенности дают основание процесс МАО уподобить открытой нелинейной самоорганизующейся системе [8], подверженной колебаниям, в результате которых она развивается и движется к относительно устойчивому состоянию. Этому способствует постоянный энергетический и материальный обмен системы с окружающей средой. В сложившихся условиях становится актуальной задача разработки МАО СПП тел вращения комплексным воздействием компонентов рабочей технологической среды (РТС) с учетом синергизма их свойств.

Цель настоящего исследования: интенсифицировать энергетический и материальный обмен в системе «Обрабатываемая поверхность детали – рабочий зазор – полюсный наконечник магнитопровода», для чего установить наиболее коррелирующие между собой технологические параметры рабочей технологической среды МАО и дать количественную оценку их взаимовлияния и относительного вклада в синергический эффект.

Методика исследований. При решении подобных задач, как правило, показатели качества и производительности являются конфликтующими параметрами, оптимальные значения которых достижимы при различных значениях управляющих факторов. Поэтому оптимизация технологического процесса требует поиска варианта, компромиссного по обоим критериям. Эффективной методологией решения этой проблемы является

обобщенного фактора в синергический эффект, что позволяет интенсифицировать процесс срезания неровностей в труднодоступных участках сложного профиля.

Введение. Повышение силовых и скоростных параметров машин и механизмов наиболее просто реализуется использованием в их кинематических цепях деталей со сложным профилем поверхностей (СПП), способных передавать как усилие, так и закон перемещений. СПП применяют в конструкциях изделий машино-, приборо-, станко-, авиа-, судостроения, оборудовании по переработке сельскохозяйственного сырья, а также в изделиях бытового назначения [1–2]. Особую «платформу» (до 70 %) в общем объеме СПП занимают тела вращения. К ним относятся: в мобильных машинах – детали с наружными и внутренними неполными сферическими поверхностями (шаровые опоры и пальцы шарниров рулевого управления, беговые дорожки подшипников качения); в металлорежущих станках – шпиндели и оправки, имеющие поверхности с высокими требованиями по точности и шероховатости обработанной поверхности; зубчатые колеса. Объем производства шаровых пальцев автомобилей МАЗ за 2020 г., согласно данных журнала «Autoversity» составил более 20 тыс. единиц, а по данным ежегодных отчетов выпуск токарных станков в 2025 году достигнет 1,9 млн. единиц.

Достигнутый в настоящее время уровень технологии формообразования поверхностей сложного профиля базируется на использовании станков с ЧПУ, однако при этом для финишной абразивной обработки требуется создание дорогостоящих специальных инструментов, у которых профиль режущей кромки должен геометрически или программно отражать топологию обрабатываемой поверхности. При обработке таким инструментом поверхностей с переменной кривизной изменяются значения фактических углов резания и, как следствие, давление инструмента и скорость резания на различных участках контура деталей имеют разные значения. В результате на отдельных участках обрабатываемых поверхностей возникают дополнительные погрешности формы и разброс параметров шероховатости, что приводит к неоднородности показателей качества и необходимости дополнительных, в основном ручных, доводочных операций.

Формирование микропрофиля поверхностей деталей происходит при их изготовлении на операциях финишной обработки, доля которых в производственных процессах постоянно увеличивается в связи с внедрением технологий изготовления заготовок (обработка давлением, точное литье, порошковая металлургия и т. п.), снижающих припуски на механическую обработку [3]. Современное машиностроение располагает достаточно большим числом методов и способов формирования рабочих поверхностей деталей машин с обеспечением заданных шероховатости и физико-механических свойств, в том числе пластическое деформирование поверхностного слоя [4; 5], механическая обработка лезвийными и абразивными инструментами [6], электрофизические и электрохимические методы [7]. Однако по производительности и экологическим соображениям доминирующим финишным методом остается механическая абразивная обработка, которая нередко является единственно возможным методом обеспечения требуемого качества поверхности.

По виду режущего инструмента существующие методы финишной абразивной обработки поверхностей можно разделить на обработку закрепленным, свободным и подвижно-координированным абразивным зерном. При любом способе финишной абразивной обработки важнейшим фактором является возможность изменять давление частиц абразивного порошка на обрабатываемую поверхность заготовки. В незакрепленном состоянии частицы абразива более полно используют свои режущие способности, так как происходит нивелирование их рабочих кромок относительно обрабатываемой поверхности. К одному из перспективных способов финишной обработки эластичным инструментом относится магнитно-абразивная обработка (МАО). В про-

конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2023)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2023. – 308 с. (С. 20–32).

4. Ажар А. В., Дулуб А. Д., Сивак М. В. Оценка ресурса сборного комбинированного инструмента по временной стойкости и количеству обработанных отверстий. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ – 2023». Сборник материалов X Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 09–10 ноября 2023 года. – Т. 1. – Минск: БНТУ, 2023. – 176 с. (С. 50–52).

5. Степанов М. С., Иванова М. С. Разработка математической модели выбора наиболее выгоднейших режимов резания комбинированным осевым инструментом. Машиноведение и машиностроение. Технологический аудит и резервы производства. – № 4/1(24) – 2015. – С. 69–72.

6. Ажар А. В., Кочергин А. И. Использование и оптимизация условий эксплуатации комбинированных осевых инструментов. Машиностроение. – Мн., 2002. – Вып. 18 – С. 34–42.

7. Ажар А. В., Кочергин А. И., Ратько Е. Ф. Оптимизация условий обработки ступенчатых отверстий осевыми инструментами на примере комбинированных зенкеров. Машиностроение. – Мн., 2009. – Вып. 25. – С. 283–291.

8. Ажар А. В. Анализ структурно-технологической надежности комбинированных осевых инструментов / А. В. Ажар, О. К. Яцкевич, Л. А. Колесников // материалы МНТК «Машина-созликда фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг интеграцияси: тенденциялар, муоммолар ва ечимлар», 19.05.2022, Ташкент. – 2022. – 286 с. (С. 220–225).

9. Попов А. П., Свириденко Д. С., Комаров Ю. Ю. Прогресс в применении осевых комбинированных инструментов. Мир транспорта. 2017; 15(6):88–101. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2017-15-6-8>. – Дата обращения: 12.11.2023.

10. Жарликов Н. В. Комбинированные режущие инструменты. – М. Свердловск: Машгиз. Урало-Сибирское отд-ние, 1961. – 78 с.

11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под ред. Дальского А. М., Косиловой А. Г., Мещерякова Р. К., Сулова А. Г. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 2003. – 944 с.

12. Учебное пособие «Технология обработки металлов резанием». 2017.11. – Режим доступа: https://xn---2100-ywvwxrka13ag0c.xn--p1ai/uploadedFiles/files/Training_Handbook_RUS_2-compressed.pdf.pdf. – Дата обращения: 12.11.2023.

Поступила 12.12.2023

УДК 621.923.04

Акулович Л. М., Сергеев Л. Е.

**СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье показано, что формирование топографии поверхностей пар трения, снижающей износ сопрягаемых поверхностей деталей, происходит при их изготовлении на операциях финишной абразивной обработки, среди которых одной из перспективных является магнитно-абразивная обработка эластичным инструментом. Предложен метод повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения, основанный на выявлении эффектов взаимодействия технологических факторов и их синергизма. Приведены результаты экспериментальных исследований многокритериальной оптимизации технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения в виде многофакторных уравнений, количественно описывающих вклад каждого

Выводы.

1. Для **1-го метода** расчета режимов резания ступень КОИ принятая за расчетную (№ 2 большего диаметра) остается лимитирующей как по временной стойкости, так и по количеству отверстий, обработанных до отказа инструмента во всем диапазоне размеров.

2. Для **2-го метода** расчета ступень КОИ принятая за расчетную (№ 1 меньшего диаметра и большей длины) не является лимитирующей по временной стойкости, однако при увеличении диаметра и длины крепежного отверстия становится лимитирующей по количеству отверстий, обработанных до отказа инструмента.

3. Для **3-го метода** расчета ступень № 2 КОИ является лимитирующей по временной стойкости, однако при увеличении диаметра и длины отверстия ступень № 1 становится лимитирующей по количеству отверстий, обработанных до отказа инструмента.

4. При назначении режимов резания по всем **3-м методам** отношение временной стойкости и отношение наработки, выраженной в количестве обработанных отверстий до отказа, уменьшается с увеличением диаметра и длины отверстия относительно условной величины наработки на отказ равной «1», что позитивно сказывается на выработке полного ресурса инструмента. При этом интенсивность выравнивания наработки, выраженной количеством обработанных отверстий выше, чем такая же интенсивность, выраженной стойкостью в минутах времени резания ступеней.

5. Несмотря на то, что основным фактором, определяющим стойкость КОИ, является скорость резания, напрямую связанная с диаметром ступеней, при оценке ресурса числом обработанных отверстий важным показателем становится длина ступеней отношение которых растет в большей степени чем отношение диаметров.

6. Для рассматриваемого размерного ряда крепежных отверстий, обрабатываемых на автоматизированном оборудовании предпочтение, надо отдавать КОИ при условии выбора метода назначения режимов резания, обеспечивающего лучшую производительность и выработку максимального ресурса.

7. Исходя из полученных данных метод расчета режимов резания для КОИ стоит выбирать в зависимости от целей производства.

Лучшую безотказность инструмента, обеспечат режимы резания, полученные классическим **методом 1** (по ступени большего диаметра), но неполная выработка и уменьшенная скорость резания сверлильной ступени, приведут к недоиспользованию ресурса КОИ и падению производительности обработки.

Лучшую производительность и равномерную выработку ресурса обеспечивают **методы 3.2 и 2** расчета режимов, где предпочтение отдается ступени меньшего диаметра с большей длиной резания, но при этом существенно падает наработка на отказ. Минимальное значение наработки показывает **метод 3.2**.

Наиболее компромиссный по всем 3-м критериям оптимизации работоспособности КОИ является **метод 2**.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке БРФФИ в рамках договора на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методологии расчетов режимов резания в машиностроении (на примере обработки осевым инструментом)» № Т22УЗБ-077.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А. Р. Современные тенденции в конструировании специального режущего и вспомогательного инструмента для автоматизированного производства. – М.: ВНИТЭМПР, 1985. – 48 с.
2. Малышко И. А. Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации). – Донецк: ПКТИ, 1996. – 135 с.
3. Ажар А. В., Колесников Л. А., Яцкевич О. К. Стратегии оптимизации технологии обработки отверстий комбинированными инструментами на станках с ЧПУ. Материалы XVI всероссийской

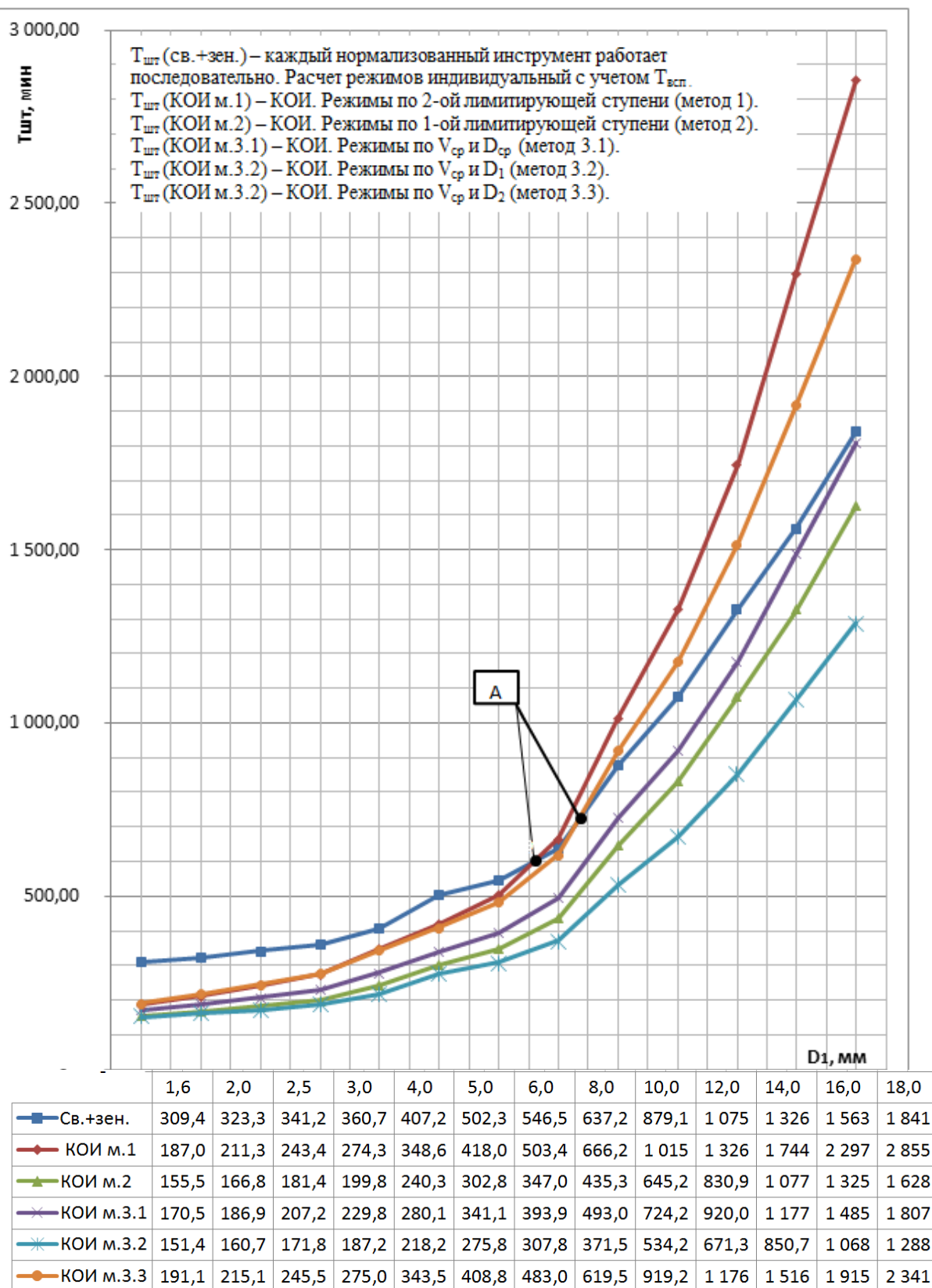


Рис. 9. Штучное время ($T_{шт}$) при обработке отверстий с поднутрением при разных стратегиях управления процессом резания, на партию отверстий 1000 шт.

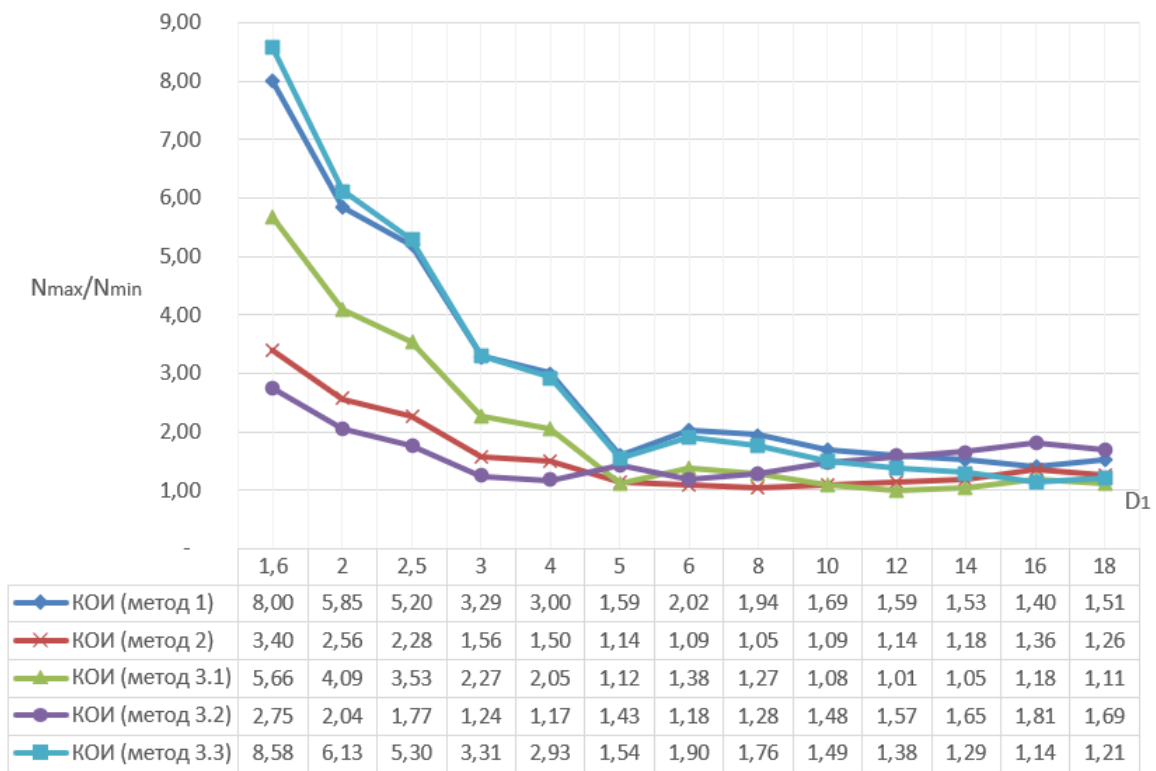


Рис. 8. Относительная штучная наработка до отказа N_{max}/N_{min} КОИ в зависимости от диаметра D_1 обрабатываемого отверстия при различных стратегиях назначения режимов резания

Анализ производительности показал, что наименьшее штучное время $T_{шт}$ при обработке всего размерного ряда крепежных отверстий обеспечивает КОИ со стратегией назначения режимов резания по $V_{ср}$ и D_1 (**метод 3.2**). Удовлетворительную производительность обеспечивает КОИ при назначении режимов по 1-ой ступени (**метод 2**). В диапазоне диаметров отверстий $D_1 = 1,6-8$ мм предпочтение надо отдавать КОИ при любом методе назначения режимов. При $D_1 > 8$ мм наихудшую производительность показывает КОИ с назначения режимов по 2-ой ступени (**метод 1**), а при $D_1 > 10$ мм выбор обработки отверстий последовательно сверлом и зенкером может быть предпочтительнее КОИ с режимами назначенными еще и по **методу 3.3** (точки «А» на рис. 9) и это несмотря на потери времени на подвод, отвод и смену нормализованного инструмента. Увеличение диаметра отверстия приводит не только к увеличению $T_{шт}$, но и к росту разницы между $T_{шт}$ в зависимости от метода назначения режимов резания которая достигает 1567 мин на партию 1000 отв. и кратна 2,2 раза.

Таким образом, **методы 3.2 и 2** обеспечивают наилучшие показатели производительности и максимальной выработки ресурса инструмента. При необходимости обеспечить максимальную наработку на отказ следует применять **методы 1 и 3.3**, имеющие худшие показатели производительности и относительной наработки на отказ КОИ.

В ходе моделирования процесса обработки крепежных отверстий с поднутрением при использовании нормализованных инструментов (сверло, зенкер) и КОИ при назначении режимов резания различными методами получены данные позволяющие оценить минимальную штучную наработку на отказ (рис. 7), относительную (ресурсную) наработку (рис. 8) и штучное время, включающее машинное и вспомогательное время обработки отверстий на обрабатывающем центре с ЧПУ (рис. 9).

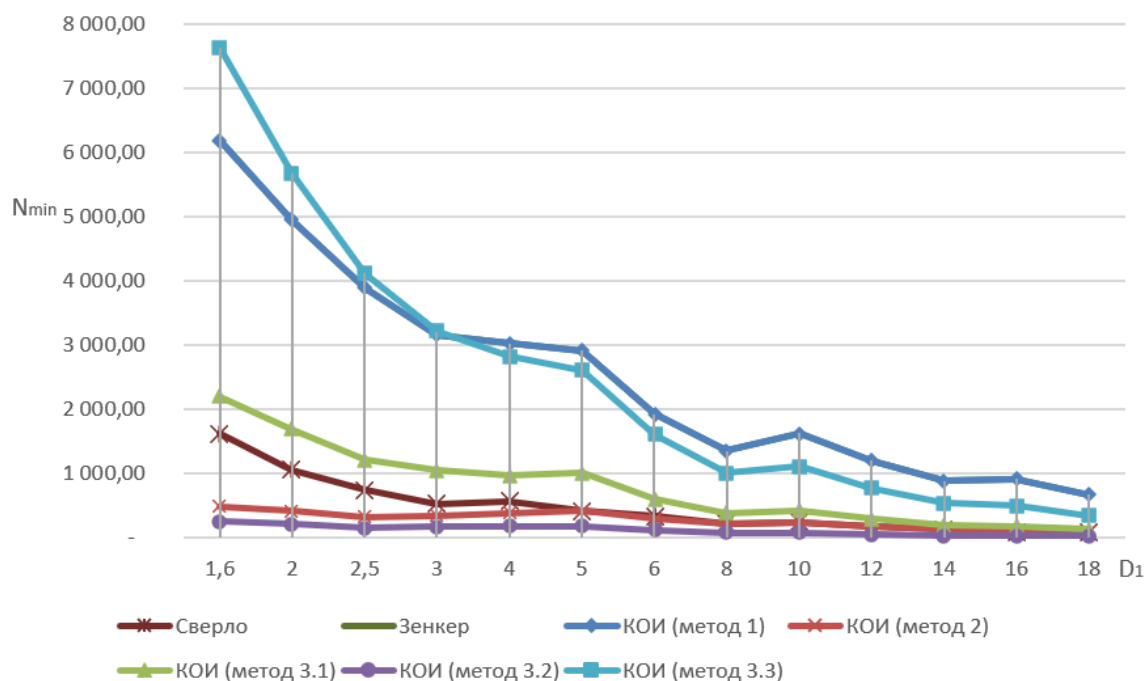


Рис. 7. Штучная наработка до отказа N_{min} нормализованными или КОИ в зависимости от диаметра D_1 отверстия при разных стратегиях назначения режимов резания

Максимальную штучную наработку на отказ (по лимитирующей ступени) при обработке отверстий с $D_1 < 3$ мм обеспечивает КОИ с режимами принятыми по **методу 3.3**, при $D_1 > 3$ мм предпочтительнее назначать режимы **по методу 1** (рис. 7). Минимальную наработку КОИ обеспечивает расчет режимов по **методу 3.2**, немного лучше наработка получается по **методу 2**. При увеличении диаметра крепежного отверстия для большинства методов назначения режимов наработки уменьшаются сближаясь друг к другу. Почти постоянную наработку обеспечивают КОИ с режимами, назначенными по **методу 3.2 и 2**. С точки зрения относительной наработки (рис. 8) с учетом обеспечения максимальной выработки ресурса $N_{max}/N_{min} \rightarrow 1$ при $D_1 < 5$ мм лучше пользоваться **методом 3.2**, при $5 < D_1 < 10$ мм **методом 2**, а при $D_1 > 10$ мм **методом 3.1**. Худшее использование ресурса КОИ обеспечивают **методы 3.3 и 1**. **Методы 3.2 и 2** дают стабильно низкое отношение наработок на отказ во всем диапазоне диаметров обработки. При обработке отверстий с $D_1 = 5-18$ мм все стратегии назначения режимов обеспечивают достаточно узкий диапазон относительной наработки *от 2 до 1*, что является хорошим показателем выработки ресурса КОИ.

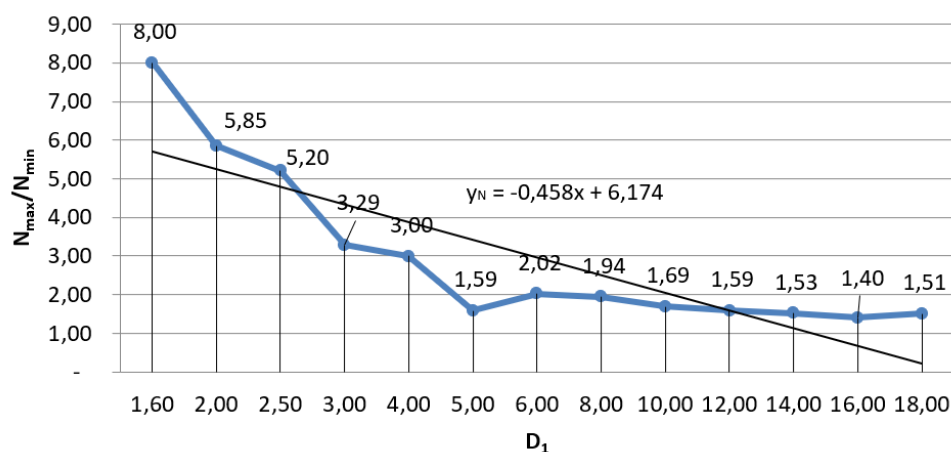


Рис. 6. График зависимости отношения количества обработанных отверстий ступенями КОИ N_{max}/N_{min} за время наработки на отказ от диаметра D_1 крепежного отверстия (линия тренда на

графике: $y_N = \frac{N_{max}}{N_{min}}$, $x = D_1$)

Рассматриваемые относительные штучные наработки на отказ варьируются, в значительно меньшем области значений, чем отношения временной стойкости ступеней. Однако диапазон значений относительной штучной наработки ступеней характеризуется 5,7 кратным уменьшением при 3,4 кратном уменьшении относительной временной стойкости, что связано не только с уменьшением отношения диаметров ступеней y_D , но и ростом отношения длин резания (длины расчетной не лимитирующей ступени) y_L .

Наиболее выгодными инструментами с точки зрения выработки максимального ресурса при назначении режимов резания по *методу 1* являются те в которых отношение N_{max}/N_{min} приближается к «единице». В нашем случае это обработка отверстия диаметром $D_1 = 16$ мм. При этом само отношение $N_{max}/N_{min} = 1,4$, что соответствует 40 % потери ресурса, не лимитирующей ступени КОИ.

При анализе всего размерного ряда крепежных отверстий с поднутрением, принятым ГОСТ 12876–67 установлено, что относительная штучная наработки на отказ разных ступеней КОИ N_{max}/N_{min} уменьшается, при увеличении длины отверстия заданного диаметра. Наименьшая относительная штучная наработки y_N обеспечивающая максимальный ресурс КОИ при расчете режимов резания по *методу 1* характерна для инструментов, обрабатывающих отверстия с наибольшим диаметром D_1 и длиной основной ступени L_1 . Анализ размеров КОИ показал, что лучшую выработку ресурса при использовании выбранной стратегии назначения режимов резания обеспечивают инструменты с отношением $y_L / y_D \geq 5$.

Отношение штучной наработки на отказ N_{max}/N_{min} получилось в разы меньше отношения T_1/T_2 . Временная стойкость 1-й ступени в десятки раз больше стойкости 2-й ступени, однако при анализе выработки количеством обработанных отверстий эта разница не такая существенная из-за большой роли длины обработки, приходящейся на расчетную не лимитирующую ступень резания КОИ. Данный факт необходимо учитывать при назначении регламента замены данного типа КОИ и оценки его ресурса.

Анализ общей (по лимитирующей ступени) и относительной штучной наработки на отказ, производительности обработки отверстий с поднутрением нормализованными и КОИ при различных стратегиях назначения режимов резания.

ющее массив расчетных значений с построением графиков связывающих конструктивные параметры с параметрами наработки на отказ ступеней инструмента и производительностью выполнения операции.

ПО апробировано на примере обработки ступенчатых отверстий под крепеж в широком диапазоне диаметров и длин резания в деталях из конструкционной стали с твердостью 160...240 НВ, как нормализованными (сверло, зенкер), так и КОИ типа сверло-зенкер из быстрорежущей стали. Результаты расчета в графической и аналитической интерпретации удобной для анализа приведены далее.

Анализ параметров наработки на отказ КОИ при обработке отверстий с поднутрением при выборе стратегии назначения режимов резания по ступени с большим диаметром (метод 1).

Расчет режимов резания для КОИ произведен по лимитирующей ступени, имеющей больший диаметр D_2 и определяющей размер поднутрения (рис. 2). Подача для всех случаев обработки принята одинаковая, имеющая допустимое значение для заданных условий резания. Стойкость лимитирующей ступени T_2 имеет нормативную величину в диапазоне 20–30 мин по которой рассчитана скорость резания 2-ой ступени и частота вращения всего КОИ.

На графике представленном на рис. 5 наблюдается уменьшение отношения стойкости ступеней КОИ T_1/T_2 , выраженной в минутах времени резания, с увеличением диаметра обрабатываемого отверстия до $D_1 = 5$ мм. Расчетная стойкость 1-ой ступени КОИ T_1 при принятом методе назначения режимов резания уменьшается, что связано с трендом на уменьшение отношения диаметров ступеней для заданной группы КОИ, обрабатывающих крепежные отверстия с поднутрением.

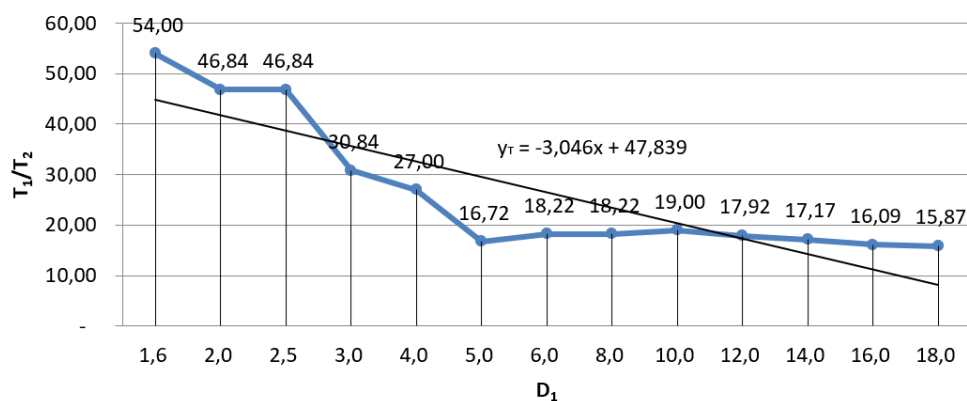


Рис. 5. График зависимости отношения временной стойкости ступеней КОИ T_1/T_2 от диаметра

$$D_1 \text{ крепежного отверстия (линия тренда на графике: } y_T = \frac{T_1}{T_2}, x = D_1)$$

В диапазоне диаметров обработки $D_1 = 6–18$ мм происходит стабилизация отношения T_1/T_2 в связи с пропорциональным ростом T_2 и T_1 из-за выравнивания отношения D_2/D_1 и L_1/L_2 . Так отношение T_1/T_2 варьируется в диапазоне от 54 до 15,87 в сторону увеличения диаметра обрабатываемого отверстия. Нарработка на отказ, выраженная длиной пути резания за период стойкости КОИ, имеет отношение L_{max}/L_{min} , равное отношению T_1/T_2 .

Кривая относительной штучной наработки на отказ N_{max}/N_{min} , выраженная отношением количества обработанных отверстий ступенями КОИ (рис. 6), имеет форму аналогичную кривой относительной стойкости T_1/T_2 . Линия тренда кривой N_{max}/N_{min} монотонно убывает в диапазоне от 8 до 1,4 при увеличении диаметра отверстия.

3. Частота вращения определяется через v_{cp} и больший диаметр 2-ой ступени инструмента D_2 :

$$n_3 = \frac{1000 \cdot v_{cp}}{\pi \cdot D_2}. \quad (5)$$

Расчет фактической скорости резания не лимитирующей ступени по **1-му** и **2-му методу**, а также фактической скорости резания обеих ступеней инструмента по **3-му методу** осуществляется по формуле (6), м/мин:

$$v_i \text{ факт.} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000}. \quad (6)$$

Для оценки наработки на отказ КОИ и его ступеней при расчетных значениях режимов резания предложено использовать следующие критерии: стойкость, выраженная в минутах времени резания, путь резания за период стойкости, выраженный в метрах обработанной поверхности и количество обработанных отверстий до смены или переточки КОИ.

Минутную стойкость не лимитирующих ступеней КОИ (**1 и 2 метод**) и стойкость обеих ступеней инструмента (**3 метод**) по полученным скоростям резания определяем по эмпирической степенной зависимости (7), мин:

$$T_i = \left(\frac{C_V \cdot D_i^q}{v_i \text{ факт.} \cdot t_i^x \cdot S^y} \cdot K_{Mv} \cdot K_{Пv} \cdot K_{Иv} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (7)$$

где D_i – диаметр ступени инструмента, мм; S – оборотная подача инструмента, мм/об; t_i – глубина резания ступени инструмента, мм; значения коэффициентов, определяющих условия обработки C_V , K_{Mv} , $K_{Пv}$, $K_{Иv}$ и показателей степени m , x , y , q , приводятся в соответствующих таблицах [11]. Для обработки отверстия сверлом в сплошном материале значение показателя степени $x = 0$.

Путь резания за период стойкости ступени инструмента, мм:

$$L_i = n \cdot S_o \cdot T_i = S_m \cdot T_i, \quad (8)$$

где $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}$ – частота вращения инструмента, мин⁻¹;

$S_m = n \cdot S_o$ – минутная подача, мм/мин.

Количество обработанных отверстий (деталей) до смены или переточки режущих элементов (пластин, вставок) ступени инструмента, шт:

$$N_i = \frac{L_i}{l_i}, \quad (9)$$

где l_i – длина резания i ступенью инструмента, мм.

Для автоматизации расчета режимов резания, наработки на отказ и производительности обработки крепежных отверстий по предложенным методикам и упрощения анализа параметров работоспособности КОИ разработано программное обеспечение (ПО) реализованное в офисном приложении MS Excel, в виде электронных таблиц и формиру-

(детали) n в течении всего цикла обработки ступенчатого отверстия, что связано с кинематическими ограничениями станка и невозможностью изменения режимов обработки из-за частично-одновременной обработки отверстий ступенями ряда КОИ. Полное независимое управление режимами допустимо только при обработке сквозных отверстий, применении конструкций КОИ обеспечивающих полный выход текущей ступени перед входом в обработку следующей и кинематической возможности станка переключать частоту вращения и (или) подачу при рабочем ходе инструмента. Эффект от применения данного подхода неочевиден, т. к. связан с увеличением длины резания и самого инструмента, а также с ростом сложности применяемого оборудования. При этом отсутствует гарантия, что удастся добиться оптимальных режимов из-за сопутствующих ограничений на жесткость, точность, износостойкость инструмента.

Таким образом, расчет режимов резания для КОИ предлагается проводить 3-мя методами с определением частоты вращения инструмента:

1. По принятой скорости резания ступени с большим диаметром.
2. По принятой скорости резания ступени с большей длиной резания.
3. По средней скорости резания ступеней и среднему, максимальному или минимальному диаметру КОИ.

Первоначально определяется скорость резания $v_{i \text{ лим.}}$ (м/мин) лимитирующей ступени (**1 и 2 метод**) или скорости резания обеих ступеней v_1 и v_2 (**3 метод**) по эмпирическим зависимостям [11] или табличным данным [12], соответствующим экономически обоснованной стойкости работы инструмента выраженной в минутах времени резания.

Частота вращения инструмента 1-м и 2-м методом определяется по формуле (1), мин^{-1} :

$$n = \frac{1000 \cdot v_{i \text{ лим.}}}{\pi \cdot D_{i \text{ лим.}}}, \quad (1)$$

где $D_{i \text{ лим.}}$ – диаметр лимитирующей ступени КОИ, мм;

i – номер лимитирующей ступени КОИ.

При определении частоты вращения инструмента **3-м методом** первоначально определяем значение средней скорости резания по формуле (2), м/мин:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (2)$$

Расчет частоты вращения инструмента n по **3-му методу** будет производиться **3-мя способами**.

1. Частота вращения инструмента определяется через среднюю скорость резания $v_{\text{ср}}$ и средний диаметр инструмента $D_{\text{ср}}$:

$$n_1 = \frac{1000 \cdot v_{\text{ср}}}{\pi \cdot D_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где $D_{\text{ср}} = \frac{D_1 + D_2}{2}$, мм.

2. Частота вращения определяется через $v_{\text{ср}}$ и меньший диаметр 1-ой ступени инструмента D_1 :

$$n_2 = \frac{1000 \cdot v_{\text{ср}}}{\pi \cdot D_1}. \quad (4)$$

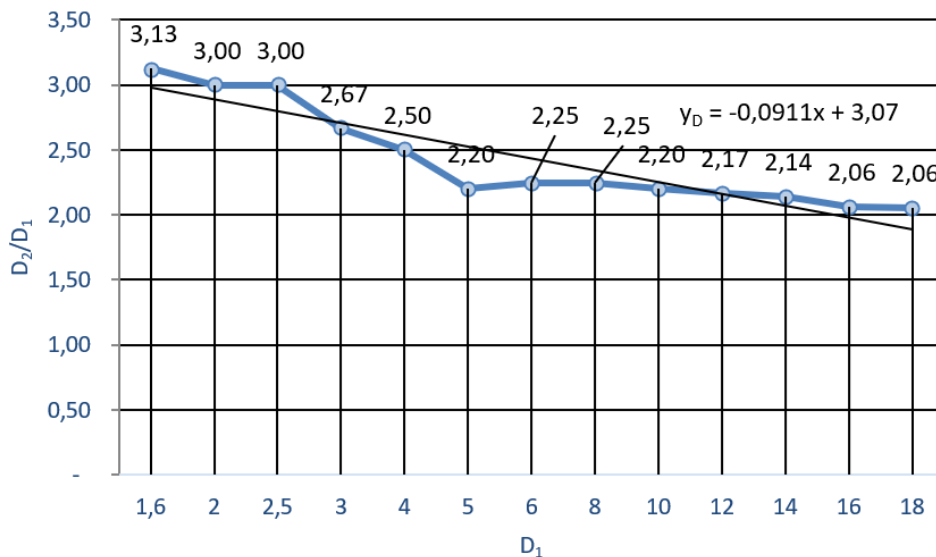


Рис. 3. Отношение диаметров ступеней КОИ от диаметра отверстия D_1 с поднутрением (линия тренда на графике: $y_D = \frac{D_2}{D_1}$, $x = D_1$)

Рост диаметра обрабатываемого отверстия сопровождается уменьшением отношения диаметров ступеней КОИ и увеличением отношения длин обработки ступенями инструмента. Интенсивность увеличения отношения длин обработки примерно в 3 раза выше интенсивности уменьшения отношения диаметров ступеней КОИ, что должно стать основным фактором при назначении режимов обработки, обеспечивающих максимальный ресурс при заданной производительности.

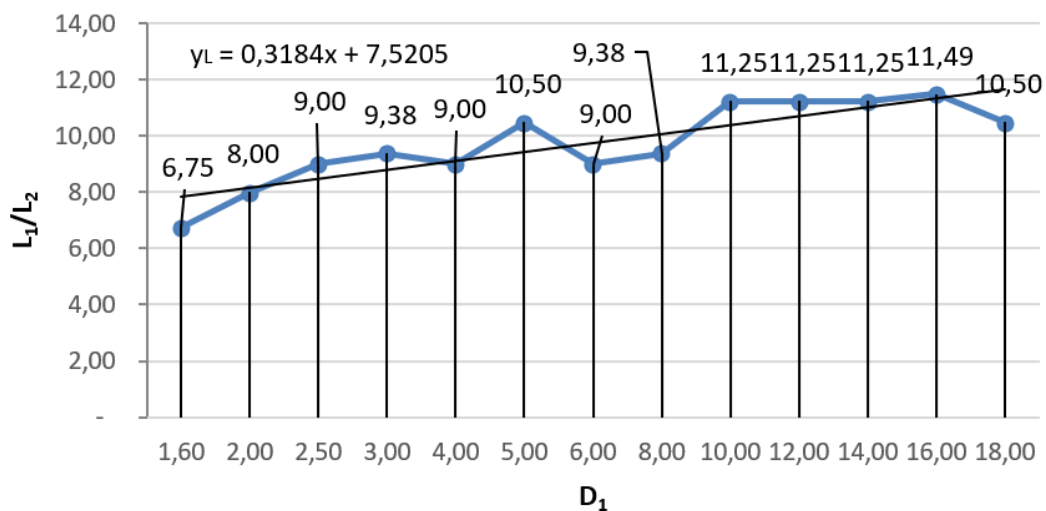


Рис. 4. Отношение длин обработки ступенями КОИ от диаметра отверстия D_1 с поднутрением (линия тренда на графике: $y_L = \frac{L_1}{L_2}$, $x = D_1$)

Методики расчета режимов резания и параметров наработки на отказ КОИ. Одной из особенностей обработки большинства крепежных отверстий является неизменность режимов резания таких как подача на оборот S_0 и частота вращения инструмента

чем у нормализованных инструментов, что требует более тщательно относиться к надежности и регламентации смены режущей части при наработке на отказ.

Как показал анализ факторов и условий оптимизации операции механической обработки отверстий КОИ существует ряд эксплуатационных проблем, связанных с выбором критерия наработки на отказ и расчетом оптимальных режимов резания, обеспечивающих максимальный ресурс и производительность инструмента [3; 4; 6; 7].

Ресурс комбинированного инструмента, выраженный в минутах резания (непрерывной работы) лимитирующей ступени при наработке на отказ часто не соответствует возможной выработке остальных ступеней, выраженной допустимым количеством обработанных отверстий из-за разности пути резания и площади сечения среза разных ступеней инструмента. Стратегия выбора лимитирующей ступени и основанная на ней модель параметрической оптимизации режимов резания при обработке отверстий КОИ существенно влияет на производительность обработки.

Произведем анализ работоспособности КОИ при обработке крепежных отверстий с целью определения влияния конструктивных параметров КОИ и условий их эксплуатации на выбор наилучшей стратегии и модели параметрической оптимизации режимов резания при механической обработке крепежных отверстий, основанной на обеспечении заданного ресурса инструмента и производительности обработки.

Анализ размеров стандартных крепежных отверстий и их связь с параметрами КОИ. Рассмотрим и проанализируем конструктивные параметры типовых крепежных отверстий с поднутрением перпендикулярным оси по ГОСТ 12876–67 «Поверхности опорные под крепежные детали» и ГОСТ 11284-75 «Отверстия сквозные под крепежные детали» (рис. 2). Данные отверстия могут применяться для установки крепежа в соответствии с ГОСТ 50796-95 «Болты с шестигранной головкой классов точности А и В», ГОСТ 11738-84 «Винт с внутренним шестигранником и цилиндрической головкой» и т. д.

Для каждого типа отверстий предложен размерный ряд, состоящий из 13 типоразмеров, определяемых диаметром основной (меньшей) ступени, которым поставлен в соответствие КОИ сверло-зенкер (сверло – цековка).

На графике представленном на рис. 3 наблюдается уменьшение отношения диаметров ступеней КОИ D_2/D_1 , зенкером и сверлом, соответственно, с увеличением диаметра D_1 основной ступени обрабатываемого крепежного отверстия с поднутрением по ГОСТ 12876–67 коэффициент u_D отношения диаметра зенкера к диаметру сверла варьируется в диапазоне от 3,13 до 2,06.

На графике представленном на рис. 4 наблюдается увеличение отношения длин обработки ступенями КОИ L_1/L_2 , сверлом и зенкером соответственно, с увеличением диаметра D_1 основной ступени обрабатываемого крепежного отверстия. График носит немонотонный характер, т. к. рассматривается с точки зрения усредненного значения длины обработки L_1 (глубины основного отверстия). Коэффициент отношения длин u_L варьируется в диапазоне от 6,75 до 11,49.

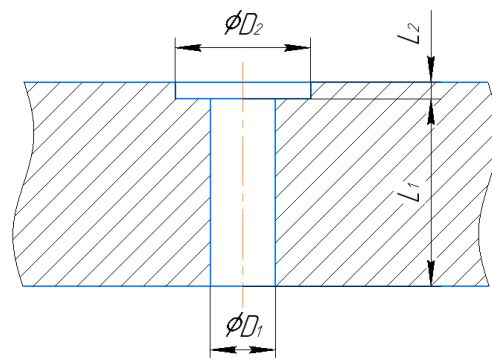


Рис. 2. Типовая схема крепежного отверстия с поднутрением

Большинство из них имеет типовую форму и стандартизированный размерный ряд. При обработке нормализованных отверстий под крепеж КОИ традиционно применяются чаще. Это связано с достаточной простотой конструкции применяемого КОИ: число ступеней не более 3-х, однотипного или близкого по функционалу исполнения, невысокой точности, с некритичным вылетом и перепадом диаметров ступеней. Такие инструменты достаточно успешно реализуются на базе нормализованных инструментов путем переточки рабочей части или сборных модулей с использованием унифицированных вставок, блоков, СМП.

Для совмещения операций или переходов при обработке ступенчатых, резьбовых и гладких крепежных отверстий применяются всевозможные комбинированные инструменты наиболее распространенными из которых являются ступенчатые сверла и ступенчатые зенкеры, сверла-зенкеры, сверла-зенкеры-развертки, сверла-зенкеры-зенковки. Сюда же можно отнести сверла-метчики [9].

Типы стандартных отверстий (рис. 1), которые могут применяться для крепежа деталей машин и технологические приемы их обработки исследованы в работе [10].

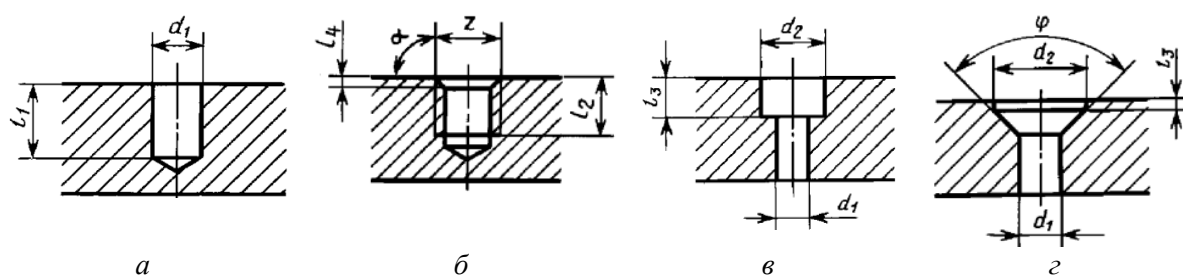


Рис. 1. Типы стандартизованных крепежных отверстий:

a – глухое (сквозное) гладкое отверстие; *б* – глухое (сквозное) отверстие с конической фаской или фаской под резьбу; *в* – ступенчатое сквозное отверстие с поднутрением перпендикулярным оси; *г* – сквозное отверстие с комбинированной фаской

Для данных типов крепежных отверстий допускается использовать комбинированный режущий инструмент особенно в случае большого количества типовых отверстий, приходящихся на одну деталь.

КОИ по сравнению с обычными инструментами получают, как правило, следующие преимущества [2]:

1. Сокращается основное технологическое и вспомогательное время (подвод и отвод инструмента, его смена и наладка) и соответственно повышается технологическая и цикловая производительность.

2. Уменьшается количество оборудования, сокращаются расход электроэнергии, производственные площади, количество основных и вспомогательных рабочих, повышается надежность оборудования, а значит, снижается и себестоимость продукции.

3. Повышается соосность и точность расположения отдельных ступеней обрабатываемых отверстий.

Однако, на практике при использовании КОИ можно столкнуться с проблемой неполной выработки ресурса инструмента из-за неравномерного износа, разброса нагрузок, приводящих к разрушению режущих кромок, вставок и пластин инструмента находящихся на разных его ступенях и имеющих различный диаметральный и осевой вылет. Различная скорость резания на различных участках инструмента требует более тщательного контроля и регулировки процессов работы для равномерного износа пластин, что существенно влияет на повышение эффективности при обработке отверстий с использованием КОИ. Стоимость таких инструментов, как и стоимость их эксплуатации выше,

ботки отверстия влияют на конструкцию КОИ, его габаритные размеры, способ и трудозатраты на восстановление работоспособности после отказа, путь резания и ограничения при назначении режимов резания. Минимизация затрат на операцию при выбранном методе, схеме и конструкции КОИ за счет оптимального сочетания параметров режима резания характеризуется дополнительными кинематическими и ресурсными ограничениями. Для каждой стратегии оптимизации необходима своя математическая модель, учитывающая большое количество факторов и ограничений, с дальнейшим сравнением результатов для принятия взвешенного решения. Такой подход даже при наличии средств автоматизации расчета оптимизационных функций сопряжен с большим объемом работ по технологической подготовке производства.

Более эффективным является принцип разработки типовых рекомендаций при выборе стратегии параметрической оптимизации основанный на обеспечении частных критериев: максимального ресурса (минимальной относительной наработки на отказ ступеней и максимальной наработки всего КОИ) и максимальной производительности (минимального операционного и штучного времени) в условиях привязки скорости резания инструмента к параметрам конструкции, выраженной отношением диаметров и длин ступеней КОИ. Выявление корреляционной связи между параметрами конструкции КОИ и факторами, лимитирующими назначение параметров режима резания для наиболее распространенных ступенчатых (крепежных) отверстий позволит упростить выбор стратегии оптимизации конструкции и параметров эксплуатации КОИ, а также провести экспресс-оценку результатов исходя из приоритетов производства (программы выпуска деталей, применяемого оборудования, степени автоматизации).

Цель работы. Повышение конкурентоспособности и эффективности использования современных комбинированных инструментов автоматизированного производства путем разработки технически обоснованных конструкторско-технологических методов повышения работоспособности.

Задачи исследований.

1. Провести анализ форм и видов отверстий, наиболее подходящих для комбинированной механической обработки на современном автоматизированном оборудовании с цифровым управлением.

2. Описать стратегии, методы и критерии оптимизации параметров процесса обработки отверстий КОИ.

3. Оценить возможность и эффективность использования в качестве ресурсных критериев работы КОИ показателей временной стойкости, штучной наработки на отказ, относительной наработки на отказ, выраженной относительной временной и штучной наработкой отдельных ступеней инструмента.

4. Проанализировать принятые стратегии и построенные на их основе модели оптимизации с точки зрения функциональной взаимосвязи с конструктивными параметрами КОИ для обработки крепежных отверстий и предлагаемыми схемами резания (параллельными, последовательными, параллельно-последовательными).

5. Оценить область эффективного использования принятых стратегий назначения режимов резания, схем резания и конструкций при использовании как КОИ, так и нормализованных инструментов при обработке стандартных крепежных отверстий на основе критериев обеспечения максимального ресурса (относительной и общей наработки на отказ) инструмента и производительности обработки.

6. Разработать рекомендации по конструированию и эксплуатации готовых КОИ для обработки крепежных отверстий на основе приведенных исследований.

Типы крепежных отверстий и технологические приемы их обработки стандартными (нормализованными) и КОИ. Значительная часть отверстий подвергаемых механической обработке в деталях механизмов и машин – это отверстия под крепеж.