

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 621.787:621.979.07 (043.3)

РАБЫКО
Марина Александровна

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕФОРМИРУЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ
С ПРИКАТОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2023

Научная работа выполнена в межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет».

Научный
руководитель

ШЕМЕНКОВ Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет»

Официальные
оппоненты:

ДЕВОЙНО Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета;

ПИЛИПЦОВ Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского сектора Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 19 января 2024 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря: (+375 17) 331 30 58; e-mail: scvdmmed@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 18 декабря 2023 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор



О. Г. Девойно

© Рабыко М. А., 2023

© Белорусский национальный
технический университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Деформирующие элементы штампов предназначены для формообразования заготовок из различных материалов методами обработки металлов давлением в холодном или горячем состоянии. Следует отметить, что в машиностроении более 60 % заготовок получают с использованием деформирующих элементов штампов. Износостойкость основных деформирующих элементов штампов (пуансонов, матриц, бандажей и др.) напрямую определяет затраты на производство изделий в машиностроении.

Повышение эксплуатационных характеристик деформирующих элементов штампов, в первую очередь пуансонов и матриц, обеспечивает рост производительности труда, экономию дорогостоящих и дефицитных штамповых сталей, энергетических и трудовых ресурсов, определяющих себестоимость выпускаемой продукции. Повышение долговечности указанных деформирующих элементов штампов может быть обеспечено различными технологическими методами улучшения качественных характеристик инструментальных сталей. Так, в настоящее время широкое применение получили методы поверхностного упрочнения, такие как термическая, термомеханическая и химико-термическая обработки, а также методы физико-химического, электрохимического упрочнения. Однако традиционные методы, наряду с преимуществами, имеют существенные недостатки, заключающиеся в необходимости использования сложного, дорогостоящего оборудования, специальных приспособлений для давления, нагрева и охлаждения. Во многих случаях происходит окисление и обезуглероживание металла, образование окалины и трещин, увеличивается хрупкость изделий, отсутствует возможность использования таких методов при упрочнении крупногабаритных изделий или изделий сложной формы, либо это использование достаточно затруднительно.

На сегодняшний день перспективным для улучшения качественных характеристик деформирующих элементов штампов представляется метод упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем. Для реализации процесса изделие размещается на катоде, расположенном в силовых линиях постоянного магнитного поля, и поверхности изделия обрабатываются плазмой тлеющего разряда, возбужденного в среде остаточных атмосферных газов.

Как показали исследования, упрочнение пуансонов и матриц, изготовленных из штамповых сталей, в тлеющем разряде с прикатодным магнитным полем приведет к получению в их поверхностном слое новых структурных состояний, оказывающих положительное влияние на свойства материала, и повышению износостойкости поверхности на 30–40 % по сравнению с упрочнением одним тлеющим разрядом.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнена на кафедрах «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет» и соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: машиностроение и машиноведение», утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156.

Результаты, составляющие содержание диссертационной работы, получены в рамках выполнения заданий государственных программ научных исследований по темам «Установление влияния комплексного воздействия тлеющего разряда и постоянного магнитного поля на структурно-фазовые превращения, физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностного слоя инструментальных сталей» (по заданию 4.2.01 «Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств штамповых сталей, подвергнутых комплексной обработке, основанной на тлеющем разряде» № ГР 20141990, 2014–2015 гг.); «Улучшение характеристик передаточных механизмов, деталей машин, режущего инструмента на основе прогрессивных схем контактного взаимодействия, современных методов обработки поверхностного слоя при воздействии магнитного поля» (рег. № НИОКТР 20161937, 2016–2018 гг.); «Разработка моделей и методологии построения и управления технологическими системами» (рег. № НИОК(Т)Р 20210707, 2021–2025 гг.), а также при выполнении хоздоговорной работы с ОАО «ТАиМ» (г. Бобруйск) по теме «Структурно-фазовое модифицирование поверхностных слоев материалов инструментальной и технологической оснастки тлеющим разрядом» (ХД № 1931/488/19).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы является разработка технологии упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, обеспечивающая повышение твердости и износостойкости их рабочих поверхностей.

Для достижения цели потребовалось решение следующих **задач**:

1. Разработать метод упрочнения поверхностей деформирующих элементов штампов из инструментальных легированных (штамповых) сталей, основанный на обработке тлеющим разрядом с дополнительным введением магнитного поля в прикатодное пространство.

2. Определить влияние технологических параметров упрочнения тлеющим разрядом как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него на структуру и фазовый состав поверхностного слоя упрочняемых деформирующих элементов штампов из инструментальных легированных сталей.

3. Исследовать влияние технологических параметров упрочнения тлеющим разрядом как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него на глубину упрочненного слоя, поверхностную микротвердость и износостойкость рабочих поверхностей деформирующих элементов штампов из инструментальных легированных сталей.

4. На базе проведенных исследований разработать и внедрить в образовательный процесс и производство технологический процесс упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем.

Объект исследования – технологический процесс упрочняющей обработки поверхностей деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем.

Предмет исследования – структура и фазовый состав поверхностного слоя упрочняемых изделий из инструментальных легированных сталей, микротвердость и износостойкость рабочих поверхностей деформирующих элементов штампов.

Научная новизна

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден технологический процесс упрочнения деформирующих элементов штампов из инструментальных легированных (штамповых) сталей, при котором изделия размещают на катоде, расположенном в силовых линиях постоянного магнитного поля, и обрабатывают поверхности изделий плазмой тлеющего разряда, возбужденного в вакууме, с разрежением 1,33–53,2 Па при напряжении 0,1–10 кВ, плотности тока между анодом и катодом 0,005–0,010 мА/см², расстояния между анодом и катодом 0,1–1,0 м, в течение 10–30 мин, при этом используют катод площадью в 5–150 раз больше площади анода.

2. В результате экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса упрочнения на твердость поверхностей установлено, что упрочнение тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем с индукцией от 0,04 до 0,06 Тл позволяет повысить поверхностную микротвердость образцов из стали 5Х3В3МФС на 25–30 %, образцов из стали Х12МФ на 17–20 % и образцов из стали 4Х4ВМФС на 17–19 %, что превышает значения, полученные обработкой только тлеющим разрядом, для стали 5Х3В3МФС в 1,78 раза, стали Х12МФ в 1,28 раза и стали 4Х4ВМФС в 1,05 раза, соответственно.

3. В результате экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса упрочнения установлено, что упрочнение тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем с индукцией от 0,04 до 0,06 Тл позволяет повысить износостойкость образцов из стали 5Х3В3МФС в 2 раза, образцов из стали Х12МФ в 2,1 раза и образцов из стали 4Х4ВМФС в 2,3 раза, что превышает значения, полученные обработкой только тлеющим разрядом, для стали 5Х3В3МФС в 1,42 раза, стали Х12МФ в 1,31 раза и стали 4Х4ВМФС в 1,35 раза соответственно.

4. Экспериментально выявлено, что изменение поверхностной микротвердости и износостойкости деталей из штамповых сталей при обработке в тлеющем разряде с прикатодным магнитным полем с индукцией магнитного поля 0,04–0,06 Тл обусловлено структурными превращениями, протекающими в их поверхностном слое, заключающимися в количественном изменении содержания остаточного аустенита (за счет протекания фазового превращения $\gamma\text{-Fe} \leftrightarrow \alpha\text{-Fe}$), измельчении карбидных включений и равномерном их распределении в поверхностном слое образцов из стали 5Х3В3МФС глубиной до 100 мкм, образцов из стали Х12МФ глубиной до 80 мкм и образцов из стали 4Х4ВМФС глубиной до 85 мкм, что превышает значения, полученные обработкой только тлеющим разрядом, для стали 5Х3В3МФС на 30–35 %, образцов из стали Х12МФ на 55–60 % и образцов из стали 4Х4ВМФС на 65–70 % соответственно.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований влияния магнитного поля на характеристики тлеющего разряда, температуру разогрева и поверхностную микротвердость упрочняемых изделий и конструкторско-технологической реализации источника формирования прикатодного магнитного поля, которые позволили выявить оптимальное значение индукции магнитного поля, обеспечивающее получение большего значения силы тока при неизменном напряжении тлеющего разряда.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров упрочнения тлеющим разрядом как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него (напряжение, сила тока, время обработки) на поверхност-

ную микротвердость и износостойкость изделий из инструментальных легированных сталей (X12MФ, 4X4ВМФС, 5X3В3МФС), позволившие установить зависимости приращения поверхностной микротвердости и износостойкости и параметры, обеспечивающие получение максимальных значений приращения микротвердости и износостойкости образцов, выявить, что значения микротвердости и износостойкости, полученные с использованием прикатодного магнитного поля, выше, чем полученные без него.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров упрочнения тлеющим разрядом как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него (напряжение, сила тока, время обработки) на структуру, фазовый состав инструментальных легированных сталей (X12MФ, 4X4ВМФС, 5X3В3МФС), позволившие установить структурно-фазовое состояние, протекание полиморфного превращения в матричной фазе, изменение размеров карбидной фазы и глубину упрочненного слоя при различных режимах упрочнения.

4. Результаты экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик упрочненных деформирующих элементов штампов и их промышленной апробации, позволившие разработать технологический процесс упрочнения, характеризующийся использованием прикатодного магнитного поля как источника интенсификации процесса.

Личный вклад соискателя ученой степени

Автором получены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в диссертационной работе, совместно с соавторами написаны монографии, научные статьи и тезисы докладов.

Основные положения, выносимые на защиту, цель и задачи исследований сформулированы автором совместно с научным руководителем кандидатом технических наук В. М. Шеменковым. Научным руководителем оказывалась научно-консультационная и практическая помощь на всех этапах выполнения диссертационной работы. Соавторам научных публикаций В. М. Шеменкову, А. Н. Юмановой (Елисеевой) принадлежат результаты, не вошедшие в положения, выносимые на защиту, и в заключительные выводы. Соискатель является руководителем студенческой научной работы В. В. Шеменкова.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Представленные в диссертационной работе результаты доложены и обсуждены на 23 научных мероприятиях: Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2009, 2012–2014, 2022 гг.); Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилев, 2012, 2014–2016, 2018 гг.); IV Международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (г. Брянск, 2012 г.); XIV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Гомель, 2014 г.); X Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование» (г. Астана, 2015 г.); Юбилейной международной конференции «Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития» (г. Могилев, 2016 г.); VI Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (г. Барнаул, 2017 г.); XIII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск,

2020 г.); Китайско-Белорусском молодежном конкурсе научно-исследовательских и инновационных проектов (г. Минск, 2020 г.); Открытом молодежном конкурсе стартапов Белорусско-Российского университета (г. Могилев, 2021 г.); XIV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2021 г.); XIII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2022)» (г. Барнаул, 2022 г.); Форуме «Беларусь – Китай: мост для инноваций» на конкурсе инновационных стартап-проектов «Инновационная Инициатива» (г. Минск, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой (г. Новополоцк, 2023 г.).

Технология упрочнения рабочих поверхностей структурно-фазовым модифицированием материалов тлеющим разрядом в магнитном поле получила признание на XXII Международной выставке-конгрессе НИ-ТЕСН'2016 на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в номинации «Лучший инновационный проект (разработка) в области наносистем, наноустройств, наноматериалов, нанотехнологий, наноэлектроники, нанофотоники, спинтроники, бионики, нанокomпьютеров, нанолекарств», удостоена диплома 1 степени с вручением золотой медали (г. Санкт-Петербург, 2016 г.).

Результаты исследований внедрены в производство научно-технологического парка Белорусско-Российского университета (г. Могилев), в образовательный процесс Белорусско-Российского университета на кафедре «Технология машиностроения» при изучении дисциплин «Эффективные методы повышения эксплуатационных характеристик деталей машин», на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» при изучении дисциплин «Технология механической и физико-технической обработки», при подготовке инженеров по специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», используются в дипломном проектировании студентов по специальностям 1-36 80 02 «Инновационные технологии в машиностроении», 1-36 01 01 «Технология машиностроения» и 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Опубликование результатов диссертаций

По материалам диссертации опубликовано 36 работ, в том числе 2 монографии в соавторстве, 6 статей в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК (1,47 авторского листа), 11 статей в сборниках материалов научных конференций, 15 тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 11,48 авторского листа. Получен 1 патент на полезную модель и 1 патент на изобретение Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, включающей пять глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 238 страниц. Работа содержит 80 страниц основного текста, 104 рисунка, 31 таблицу, 21 приложение, библиографический список из 317 использованных источников, список публикаций соискателя из 36 научных работ, 1 патент на полезную модель и 1 патент на изобретение Республики Беларусь.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проведен анализ основных инструментальных сталей для производства деформирующих элементов штампов. Выполнен анализ условий работы и причин выхода из строя деформирующих элементов штампов. Проведен аналитический обзор технической литературы, научных статей и патентной документации, который позволил выделить основные высокоэнергетические методы повышения эксплуатационных характеристик деформирующих элементов штампов (термическая обработка; методы нанесения покрытий; методы, модифицирующие поверхность). По каждому методу упрочнения сделан вывод о положительных сторонах его применения и недостатках, ограничивающих область использования для повышения эксплуатационных характеристик деформирующих элементов штампов.

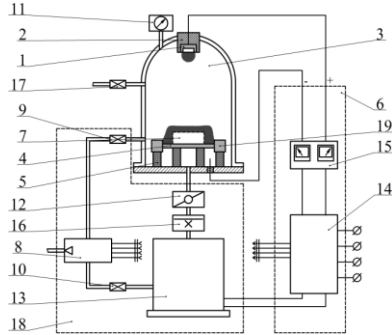
Во второй главе на основании востребованности штамповых сталей (по данным Белорусской универсальной товарной биржи) для исследований были выбраны штамповые стали 5Х3В3МФС, Х12МФ, 4Х4ВМФС по ГОСТ 5950–2000.

Предложен метод упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем. В отличие от методов, разработанных ранее, он характеризуется тем, что изделия размещают на катоде, расположенном в силовых линиях магнитного поля, и обрабатывают поверхности изделий плазмой тлеющего разряда, возбужденного в среде остаточных атмосферных газов. Схема установки, реализующей метод, представлена на рисунке 1.

Преимущество метода заключается в том, что упрочнение осуществляется при более низких температурах, не вызывающих термических превращений, более высоким электрическом потенциале и за более короткое время.

В качестве источника формирования прикатодного магнитного поля с необходимой магнитной индукцией выступает катушка индуктивности.

На основании ряда ограничений и расчетов спроектирована классическая кольцевая катушка индуктивности с многослойной обмоткой (рисунок 2), проводом в защитной оплетке сечением $0,75 \text{ мм}^2$, пропитанный электроизолирующим лаком, количество витков в одном слое – 16 шт., число слоев обмотки – 72 шт.



- 1 – анод; 2 – диэлектрический стакан;
 - 3 – вакуумная камера; 4 – катод (стол);
 - 5 – диэлектрическое основание;
 - 6 – блок питания; 7 – изделие;
 - 8 – форвакуумный насос;
 - 9, 10, 17 – клапан; 11 – вакуумметр;
 - 12 – заслонка; 13 – диффузионный насос;
 - 14 – преобразователь высокого напряжения;
 - 15 – блок измерения; 16 – ловушка;
 - 18 – откачной пост; 19 – магнит
- Рисунок 1 – Схема установки для осуществления упрочнения

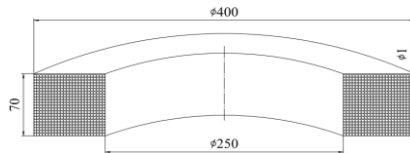


Рисунок 2 – Кольцевая катушка индуктивности

Исследование осуществлялось в тлеющем разряде при различных значениях прикатодного магнитного поля с магнитной индукцией от 20 до 80 мТл, измерения магнитной индукции проводились по стандартной методике универсальным миллитесламетром МТУ-1.

Для контроля межвитковой температуры использовалась классическая термопара, на основании показаний которой получены зависимости разогрева катушки от времени ее работы и от подаваемого на нее напряжения (рисунок 3).

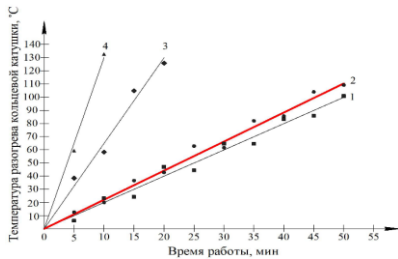
Основным критерием при выборе режимов работы катушки являлся ее разогрев до температуры не более чем 130 °С для исключения межвиткового короткого замыкания вследствие расплавления электроизолирующего витки лака.

На основании экспериментов по изучению распределения магнитной индукции по площади катода, зависимости разогрева катушки индуктивности от времени ее работы и зависимости микротвердости образцов от напряжения, подаваемого на катушку (рисунок 4), определены оптимальные значения напряжения и силы тока, подаваемого на катушку.

В результате исследований, приведенных во второй главе, выбраны оптимальные значения (давление в камере – 2–3 Па, напряжение, подаваемое на катушку индуктивности, $U = 100$ В, сила тока $I = 10$ А), которые формируют индукцию магнитного поля от 40 до 60 мТл по площади катода.

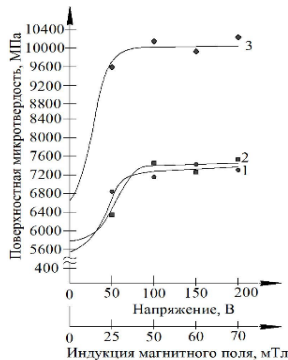
В третьей главе на основании статистической обработки экспериментальных данных получена зависимость приращения поверхностной микротвердости по Виккерсу H'_{HV} образцов из сталей в натуральном выражении, адекватно представляющая эксперимент: формула (1).

$$H'_{HV} = b_0 + b_1 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) + b_2 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) + b_3 \left(\frac{T-30}{10} \right) + b_{12} \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) + b_{13} \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) + b_{23} \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) + b_{11} \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right)^2 + b_{22} \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right)^2 + b_{33} \left(\frac{T-30}{10} \right)^2. \quad (1)$$



$1 - B = 30-45$ мТл ($U = 50$ В); $2 - B = 40-60$ мТл ($U = 100$ В); $3 - B = 50-80$ мТл ($U = 150$ В); $4 - B = 70-90$ мТл ($U = 200$ В)

Рисунок 3 – График зависимости разогрева кольцевой катушки индуктивности от времени ее работы



$1 -$ сталь 5Х3ВЗМФС; $2 -$ сталь 4Х4ВМФС; $3 -$ сталь Х12МФ

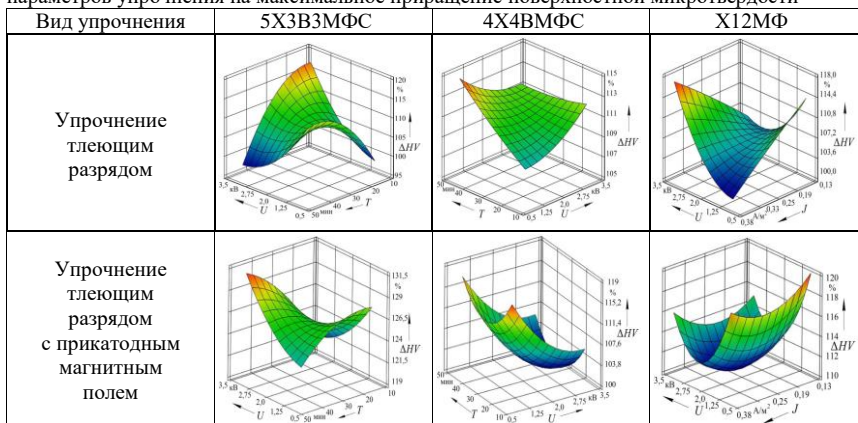
Рисунок 4 – График зависимости микротвердости образцов от напряжения, подаваемого на кольцевую катушку индуктивности

Теоретические коэффициенты регрессии при упрочнении тлеющим разрядом (ТР) и тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем (ТР + МП) для образцов из каждой исследуемой стали приведены в таблице 1, примеры графической интерпретации – в таблице 2.

Таблица 1 – Теоретические коэффициенты регрессии (1)

| Марка стали (режим упрочнения) | b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_{12} | b_{13} | b_{23} | b_{11} | b_{22} | b_{33} |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5Х3ВЗМФС (ТР) | 108,7 | 0,5 | 0,6 | -0,7 | -0,1 | -3,0 | -0,5 | 1,3 | -1,2 | -1,9 |
| 5Х3ВЗМФС (ТР + МП) | 125,9 | 0,2 | -1,3 | 0,8 | 0,3 | 1,2 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | -0,5 |
| 4Х4ВМФС(ТР) | 110,6 | 0,1 | 0,3 | 0,8 | -0,4 | -0,6 | 0,3 | 0,3 | 0 | 0,1 |
| 4Х4ВМФС (ТР + МП) | 103,3 | -3,3 | -0,2 | -0,2 | 0 | 0,1 | 0 | 1,1 | 1,2 | 2,0 |
| X12МФ (ТР) | 106,2 | 1,2 | 0 | 0 | 2,1 | 1,7 | 0,6 | 1,3 | -0,1 | -0,1 |
| X12МФ (ТР + МП) | 110,6 | -1,1 | 0 | -0,4 | 0,2 | -0,1 | 0,2 | 1,7 | 0,7 | 0,6 |

Таблица 2 – Примеры графической интерпретации, показывающие влияние технологических параметров упрочнения на максимальное приращение поверхностной микротвердости



Максимальное приращение микротвердости образцов достигается упрочнением с оптимальными режимами, приведенными в таблице 3. Основным критерием при выборе оптимальных режимов являлось обеспечение наименьшей удельной мощности горения разряда W , кВт/м².

Таблица 3 – Оптимальные режимы упрочнения образцов из стали

| Сталь | Режим упрочнения | Оптимальное значение технологических параметров упрочнения | | | | | Приращение твердости ΔHV , % |
|----------|------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------------------|
| | | U , кВ | J , А/м ² | T , мин | W , кВт/м ² | B , Тл | |
| 5Х3ВЗМФС | ТР | 3,0–3,2 | 0,375 | 35 | 0,8 | – | 117,3 |
| | ТР + МП | 2,5–2,7 | 0,190 | 25 | 0,6 | 0,04–0,06 | 130,8 |
| X12МФ | ТР | 3,0–3,2 | 0,375 | 30 | 1,2 | – | 117,7 |
| | ТР + МП | 1,0–1,25 | 0,170 | 20 | 0,8 | 0,04–0,06 | 120,9 |
| 4Х4ВМФС | ТР | 0,8–1,25 | 0,375 | 45 | 0,3 | – | 114,6 |
| | ТР + МП | 0,8–1,2 | 0,130 | 18 | 0,2 | 0,04–0,06 | 119,2 |

Статистическая обработка экспериментальных данных по изучению приращения коэффициента износостойкости позволила получить теоретические коэффициенты регрессии (1) для рассматриваемых сталей, которые приведены в таблице 4, примеры графической интерпретации представлены в таблице 5.

Таблица 4 – Теоретические коэффициенты регрессии (1)

| Сталь | b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_{12} | b_{13} | b_{23} | b_{11} | b_{22} | b_{33} |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5Х3В3МФС (ТР) | 1,256 | 0,015 | 0,032 | -0,1 | 0,093 | 0,118 | 0,028 | -0,088 | -0,040 | -0,083 |
| 5Х3В3МФС (ТР + МП) | 1,413 | 0,117 | -0,07 | -0,146 | 0,044 | 0,088 | 0,181 | 0,038 | -0,064 | 0,008 |
| 4Х4ВМФС(ТР) | 1,243 | -0,034 | 0,006 | -0,077 | 0,061 | 0,076 | 0,030 | 0,021 | 0,029 | 0,016 |
| 4Х4ВМФС (ТР + МП) | 1,958 | -0,047 | -0,040 | 0,091 | 0,006 | -0,014 | -0,03 | -0,037 | -0,004 | 0,056 |
| X12МФ (ТР) | 1,103 | 0,095 | -0,065 | 0,077 | 0,169 | 0,057 | 0,032 | 0,074 | -0,061 | -0,064 |
| X12МФ (ТР + МП) | 1,722 | 0,022 | -0,028 | -0,002 | 0,061 | 0,023 | 0,017 | 0,020 | 0,020 | 0,051 |

Таблица 5 – Примеры графической интерпретации, показывающие влияние технологических параметров упрочнения на максимальное приращение коэффициента износостойкости

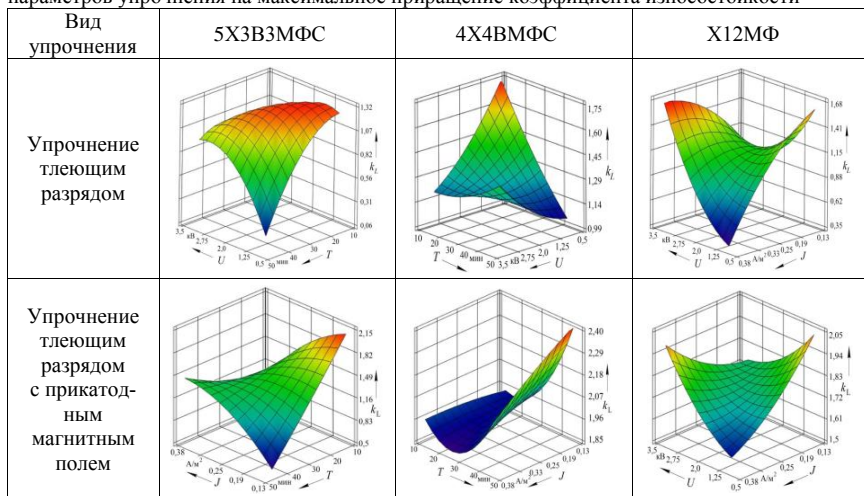


Таблица 6 – Оптимальные режимы упрочнения образцов из стали

| Сталь | Режим упрочнения | Оптимальное значение технологических параметров упрочнения | | | | | Приращение коэффициента износостойкости k_L |
|----------|------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|--------------------------|-----------|-----------------------------------------------|
| | | U , кВ | J , А/м ² | T , мин | W , кВт/м ² | B , Тл | |
| 5Х3В3МФС | ТР | 1,8–2,0 | 0,250 | 25 | 0,25 | – | 1,4 |
| | ТР + МП | 1,1–1,25 | 0,190 | 15 | 0,2 | 0,04–0,06 | 2,0 |
| X12МФ | ТР | 3,0–3,2 | 0,375 | 30 | 1,2 | – | 1,6 |
| | ТР + МП | 1,3–1,5 | 0,250 | 20 | 0,8 | 0,04–0,06 | 2,1 |
| 4Х4ВМФС | ТР | 0,8–1,25 | 0,250 | 20 | 0,2 | – | 1,7 |
| | ТР + МП | 0,5–0,8 | 0,175 | 13 | 0,14 | 0,04–0,06 | 2,3 |

Максимальный рост коэффициента износостойкости образцов достигается упрочнением с оптимальными режимами, приведенными в таблице 6. Основным критерием при выборе оптимальных режимов являлось обеспечение наименьшей удельной мощности горения разряда W , кВт/м².

В таблице 7 приведен сравнительный анализ максимальных значений износостойкости образцов, подвергнутых обработке как тлеющим разрядом, так и тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем.

Таблица 7 – Максимальные значения износостойкости при различных методах упрочнения изделий

| Сталь | Износостойкость образцов после упрочнения тлеющим разрядом | Износостойкость образцов после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем | Приращение коэффициента износостойкости k_L , % |
|----------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 5Х3В3МФС | 1,339 | 1,940 | 40–42 |
| Х12МФ | 1,586 | 2,248 | 40–42 |
| 4Х4ВМФС | 1,715 | 2,215 | 29–31 |

Применение прикатодного магнитного поля при упрочнении изделий тлеющим разрядом приводит к дополнительному росту коэффициента износостойкости.

В четвертой главе представлено исследование влияния технологических факторов процесса упрочнения тлеющим разрядом и тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, осуществляемого по трем основным режимам (таблицы 8 и 9) на структурные и фазовые состояния в поверхностном слое изделий.

Таблица 8 – Режимы упрочнения образцов в тлеющем разряде

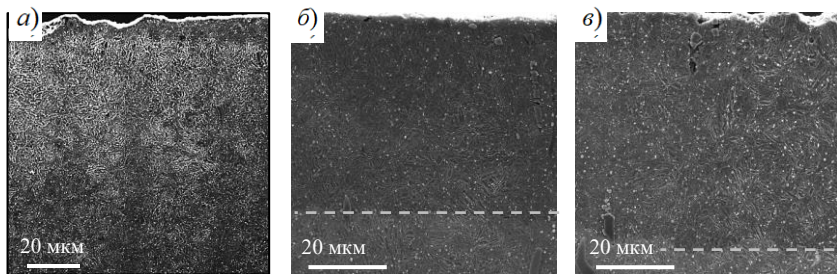
| Режим обработки | Напряжение горения тлеющего разряда U , В | Плотность тока J , мА/м ² | Время обработки T , мин |
|-----------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
| ТР № 1 | 1000 | 0,125 | 30 |
| ТР № 2 | 2000 | 0,250 | |
| ТР № 3 | 3000 | 0,375 | |

Таблица 9 – Режимы упрочнения образцов в тлеющем разряде с прикатодным магнитным полем

| Режим обработки | Напряжение горения тлеющего разряда U , В | Плотность тока J , мА/м ² | Время обработки T , мин | Магнитная индукция прикатодного магнитного поля B , мТл |
|-----------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|
| ТР + МП № 1 | 1000 | 0,125 | 30 | 40–60 |
| ТР + МП № 2 | 2000 | 0,250 | | |
| ТР + МП № 3 | 3000 | 0,375 | | |

Металлографический анализ поверхностного слоя образцов из стали 5Х3В3МФС до упрочнения показал, что структура стали соответствует классической мартенситной структуре с полосчатыми карбидными включениями (рисунок 5, а).

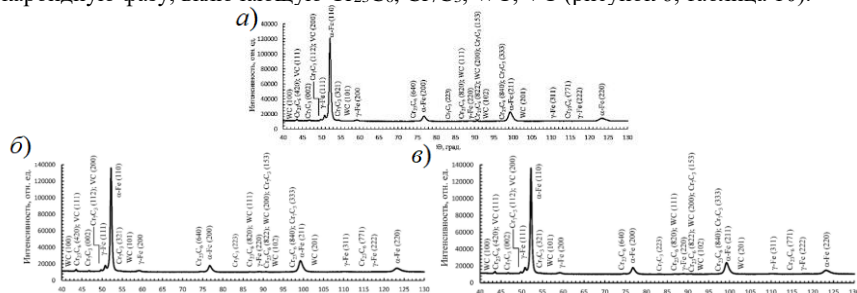
Упрочнение образцов тлеющим разрядом не приводит к видимым изменениям структуры стали, однако наблюдается перераспределение карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 75 мкм (рисунок 5, б), а при использовании прикатодного магнитного поля – глубиной до 100 мкм (рисунок 5, в).



а – до упрочнения; **б** – после упрочнения тлеющим разрядом; **в** – после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Рисунок 5 – Структура поверхностного слоя образцов из стали 5Х3В3МФС

На основании рентгенструктурного анализа установлено, что в исходном состоянии образцы из стали содержат мартенсит α -Fe, остаточный аустенит γ -Fe и карбидную фазу, включающую Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , WC, VC (рисунок 6, таблица 10).



а – до упрочнения; **б** – после упрочнения тлеющим разрядом;

в – после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Рисунок 6 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали 5Х3В3МФС

Таблица 10 – Фазовый состав, количество остаточного аустенита A_{OCT} , параметр решетки a мартенсита α -Fe, физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций стали 5Х3В3МФС, упрочненной с разными режимами

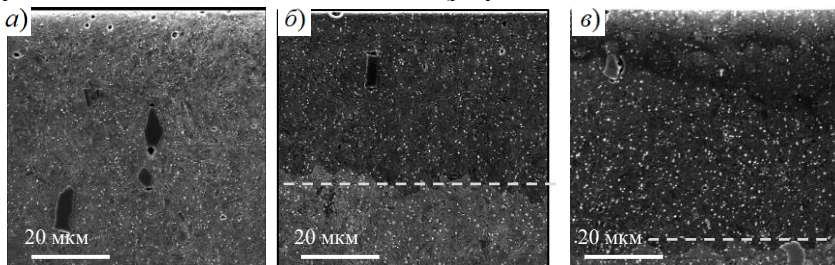
| Режим упрочнения | Фазовый состав | A_{OCT} , % | a -Fe, нм | | β_{110} , 10^{-3} рад | β_{220} , 10^{-3} рад | ρ , $\text{см}^{-2} \times 10^{12}$ | Cr_{23}C_6 | |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| | | | Эксперимент | | | | | β_{640} , 10^{-3} рад | ρ , $\text{см}^{-2} \times 10^{12}$ |
| Исходный | α -Fe, γ -Fe, Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , WC, VC | 7,2 | 0,28716 | 7,442 | 35,410 | 5,0 | 8,3614 | 5,3 | |
| ТР № 1 | | 5,7 | 0,28715 | 6,575 | 32,219 | 3,9 | 6,6632 | 3,4 | |
| ТР + МП № 1 | | 6,2 | 0,28719 | 7,486 | 36,677 | 5,1 | 4,4676 | 1,5 | |
| ТР № 2 | | 5,8 | 0,28720 | 6,777 | 32,348 | 4,2 | 5,0323 | 1,9 | |
| ТР + МП № 2 | | 6,4 | 0,28727 | 7,326 | 34,976 | 4,9 | 4,4579 | 1,5 | |
| ТР № 3 | | 5,4 | 0,28723 | 7,307 | 33,077 | 4,8 | 5,5806 | 2,4 | |
| ТР + МП № 3 | | 5,6 | 0,28728 | 7,672 | 35,139 | 5,3 | 4,0041 | 1,2 | |

Упрочнение стали 5Х3В3МФС тлеющим разрядом как с прикатодным магнитным полем, так и без него приводит к увеличению количества точечных дефектов кристаллического строения матричной фазы α -Fe, снижению остаточного аустенита (что свидетельствует о протекании полиморфного превращения γ -Fe \rightarrow α -Fe), а также к изменению

размеров карбидной фазы. Установлено, что использование прикатодного магнитного поля позволяет увеличить глубину упрочненного слоя до 100 мкм.

На основании металлографического анализа поверхностного слоя образцов из стали 4Х4ВМФС после термической обработки выявлено, что структура, так же как и для стали 5Х3ВЗМФС, соответствует классической мартенситной структуре с полоччатыми карбидными включениями (рисунок 7, а).

Упрочнение образцов тлеющим разрядом не приводит к видимому изменению структуры стали, однако наблюдается перераспределение карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 50 мкм (рисунок 7, б), а при использовании прикатодного магнитного поля – до 75 мкм (рисунок 7, в).

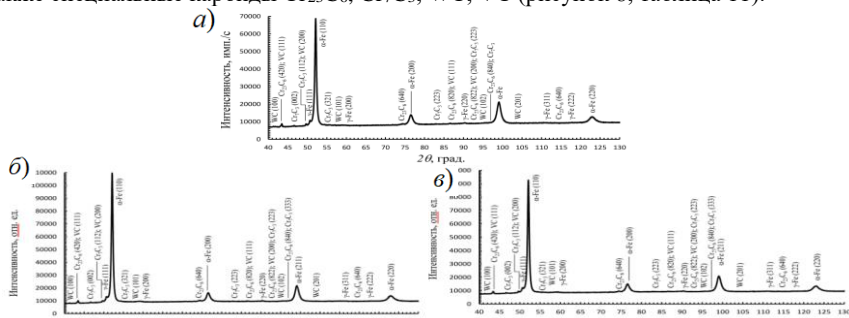


а – до упрочнения; б – после упрочнения тлеющим разрядом;

в – после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Рисунок 7 – Структура поверхностного слоя образцов из стали 4Х4ВМФС

Рентгеноструктурный анализ образцов в исходном состоянии выявил, что образцы из стали 4Х4ВМФС содержат мартенсит α -Fe, остаточный аустенит γ -Fe, а также специальные карбиды $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , WC, VC (рисунок 8, таблица 11).



а – до упрочнения; б – после упрочнения тлеющим разрядом; в – после упрочнения

тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Рисунок 8 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали 4Х4ВМФС

В результате упрочнения происходит изменение параметра кристаллической решетки мартенсита, что связано с перераспределением легирующих элементов и попаданием их атомов в кристаллическую решетку α -Fe. Использование прикатодного магнитного поля приводит к росту остаточного аустенита при упрочнении по первому и второму режиму. Использование прикатодного магнитного поля приводит к противоположной тенденции, связанной с изменением

содержания остаточного аустенита по отношению к обработке только тлеющим разрядом (см. таблицу 11).

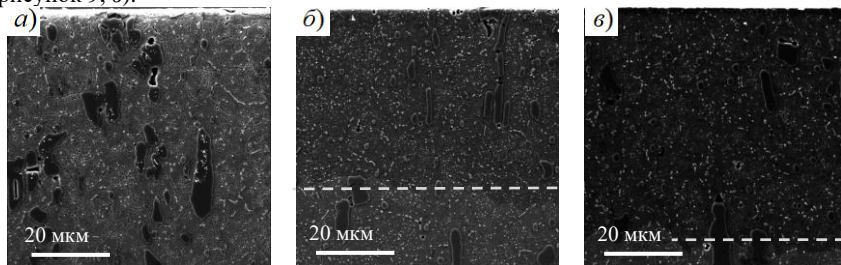
Таблица 11 – Фазовый состав, количество остаточного аустенита A_{OCT} , параметр решетки a мартенсита α -Fe, физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали 4X4BMФС, упрочненной с разными режимами

| Режим упрочнения | Фазовый состав | A_{OCT} , % | $a_{\alpha\text{-Fe}}$, нм | β_{110} , 10^{-3} рад | β_{220} , 10^{-3} рад | ρ , см^{-2} , $\times 10^{12}$ | Cr_{23}C_6 | |
|------------------|------------------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|
| | | | Эксперимент | | | | β_{640} , 10^{-3} рад | ρ , см^{-2} , $\times 10^{12}$ |
| Исходный | α -Fe, TP № 1 | 3,9 | 0,2878 | 11,1701 | 41,782 | 2,41 | 9,2393 | 3,75 |
| TP № 1 | | 3,7 | 0,2877 | 10,185 | 42,899 | 2,53 | 8,2261 | 2,91 |
| TP + МП № 1 | γ -Fe, TP № 2 | 6,0 | 0,2877 | 9,650 | 38,120 | 2,00 | 10,8753 | 5,08 |
| TP № 2 | | 4,3 | 0,2877 | 9,870 | 38,403 | 2,03 | 8,9885 | 3,48 |
| TP + МП № 2 | Cr_{7}C_3 , WC, VC | 5,4 | 0,2877 | 10,48 | 36,526 | 1,83 | 7,4090 | 2,36 |
| TP № 3 | | 4,7 | 0,2877 | 10,019 | 40,483 | 2,25 | 8,3073 | 2,97 |
| TP + МП № 3 | | 3,0 | 0,2877 | 10,26 | 41,893 | 2,41 | 9,0999 | 3,56 |

Использование прикатодного магнитного поля приводит к снижению количества дефектов в большей степени, чем при упрочнении тлеющим разрядом, на что указывает снижение уширения дифракционных линий и уменьшение плотности дислокаций. Для обоих случаев наблюдается снижение плотности дислокаций с ростом энергетических характеристик тлеющего разряда. От выявленной тенденции отличаются результаты по режиму № 3, где использование прикатодного магнитного поля приводит к росту уширения дифракционных линий и незначительному увеличению плотности дислокаций (см. рисунок 8, таблицу 11).

Исследуя отражение от дифракционной линии (640) Cr_{23}C_6 , выявили, что использование прикатодного магнитного поля приводит к росту физического уширения и плотности дислокаций карбидной фазы, что может свидетельствовать о росте сжимающих напряжений (см. таблицу 11).

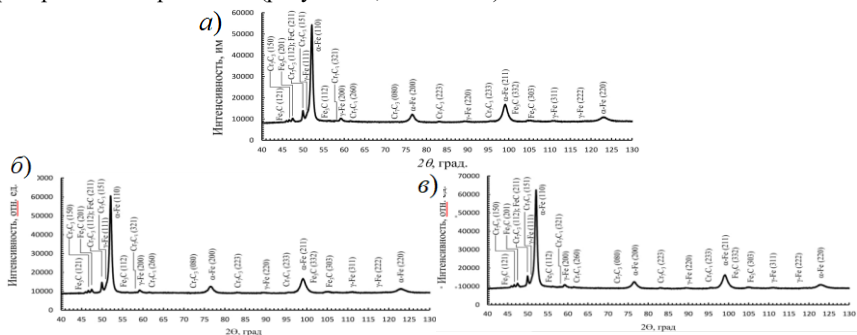
На основании металлографического анализа поверхностного слоя установлено, что структура образцов из стали X12MФ после термической обработки соответствует классической мартенситной структуре, карбидные частицы вытянуты в одном направлении и образуют полосчатость (рисунок 9, а). Упрочнение образцов тлеющим разрядом не приводит к видимому изменению структуры стали, однако наблюдается перераспределение карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 50 мкм (рисунок 9, б), а при использовании прикатодного магнитного поля – до 80 мкм (рисунок 9, в).



а – до упрочнения; б – после упрочнения тлеющим разрядом; в – после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Рисунок 9 – Структура поверхностного слоя образцов из стали X12MФ

Рентгеноструктурный анализ образцов в исходном состоянии позволил выявить, что сталь X12МФ содержит мартенсит α -Fe, остаточный аустенит γ -Fe, цементит Fe_3C и трикарбид гептахром Cr_7C_3 (рисунок 10, таблица 12).



а – до упрочнения; **б** – после упрочнения тлеющим разрядом; **в** – после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Рисунок 10 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали X12МФ

Таблица 12 – Фазовый состав, количество остаточного аустенита A_{OCT} , параметр решетки a мартенсита α -Fe, физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали X12МФ, обработанной с разными режимами

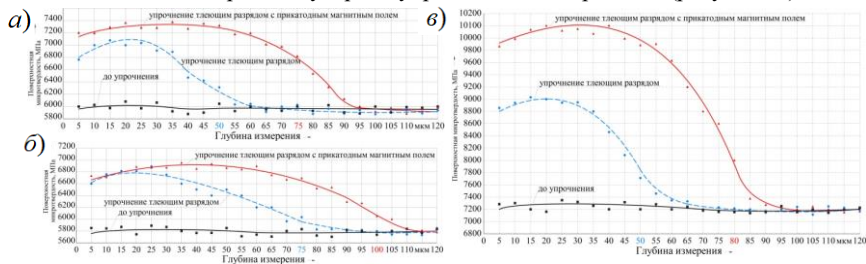
| Режим упрочнения | Фазовый состав | A_{OCT} , % | $a_{\alpha\text{-Fe}}$, нм | β_{110} , 10^{-3} рад | β_{220} , 10^{-3} рад | ρ , $\text{см}^{-2} \times 10^{12}$ | Cr_7C_3 | |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| | | | Эксперимент | | | | β_{640} , 10^{-3} рад | ρ , $\text{см}^{-2} \times 10^{12}$ |
| Исходный | α -Fe, γ -Fe, Cr_7C_3 , Fe_3C | 10,5 | 0,2876 | 13,5419 | 55,0689 | 4,16 | 11,2379 | 8,12 |
| ТР № 1 | | 12,7 | 0,2876 | 12,0960 | 50,0193 | 3,43 | 9,2416 | 2,11 |
| ТР + МП № 1 | | 8,8 | 0,2877 | 14,4793 | 52,2393 | 3,75 | 14,6635 | 13,90 |
| ТР № 2 | | 10,6 | 0,2877 | 13,8545 | 56,9561 | 8,92 | 8,2591 | 8,79 |
| ТР + МП № 2 | | 8,6 | 0,2877 | 14,0965 | 47,8555 | 3,15 | 11,1009 | 7,92 |
| ТР № 3 | | 9,6 | 0,2878 | 13,4297 | 61,1721 | 10,5 | 9,4592 | 11,50 |
| ТР + МП № 3 | | 9,6 | 0,2877 | 14,6862 | 56,5311 | 8,79 | 12,2205 | 19,20 |

Упрочнение как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него не приводит к изменению фазового состава изделий из стали X12МФ. В результате упрочнения происходит изменение параметра кристаллической решетки мартенсита, что связано с перераспределением легирующих элементов и попаданием их атомов в кристаллическую решетку α -Fe (см. рисунок 10, таблицу 12).

Характерно то, что обработка тлеющим разрядом приводит к снижению количества остаточного аустенита, а с использованием прикатодного магнитного поля – к более значительному уменьшению. На распад остаточного аустенита может оказывать влияние протекающий процесс отпуска, за счет которого происходит обеднение аустенитной фазы легирующими элементами и, как следствие, ее полиморфное превращение в α -Fe. Использование прикатодного магнитного поля приводит к снижению количества дефектов в стали в большей степени, чем при упрочнении тлеющим разрядом, на что указывает снижение уширения дифракционных линий и уменьшение плотности дислокаций (см. рисунок 10, таблицу 12).

Исследуя отражение от дифракционной линии (260) Cr₇C₃, можно сделать вывод о том, что использование прикатодного магнитного поля приводит к изменению размера карбидной фазы вместе с ростом физического уширения и плотности дислокаций, что свидетельствует о росте сжимающих напряжений (см. таблицу 12).

Из проведенных ранее металлографических исследований сложно определить глубину слоя после упрочнения как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него, поэтому был проведен дюрометрический анализ глубины упрочненного слоя по плоскости, перпендикулярной упрочненной поверхности (рисунок 11).



а – стали 4Х4ВМФС; б – стали 5Х3ВЗМФС; в – стали Х12МФ
Рисунок 11 – Микротвердость поверхностного слоя образцов

Таблица 13 – Максимальные значения глубины упрочненного слоя при различных методах упрочнения образцов

| Сталь | Глубина упрочненного слоя после упрочнения тлеющим разрядом, мкм | Глубина упрочненного слоя после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, мкм | Приращение глубины упрочненного слоя, % |
|----------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 5Х3ВЗМФС | 50 | 80 | 55–60 |
| Х12МФ | 75 | 100 | 30–35 |
| 4Х4ВМФС | 50 | 75 | 45–50 |

На основании анализа данных, приведенных в таблице 13 и на рисунке 11, можно сделать вывод о том, что применение магнитного поля при обработке изделий тлеющим разрядом приводит к дополнительному росту микротвердости их поверхностей, а также увеличению глубины упрочненного слоя. Данные результаты коррелируются с результатами металлографического исследования.

Упрочнение как тлеющим разрядом, так и тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя обрабатываемых материалов. Упрочнение сопровождается процессом распыления поверхности и приводит к незначительному росту величины шероховатости поверхности (таблица 14).

Таблица 14 – Результаты значений параметров шероховатости поверхности образцов по параметру R_a , мкм, в зависимости от основных режимов упрочнения

| Режим обработки | 5Х3ВЗМФС | 4Х4ВМФС | Х12МФ |
|------------------|----------|---------|--------|
| Исходный образец | 0,1823 | 0,1887 | 0,1919 |
| ТР № 1 | 0,1948 | 0,1970 | 0,1927 |
| ТР № 2 | 0,1932 | 0,1910 | 0,1955 |
| ТР № 3 | 0,1945 | 0,1930 | 0,1960 |

Окончание таблицы 14

| Режим обработки | 5Х3В3МФС | 4Х4ВМФС | X12МФ |
|-----------------|----------|---------|--------|
| ТР + МП № 1 | 0,1954 | 0,1940 | 0,1968 |
| ТР + МП № 2 | 0,1935 | 0,1920 | 0,1950 |
| ТР + МП № 3 | 0,1951 | 0,1940 | 0,1963 |

В пятой главе представлена технология упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем (рисунок 12).

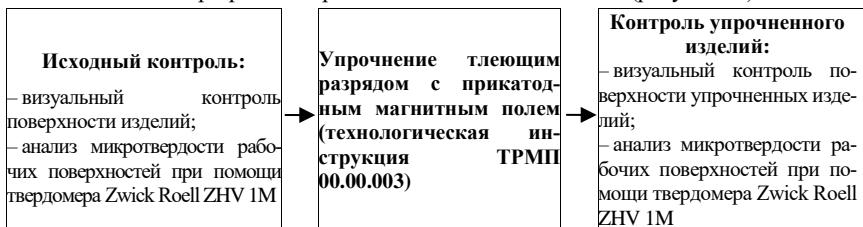


Рисунок 12 – Технология упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Технологический процесс упрочнения разработан на основании проведенных в данной работе исследований и производственных испытаний инструментов из упрочненных сталей, выполненных на ряде предприятий Республике Беларусь.

Упрочнение деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем для достижения максимальной контактной выносливости следует производить в соответствии с таблицей 3, для достижения максимальной износостойкости – в соответствии с таблицей 6.

Опытно-промышленная проверка результатов работы проводилась в условиях реального производства продукции на таких предприятиях, как ОАО «Могилевский завод «Строммашина» (г. Могилев), ООО «ЗнакОМ» (г. Могилев), МАОА «Красный металлист» (г. Могилев), ОАО «ТАИМ» (г. Бобруйск), ОАО «Могилевлифтмаш» (г. Могилев).

На основании заключенного договора с ОАО «ТАИМ» ХД № 1931/488/19 проводилось упрочнение тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем матриц и пуансонов, получен экономический эффект в размере 4 849,19 белорусских рублей в ценах 2019 г., на что составлен соответствующий акт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основании результатов экспериментальных исследований влияния магнитного поля на характеристики тлеющего разряда, температуру разогрева и поверхностную микротвердость упрочняемых изделий и конструкторско-технологической реализации источника формирования прикатодного магнитного поля предложен метод упрочнения деформирующих элементов штампов, характеризующийся тем, что изделия размещают на катоде, расположенном в силовых линиях постоянного магнитного поля, и обрабатывают поверхности изделий плазмой тлеющего разряда, возбужденного в вакууме, с разрежением 2–3 Па при напряжении 0,8–3,2 кВ, плотности тока между анодом и катодом 0,125–0,375 А/м², в течение 10–30 мин. Установлена рабочая индукция магнитного поля 0,04–0,06 Тл [5; 36].

2. На основании результатов экспериментальных исследований влияния технологических параметров упрочнения тлеющим разрядом как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него (напряжение, сила тока, время обработки) на поверхностную микротвердость и износостойкость изделий из инструментальных легированных сталей (X12МФ, 4Х4ВМФС, 5Х3В3МФС) установлено, что упрочнение тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем приводит к росту микротвердости поверхности на 19–30 % и износостойкости в 2–2,3 раза по сравнению с неупрочненными изделиями, использование прикатодного магнитного поля приводит к увеличению глубины упрочненного слоя на 30–60 % по сравнению с упрочнением тлеющим разрядом без использования прикатодного магнитного поля с одновременным снижением удельной мощности горения тлеющего разряда на 30–45 % [2; 3; 5–8].

3. На основании результатов экспериментальных исследований влияния технологических параметров упрочнения тлеющим разрядом как с использованием прикатодного магнитного поля, так и без него (напряжение, сила тока, время обработки) на структуру, фазовый состав инструментальных легированных сталей (X12МФ, 4Х4ВМФС, 5Х3В3МФС) установлено, что упрочнение тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем приводит к изменению параметра кристаллической решетки матричной фазы α -Fe, изменению соотношения фаз γ -Fe и α -Fe, а так же изменению размеров и перераспределению карбидной фазы $Cr_{23}C_6$ в поверхностном слое изделий из стали 5Х3В3МФС на глубине до 100 мкм и изделий из стали 4Х4ВМФС на глубине до 75 мкм, карбидной фазы Cr_7C_3 в поверхностном слое изделий из стали X12МФ на глубине до 80 мкм [2–5; 7; 8].

4. На основании результатов экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик упрочненных деформирующих элементов штампов и их промышленной апробации, выявлено что упрочнение тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем деформирующих элементов штампов обеспечивает, увеличение стойкости деформирующих элементов штампов для горячей штамповки в 3–4 раза и для холодной штамповки в 4,5 раза, что позволило разработать и внедрить в промышленность и образовательный процесс технологию упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем [2; 6]

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты являются научной основой дальнейших исследований влияния упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем на другие группы режущего и деформирующего инструмента из различных инструментальных материалов.

Упрочненные тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем деформирующие элементы штампов могут быть предложены в качестве замены инструментов, прошедших упрочнение другими способами, работающих при холодной штамповке и горячей пластической деформации в условиях, где необходимо обеспечение высоких эксплуатационных свойств поверхностного слоя, что может быть использовано предприятиями металлообрабатывающего комплекса Республики Беларусь.

Результаты диссертации апробированы на таких предприятиях, как ОАО «Могилевский завод «Строммашина» (г. Могилев), ООО «ЗнакОМ» (г. Могилев), МАОА «Красный металлист» (г. Могилев), ОАО «ТАИМ» (г. Бобруйск),

ОАО «Могилевлифтмаш» (г. Могилев), и внедрены на ОАО «ТАИМ» с суммарным экономическим эффектом 4 849,19 белорусских рублей в ценах 2019 г.

Результаты работы рекомендуются к использованию при подготовке студентов технических специальностей высших учебных заведений, а именно при изучении спецкурсов «Основы технологии машиностроения», «Технология механической и физико-технической обработки», «Эффективные методы повышения эксплуатационных характеристик деталей машин».



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монография

1. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом : монография / В. М. Шеменков, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, М. А. Белая (Рабыко), А. Л. Шеменкова; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 269 с.
2. Шеменков, В. М. Инженерия поверхностного слоя инструментальной оснастки тлеющим разрядом : монография / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, А. Н. Юманова; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. В. М. Шеменкова. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2023. – 250 с.

Статьи, включенные в перечень ВАК

3. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и износостойкость инструментальных штамповых сталей / В. М. Шеменков, М. А. Белая (Рабыко), А. Л. Шеменкова, О. В. Обидина // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та.– 2018. – № 4 (61). – С. 28–38.
4. Рабыко, М. А. Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2 (75). – С. 23–31.
5. Рабыко, М. А. Влияние прикатодного магнитного поля на структурно-фазовое состояние инструментальной штамповой стали 5Х3В3МФС при обработке ее тлеющим разрядом / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 77–86.
6. Рабыко, М. А. Повышение эксплуатационных характеристик штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 12 (12). – С. 4–11.
7. Шеменков, В. М. Влияние прикатодного магнитного поля на степень упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали Х12МФ / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2 (79). – С. 118–128.
8. Шеменков, В. М. Влияние прикатодного магнитного поля на эффективность процесса упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали 4Х4ВМФС / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, В. В. Шеменков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 3 (80). – С. 115–125.

Статьи в научных журналах

9. Повышение эксплуатационных характеристик штамповых сталей тлеющим разрядом в постоянном магнитном поле [Электронный ресурс] / В. А. Герасимович, А. П. Сериков, М. А. Белая (Рабыко), О. В. Обидина // Студенч. вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2014. – Режим доступа : [http://bru.Mogilev/scence/vesnik/ index.htm](http://bru.Mogilev/scence/vesnik/index.htm). – Дата доступа: 02.12.2015.
10. Белая (Рабыко), М. А. Применение комплексного воздействия тлеющего разряда и постоянного магнитного поля для повышения эксплуатационных характеристик материалов / М. А. Белая (Рабыко), А. Л. Шеменкова, П. В. Лустенков //

XIV Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых : материалы конф., Гомель, 24–25 апреля 2014 г. – Гомель: ПГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – С. 118–121.

11. Повышение эксплуатационных характеристик инструментальных и конструкционных сталей обработкой в тлеющем разряде [Электронный ресурс] / В. П. Подольский, О. М. Савина, М. А. Белая (Рабыко), В. М. Шеменков // Студенч. вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – Режим доступа : <http://bru.Mogilev/scence/vesnik/index.htm>. – Дата доступа : 17.02 2019.

12. Белая (Рабыко), М. А. Влияние технологических факторов обработки тлеющим разрядом на структурно-фазовые изменения в сталях 5Х3В3МФС и Х12 / М. А. Белая (Рабыко) // Магистерский вестник : сб. науч. работ магистрантов и аспирантов / редкол. : И. И. Ганчерёнок [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – 232 с.

13. Белая (Рабыко), М. А. Влияние технологических факторов обработки тлеющим разрядом на твердость и износостойкость сталей 5Х3В3МФС и Х12 / М. А. Белая (Рабыко) // Новые материалы и технологии : материалы V Рос.-Казахстан. молодеж. науч.-техн. конф. – Барнаул: АлтГТУ, 2017. – С. 42–48.

14. Елисеева, А. Н. Влияние комплексной обработки, основанной на химико-термической обработке и тлеющем разряде, на структуру и свойства поверхностных слоев сталей / А. Н. Елисеева, М. А. Рабыко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых : материалы конф., Белгород, 25–27 мая 2020 г. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 2394–2400.

15. Тенденция развития технологий, основанных на тлеющем разряде, для повышения износостойкости инструментальной и технологической оснастки / А. Н. Елисеева, М. А. Рабыко, Я. И. Печковская, В. М. Шеменков // Менеджмент качества производственных социально-экономических и технических систем : развитие и совершенствование : сб. науч. тр. – Брянск, 2022. – С. 35–39.

16. Рабыко, М. А. Технология повышения эксплуатационных характеристик технологической оснастки из штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2022 г. : в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2022. – Ч. 1. – С. 28–31.

17. Юманова, А. Н. Влияние прикатодного магнитного поля на эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей деталей при обработке тлеющим разрядом / А. Н. Юманова, М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Инновации в машиностроении : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. ИнМаш-2022, Барнаул, 23–25 нояб. 2022 г. / Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова; отв. редактор М. В. Доц. – Барнаул: АлтГТУ, 2022. – С. 296–300.

18. Рабыко, М. А. Влияние прикатодного магнитного поля на частотные характеристики тлеющего разряда / М. А. Рабыко, А. Н. Юманова, В. М. Шеменков // Перспективные машиностроительные технологии : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 21–25 нояб. 2022 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 92–96.

19. Рабыко, М. А. Использование прикатодного магнитного поля как фактор повышения эффективности упрочнения тлеющим разрядом штамповой оснастки [Электронный ресурс] / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Инновационные технологии в машиностроении : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ.

55-летию Полоц. гос. ун-та им. Е. Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апр. 2023 г. – Новополоцк, 2023. – С. 153–155. – Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/38354>. – Дата доступа: 15.06.2023.

Материалы международных конференций, тезисы докладов

20. Ахралович, Е. С. Повышение производственного ресурса матриц бомбардировкой ионами малой энергии в вакууме / Е. С. Ахралович, М. А. Белая (Рабыко) // 44 студенч. науч.-техн. конф. : материалы конф., Могилев, 20–24 мая 2008 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – С. 22.

21. Белая (Рабыко), М. А. Модификация свойств деталей из углеграфитовых материалов методом НЭВ / М. А. Белая (Рабыко), Е. С. Ахралович // 44 студенч. науч.-техн. конф. : материалы конф., Могилев, 20–24 мая 2008 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – С. 34.

22. Шеменков, В. М. Повышение производственного ресурса инструментальной оснастки обработкой в плазме тлеющего разряда / В. М. Шеменков, Е. С. Ахралович, М. А. Белая (Рабыко) // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г. : в 2 ч. / Беларус.-Рос ун-т; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч. 1. – С. 109.

23. Ахралович, Е. С. Повышение производственного ресурса штамповой оснастки потоком заряженных частиц в вакууме / Е. С. Ахралович, М. А. Белая (Рабыко) // 45 студенч. науч.-техн. конф. : материалы конф., Могилев, 18–22 мая 2009 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – С. 20.

24. Шеменков, В. М. Повышение эксплуатационных характеристик инструментальной оснастки обработкой в тлеющем разряде / В. М. Шеменков, Е. С. Ахралович, М. А. Белая (Рабыко) // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 12–13 апр. 2010 г. : в 2 ч. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 84.

25. Ахралович, Е. С. Повышение эксплуатационных характеристик инструментальной оснастки обработкой в тлеющем разряде / Е. С. Ахралович, М. А. Белая (Рабыко) // 46 студенч. науч.-техн. конф. : материалы конф., Могилев, 27 мая 2010 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – С. 18.

26. Белая (Рабыко), М. А. Повышение износостойкости инструментальной оснастки комплексным воздействием тлеющего разряда и постоянного магнитного поля / М. А. Белая (Рабыко), А. С. Батраков, А. Л. Шеменкова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 30–31 окт. 2012 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 62.

27. Использование комплексного воздействия тлеющего разряда и постоянного магнитного поля для повышения износостойкости инструментальной и технологической оснастки / М. А. Белая (Рабыко), А. С. Батраков, К. А. Бодяко, А. Л. Шеменкова // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 2012 г. : в 2 ч. / Брянск: БГТУ, 2012. – Ч. 1. – С. 38.

28. Повышение износостойкости инструментальной оснастки комплексным воздействием тлеющего разряда и постоянного магнитного поля / В. А. Герасимович,

С. С. Тумаков, М. А. Белая (Рабыко), В. М. Шеменков // 49 студенч. науч.-техн. конф. : материалы конф., Могилев, 16–17 мая 2013 г. – Могилев: Беларус.-Пос. ун-т, 2013. – С. 46.

29. Structure changes and improvement of operating properties of highspeed and tool steels irradiated in glowdischarge plasma / U. Shamiankou, V. Abidzina, I. Tereshko, M. Belaya (Rabyka) // Materials, Environment, Technology: Conference MET-2013, Latvia, Riga, 19–20 June 2013. – Riga, 2013. – P. 101.

30. Белая (Рабыко), М. А. Повышение эксплуатационных характеристик технологической оснастки комплексным воздействием тлеющего разряда и постоянного магнитного поля / М. А. Белая (Рабыко), А. С. Батраков, А. Л. Шеменкова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 апр. 2013 г.: в 2 ч. / Беларус.-Пос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – Ч. 1. – С. 69.

31. Белая (Рабыко), М. А. Повышение износостойкости инструментальной оснастки комплексным воздействием тлеющего разряда и постоянного магнитного поля [Электронный ресурс] / М. А. Белая (Рабыко), А. Л. Шеменкова, В. М. Шеменков // Студенч. вестн. Беларус.-Пос. ун-та. – 2014. – Режим доступа: <http://bru.Mogilev/scence/vesnik/index.htm>. – Дата доступа: 01.02.2016.

32. Влияние тлеющего разряда на структуру и фазовый состав азотированной стали 4X4BMFC / М. А. Белая (Рабыко), А. С. Рабыко, А. Н. Елисеева, В. С. Выщепольский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 27–28 окт. 2016 г. – Могилев: Беларус.-Пос. ун-т, 2016. – С. 57.

33. Елисеева, А. Н. Анализ проблемы влияния магнитного поля на тлеющий разряд, возбуждаемого в среде остаточного атмосферного газа [Электронный ресурс] / А. Н. Елисеева, М. А. Белая (Рабыко) // Студенч. вестн. Беларус.-Пос. ун-та. – 2018. – Режим доступа: <http://bru.Mogilev/scence/vesnik/index.htm>. – Дата доступа: 11.12.2020.

34. Шеменков, В. М. Структурно-фазовое модифицирование поверхностных слоев изделий из штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко // Современные проблемы машиностроения : сб. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Нац. исследоват. ТПУ, 2021. – С. 198–199.

Патенты

35. Установка вакуумная для упрочнения изделий комплексным воздействием тлеющего разряда и постоянного магнитного поля : пат. ВУ 9478 / В. М. Шеменков, М. А. Белая (Рабыко), В. В. Малутин, А. Л. Шеменкова, А. С. Батраков. – Оpubл. 30.08.2013.

36. Способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого материала : пат. ВУ 19126 / В. М. Шеменков, М. А. Белая (Рабыко). – Оpubл. 30.12.2013.

РЭЗІЮМЭ

РАБЫКА Марына Аляксандраўна

Тэхналогія ўмацавання дэфармавальных элементаў штампаў тлеючым разрадам з прыкатодным магнітным полем

Ключавыя словы: тлеючы разрад, структура, фазавы склад, магнітнае поле, умацавальная апрацоўка, паверхневы слой, сталь

Мэта даследавання: распрацоўка тэхналогіі ўмацавання дэфармавальных элементаў штампаў тлеючым разрадам з прыкатодным магнітным полем, якая забяспечвае павышэнне цвёрдасці і зносаўстойлівасці іх рабочых паверхняў.

Метады даследавання: стандартныя метадыкі ацэнкі мікрацвёрдасці і зносаўстойлівасці паверхневага слоя ўмацаваных вырабаў, аналіз шурпатасці паверхні, метады металаграфічнага і рэнтгенаструктурнага аналізу.

Вынікі даследавання і іх навізна: вызначаны асноўныя параметры крыніцы фарміравання прыкатоднага магнітнага поля індукцыяй ад 40 да 60 мТл. Устаноўлены колькасныя значэнні прырашчэння паверхневай мікрацвёрдасці і зносаўстойлівасці вырабаў са сталей 5Х3В3МФС, 4Х4ВМФС, Х12МФ па ДАСТ 5950–2000 і ўплыў на іх асноўных тэхналагічных параметраў працэсу ўмацавання як тлеючым разрадам, так і тлеючым разрадам з прыкатодным магнітным полем; выяўлена, што выкарыстанне прыкатоднага магнітнага поля дазволіла павялічыць паверхневую мікрацвёрдасць вырабаў са сталей на 3–13 % і зносаўстойлівасць на 29–42 % у параўнанні з апрацоўкай адным тлеючым разрадам. На падставе трыбамеханічных выпрабаванняў вызначаны аптымальныя рэжымы ўмацавання, якія забяспечваюць атрыманне найбольшай зносаўстойлівасці дэфармавальных элементаў штампаў. Устаноўлены структурна-фазавыя станы ў паверхневым слоі вырабаў. Выяўлена, што ў выніку апрацоўкі тлеючым разрадам як з прыкатодным магнітным полем, так і без яго адбываецца колькасная змена α -Fe і γ -Fe, што сведчыць аб працяканні паліморфных ператварэнняў у матрычнай фазе сталей. Выяўлена змяненне памераў крышталічнай рашоткі і шчыльнасці дыслакацый матрычнай фазы α -Fe і карбіднай фазы. Устаноўлена, што пры выкарыстанні прыкатоднага магнітнага поля назіраецца павелічэнне глыбіні ўмацаванага слоя да 60 %. Распрацавана і ўкаранёна ў вытворчасць і адукацыйны працэс тэхналогія ўмацавання дэфармавальных элементаў штампаў тлеючым разрадам з прыкатодным магнітным полем.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацавана і ўкаранёна ў рэальны сектар эканомікі і ў адукацыйны працэс тэхналогія ўмацавання дэфармавальных элементаў штампаў тлеючым разрадам з прыкатодным магнітным полем. Распрацавана тэхналагічная інструкцыя ТРМП 00.00.003 на аперацыю ўмацавання.

Вобласць прымянення: машынабудаванне, інструментальная вытворчасць, станкабудаванне, вышэйшая адукацыя.

РЕЗЮМЕ

РАБЫКО Марина Александровна

Технология упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Ключевые слова: тлеющий разряд, структура, фазовый состав, магнитное поле, упрочняющая обработка, поверхностный слой, сталь

Цель исследования: разработка технологии упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, обеспечивающая повышение твердости и износостойкости их рабочих поверхностей.

Методы исследования: стандартные методики оценки микротвердости и износостойкости поверхностного слоя упрочненных изделий, анализ шероховатости поверхности, методы металлографического и рентгеноструктурного анализа.

Результаты исследования и их новизна: определены основные параметры источника формирования прикатодного магнитного поля индукцией от 40 до 60 мТл. Установлены количественные значения приращения поверхностной микротвердости и износостойкости изделий из сталей 5Х3В3МФС, 4Х4ВМФС, Х12МФ по ГОСТ 5950–2000 и влияние на них основных технологических параметров процесса упрочнения как тлеющим разрядом, так и тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; выявлено, что использование прикатодного магнитного поля позволило увеличить поверхностную микротвердость изделий из сталей на 3–13 % и износостойкость на 29–42 % по сравнению с обработкой одним тлеющим разрядом. На основании трибомеханических испытаний определены оптимальные режимы упрочнения, обеспечивающие получение наибольшей износостойкости деформирующих элементов штампов. Установлены структурно-фазовые состояния в поверхностном слое изделий. Выявлено, что в результате обработки тлеющим разрядом как с прикатодным магнитным полем, так и без него происходит количественное изменение α -Fe и γ -Fe, что свидетельствует о протекании полиморфных превращений в матричной фазе сталей, выявлено изменение размеров кристаллической решетки и плотности дислокаций матричной фазы α -Fe и карбидной фазы. Установлено, что при использовании прикатодного магнитного поля наблюдается увеличение глубины упрочненного слоя до 60 %. Разработан и внедрен в образовательный процесс и производство технологический процесс упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем.

Рекомендации по использованию: разработан и внедрен в образовательный процесс и в реальный сектор экономики технологический процесс упрочнения деформирующих элементов штампов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем. Разработана технологическая инструкция ТРМП 00.00.003 на операцию упрочнения.

Область применения: машиностроение, инструментальное производство, станкостроение, высшее образование.

SUMMARY

RABYKA Maryna

Hardening technology of stamps deforming elements by the glow discharge with the near-cathode magnetic field

Key words: glow discharge, structure, phase composition, magnetic field, hardening treatment, surface layer, steel

Purpose of the study: development of technology for hardening of stamps deforming elements by the glow discharge with the near-cathode magnetic field, which provides an increase in the hardness and wear-resistance of their working surfaces.

Research methods: standard methods of assessing microhardness and wear resistance for the surface layer of hardened products, analysis of surface roughness; metallographic methods and X-ray structural analysis.

The results of the study and their novelty: the main parameters of the formation source near-cathode magnetic field with an induction from 40 to 60 mT have been determined. The quantitative values of the increment for the surface microhardness and wear-resistance of products made from 5X3V3MFS, 4X4VMFS, X12MF steels by GOST 5950–2000 and the influence on them by the main technological parameters of hardening process, both by glow discharge and by glow discharge with the near-cathode magnetic field, were established; it was revealed that the use of a near-cathode magnetic field allowed to increase the surface microhardness of steel's products at 3–13 % and wear-resistance at 29–42 % higher than without it. Based on tribomechanical tests, been determined optimal hardening modes to provide the greatest wear-resistance of stamps deforming elements have. The structural-phase states in the surface layer of the products were established, it was revealed that as the result of the glow discharge treatment, both with a near-cathode magnetic field and without it, a quantitative change in α -Fe and γ -Fe occurs, which indicates the course of polymorphic transformations at the steels matrix phase, a change in the size of the crystal lattice and the density of the matrix phase dislocations is revealed α -Fe and carbide phases. It was established that when using a cathode magnetic field, an increase in the depth of the hardened layer is observed up to 60 %. The hardening technology of stamps deforming elements by the glow discharge with the near-cathode magnetic field has been developed and introduced into manufacturing and education.

Recommendations for use: the hardening technology of stamps deforming elements by the glow discharge with the near-cathode magnetic field has been developed and implemented in the real sector of the economy and in education. Technological instruction TRMP 00.00.003 for the hardening operation was developed.

Scope of application: mechanical engineering, tool production, machine tool building, higher education

Научное издание

РАБЫКО
Марина Александровна

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕФОРМИРУЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ
С ПРИКАТОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Подписано в печать 12.12.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,77. Тираж 70. Заказ 1029.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.