

На правах рукописи



**Мьят Со Лвин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ГРАДИЕНТНЫХ  
СЛОЕВ СТАЛИ 38Х2МЮА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ И ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО  
АЗОТИРОВАНИЯ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Федорова Лилия Владимировна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры материаловедения  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Гаврилов Геннадий Николаевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Материаловедение, технология материалов и  
термическая обработка металлов» НГТУ им.  
Р.Е. Алексеева. Заслуженный работник Высшей  
школы РФ

**Иванников Александр Юрьевич**  
Кандидат технических наук, Институт  
металлургии и материаловедения им. А.А.  
Байкова Российской академии наук (ИМЕТ  
РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Московский авиационный  
институт (национальный исследовательский  
университет) »

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. в \_\_\_\_\_ на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим  
высылать в двух экземплярах по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте  
МГТУ им. Н.Э. Баумана [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок: 8(499) 263-66-33 доб. 36-28

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Плохих Андрей Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие современной науки и техники основывается не только на исследовании и создании новых материалов, но и на разработке и внедрении перспективных технологических направлений, обеспечивающих повышение эффективности существующих процессов упрочнения деталей машин и технологического оборудования. Одним из путей реализации этого направления является разработка способов, основанных на упрочнении поверхностного слоя изделий концентрированными потоками энергии (КПЭ).

В отечественных и зарубежных исследованиях показана эффективность многочисленных методов упрочнения сталей и изделий из них путем модификации состава и структуры поверхностных слоёв. Это прежде всего, разнообразные методы химико-термической обработки (ХТО) (азотирование по различным схемам, карбонитрация и др.) а также упрочнение поверхностных слоев изделий концентрированными потоками энергии (электрохимическая обработка (ЭМО), лазерное упрочнение и др).

Каждый из перечисленных методов является эффективным, однако методы ХТО приводят к образованию небольших по глубине упрочненных слоёв, что при комбинировании с процессами концентрированными потоками энергии позволяет достигнуть повышение таких свойств металлов и сплавов, как износостойкость в условиях абразивного износа и трения без смазки.

Накоплен большой опыт по применению азотирования для повышения износостойкости, прочности, коррозионной стойкости, задиростойкости деталей машин, работающих при высоких температурах и относительно небольших контактных нагрузках. Большой вклад в развитие азотирования внесли Российские ученые Н.П. Чижевский, И.Е. Конторович, С.А. Герасимов, Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов, М.Ю. Семенов, Л.И. Куксенова, А.Е. Смирнов, С.А. Пахомова и другие.

В целях повышения эффективности азотирования необходимо решать вопросы, связанные с увеличением глубины упрочнения поверхностного слоя, сокращением времени диффузионного насыщения и снижением себестоимости изготовления азотируемых изделий.

Результаты исследований Б.М. Аскинази, Ю.Д. Александрова, В.М. Кряжкова, Э.В. Рыжова, А.Г. Сулова, А.В. Гурьева, В.П. Багмутова, Н.Г. Дудкиной, А.В. Морозова, И.Н. Захарова, С.К. Федорова, В.И. Калиты и других ученых, свидетельствуют о высокой эффективности ЭМО.

Положительным эффектом ЭМО является возможность локального упрочнения высокоэнергетическим комбинированным воздействием на поверхностный слой сталей с получением мелкодисперсной градиентной структуры высокой твердости, отсутствием окисления и обезуглероживания, коробления и поводки деталей и низкой себестоимости упрочнения. Эффективность процесса ЭМО связана со структурными изменениями в поверхностном слое без изменения химического состава материала детали. При

этом твердость и износостойкость деталей после ЭМО уступает процессу азотирования.

Процесс азотирования связан с упрочнением изделий за счёт изменения химического состава поверхностного слоя. При этом поверхностный слой деталей поглощает значительное количество энергии в короткое время. Образующиеся в нем неравновесные диссипативные структуры накапливают избыточную энергию и самопроизвольно стремятся к состоянию с наименьшей свободной энергией. В поверхностном слое происходят необратимые процессы наследственности и самоорганизации, которые путем суперпозиции и совместного действия энергетических потоков приводят к образованию комплекса структур с определенными свойствами.

Исследование и разработка обоснованных рекомендаций по комбинированию технологий термической упрочнения, электромеханической и последующей химико-термической обработки, по установлению закономерностей структурно-фазовых изменений в поверхностной зоне в процессе эксплуатации, установлению их взаимосвязи с процессами поверхностной и объёмной повреждаемости представляет собой актуальную задачу, варианты решения которой представлены в диссертационной работе.

#### **Степень разработки темы диссертации.**

Анализ литературных источников показал:

1. В настоящее время не достаточно исследований по структурно-фазовым изменениям в поверхностной зоне сталей после комбинированных способов обработки.
2. Существующие методы упрочнения и возможность их применения для широкой номенклатуры деталей требуют существенной доработки.
3. Температурный фактор является определяющим в исследованиях структурно-фазовых превращений в поверхностной зоне и объяснения образования в ней вторичных структур.
4. Трансформация температурных процессов в поверхностном слое приводит к необходимости использования для описания морфологии поверхностных зона соответствующих металлографических исследований.

**Цель работы.** Формирование структуры градиентных слоев стали 38Х2МЮА с повышенными эксплуатационными свойствами при комбинировании предварительной электромеханической поверхностной закалки (ЭМПЗ) и последующего ионно-плазменного азотирования (ИПА).

В соответствии с поставленной целью определены и решены следующие **задачи исследования:**

1. Провести анализ способов упрочнения и особенностей структурообразования в поверхностных слоях азотируемых сталей.
2. Разработать математическую модель процесса ЭМПЗ поверхностного слоя стали, в соответствии с выбранными режимами, определить особенности технологического процесса при реализации деформационных нагрузок с использованием программной среды ANSYS Workbench.
3. Провести численное моделирование процессов ЭМПЗ с расчетом площади пятна контакта инструментального ролика и детали.

4. Произвести металлографический и рентгеноструктурный анализ образцов после комбинированной обработки.

5. Изучить влияние режимов предварительной обработки и условий азотирования на структуру поверхностного слоя и триботехнические характеристики.

6. Экспериментально подтвердить влияние технологических режимов, процессов разупрочнения при температурном воздействии на поверхностный слой стали 38Х2МЮА после комбинированной обработки и на повышение износостойкости.

7. Разработать технологические рекомендации по применению и внедрению комбинированной технологии.

**Объект исследования** – поверхностный слой образцов из стали 38Х2МЮА после комбинированной обработки: электромеханической поверхностной закалки (ЭМПЗ) и последующего ионно-плазменного азотирования стали.

**Предмет исследования** – режимы и структурно-фазовые превращения, происходящие в поверхностном слое стали 38Х2МЮА после различных комбинаций упрочняющей обработки, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик деталей.

#### **Научная новизна.**

1. Установлено влияние предварительной обработки поверхности электромеханической поверхностной закалкой на ускорение структурно-фазовых превращений стали 38Х2МЮА при азотировании.

2. Впервые разработаны математические модели процесса обработки поверхностного слоя стали 38Х2МЮА, с учетом выбранных режимов ЭМПЗ при различных деформационных нагрузках с использованием программной среды ANSYS Workbench.

3. Выявлены особенности структурообразования в упрочненных градиентных слоях стали 38Х2МЮА после ЭМПЗ и последующего ионно-плазменного азотирования с выдержкой 2, 4, 6, 8, 16, 24 часа, формируемых при предлагаемой комбинированной обработке, позволяющие предложить способ предварительного упрочнения ЭМПЗ для увеличения интенсивности и сокращения времени ИПА с 35 до 8 часов.

4. Установлены взаимосвязи параметров комбинированной обработки (ЭМПЗ и ИПА) с характеристиками градиентных упрочненных слоев поверхности стали 38Х2МЮА.

5. Установлена зависимость износа от различных способов упрочнения: ЭМПЗ, улучшения и ионно-плазменного азотирования, и комбинирования ЭМПЗ и ИПА.

#### **Практическая значимость.**

1. Установлены закономерности структурообразования стали 38Х2МЮА после ЭМПЗ, улучшения и ИПА, комбинированной обработки (ЭМПЗ и ИПА), что позволило определить направление совершенствования технологий упрочнения.

2. Разработан способ азотирования стальных заготовок (патент РФ на изобретение № 2801624), позволяющий повысить эффективность процессов азотирования, за счёт сокращения времени, увеличения глубины азотированного слоя и снижения себестоимости изготовления деталей.

3. Разработана и изготовлена усовершенствованная установка для ЭМО, позволяющая производить упрочнение поверхностных слоев сталей за счет одновременного термического и силового воздействия, как предварительная подготовка стали 38Х2МЮА к ИПА .

4. Разработаны практические рекомендации по применению комбинированной технологии ЭМПЗ и ИПА для деталей, испытывающих износ и повышенные температуры при эксплуатации.

#### **Методология и методы исследований**

Исследование поверхностных слоев стали 38Х2МЮА после ЭМПЗ и азотирования проводили на современном технологическом и аналитическом оборудовании: вырезку образца для приготовления шлифа проводили на отрезном станке «Discotom-6» с охлаждением в воде; шлифы готовили на оборудовании пробоподготовки фирмы STRUERS; травление шлифов проводили в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте ( $C_2H_5OH + 4\% HNO_3$ ); металлографический анализ выполняли на микроскопе OLYMPUS GX-51; определение микротвердости проводили по Виккерсу на твердомере DURASCAN; испытания на теплостойкость образцов при последовательном их нагреве производили в муфельных печах (СНОЛ 1.6.2.5.1/9-И 5) в интервале температур от 150 °С до 550 °С, через 50 °С; износные испытания выполнены по схеме «резиновый ролик – неподвижный образец» и методике American Society for Testing and Materials (ASTM G65) «Стандартная методика измерения абразивного истирания при помощи установки «Сухой песок/Резиновое колесо»; ИПА образцов выполняли на оборудовании для ионного азотирования модели ION25I (ION Nitriding installion, IONITECH LTD) в цилиндрической рабочей камере; анализ фазового состава стали проводили на рентгенофазовом дифрактометре ДРОН-4-07 при следующих режимах: Шаг съемки, гр. 0.10; режим трубки БСВ-27 (Co) 30 mA, 30 kV; бета – фильтр – Fe; метод съемки: по Брэггу – Брентано –  $w/2t$ ; ,  $V=1.0$  гр/мин.  $\tau_{расч} = 6.0$ , моделирование температурного поля при ЭМО, проводили в программе ANSYS Workbench.

**Достоверность** полученных результатов и выводов подтверждается экспериментальными исследованиями, применением современных технических средств при анализе, сходимостью теоретических и эмпирических результатов исследований, а также реализацией результатов исследований в промышленности.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на конференциях, семинарах и форумах, в том числе: XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2019 г.); IV междисциплинарном молодежном научном форуме с международным участием «Новые материалы» (г. Москва, 2018 г.); XII конференции молодых специалистов по перспективам развития металлургических технологий (г. Москва, 2023 г.); I международной

конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции» (г. Пермь, 2023).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, в том числе три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, одна работа в журнале, индексируемом Scopus и Web of Science, получен один патент на изобретение.

**Личный вклад автора состоит** в анализе научно-технической литературы и патентном поиске; исследованиях механизмов упрочнения поверхностных слоев стали 38Х2МЮА после ЭМПЗ и азотирования; обосновании применения ЭМПЗ как предварительной обработки перед последующим ионно-плазменным азотированием: изготовлении образцов; проведении исследований микроструктуры, рентгеноструктурного анализа и механических свойств, проведении испытаний на трение; обработка и анализ полученного объема экспериментальных данных; подготовка статей, выступление с докладами на конференциях, участие в выставках в составе экспозиции МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и основных выводов, списка использованной литературы, содержащего 103 источник и приложений. Работа изложена на 147 страницах, содержит 75 рисунков и 26 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проведения исследований диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, установлен объект и предмет исследований, определены научная новизна и практическая значимость, описаны структура и объем диссертации.

**В первой главе** на основе анализа отечественных и зарубежных публикаций представлен обзор научно-технической литературы, в области упрочнения деталей, а также исследований способов повышения прочности и износостойкости деталей механической, термической, химико-термической и комбинированной обработками.

Установлено, что для деталей, разрушение которых начинается с поверхности, разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, основанных или на нанесении покрытий, или на изменении состояния (модификации) поверхности.

По результатам обзора научно-технической литературы обоснована актуальность разработки технологии предварительной обработки поверхности электромеханической поверхностной закалкой для ускорения структурно-фазовых превращений и повышения эффективности азотирования.

**Во второй главе** содержится описание материалов и методик экспериментальных исследований. Объектом исследований служил поверхностный слой образцов из стали 38Х2МЮА. Разработано оборудование, оснастка и инструмент для ЭМПЗ и выбран способ ИПА. Разработана методика подбора оптимальных режимов обработки для получения наилучших свойств поверхностного слоя.

Выполнены металлографические исследования микроструктуры и измерение микротвёрдости поверхностного слоя после ЭМПЗ и ИПА. Для проведения исследований использовали релаксационностойкую азотируемую сталь 38Х2МЮА, которая широко применяется для изготовления таких деталей, как детали экструдеров, распределительные валы, шестерни, втулки, пальцы, гильзы цилиндров ДВС и другие изделия, работающие в температурных режимах до 450 °С.

Установка электромеханической обработки состоит из силового понижающего трансформатора, аппаратуры регулирования электрических параметров, приборов контроля, наблюдения и защиты, собранных в едином корпусе. Напряжение изменяется от 1 до 4В, сила тока достигает 2000А, силовой трансформатор, мощностью 4 кВт установлен в нижней части корпуса. ЭМПЗ образцов проводили на токарно-винторезном станке 16К20. Выбранный оптимальный режим ЭМПЗ: сила тока вторичной цепи  $I_2 = 1400\text{А}$ , напряжение вторичной цепи  $U_2 = 3\text{ В}$ , частота переменного тока 50 Гц, усилие прижатия инструментального ролика (БрХ1)  $P = 400\text{ Н}$ , ширина контактной поверхности инструмента 5 мм.

Испытания на теплостойкость образцов из стали 38Х2МЮА при последовательном их нагреве производили в муфельных печах. Нагрев образцов выполняли в лабораторных печах СНОЛ 1.6.2.5.1/9-И5 в интервале температур от 150 °С до 550 °С, через 50 °С и выдержкой при каждой температуре 10 минут с охлаждением на воздухе.

Ионно-плазменное азотирование проводится в разряженной азотосодержащей среде в тлеющем разряде, возбуждаемом на поверхности детали (катоде), а анодом служил контейнер установки. При этом ионы газа бомбардируют поверхность детали и нагревают ее до температуры насыщения. Процесс ИПА проводили в два этапа: очистка поверхности детали катодным распылителем в течение 1 часа при напряжении 500 В и давлении 1200 Па; азотирование при температуре 540°С, напряжении 1100 В, в течение 2 – 24 часов.

**В третьей главе** исследовано влияние ЭМПЗ на формирование структуры и, как следствие, на изменение свойств поверхностного слоя деталей. Установлено, что основное влияние на структуру поверхностного слоя стали 38Х2МЮА при ЭМПЗ оказывает температура в зоне контакта инструмент–поверхность. При ЭМПЗ технологический цикл «нагрев –выдержка – деформирование – охлаждение» осуществляются в локальной закрытой зоне термомеханического контакта инструмент–деталь за сотые доли секунды. Температура в зоне обработки достигает 1000...1800 °С и более. Охлаждение нагретого поверхностного слоя происходит в результате быстрого отвода тепла нижележащим слоям металла. Общее количество теплоты, выделенной в зоне контакта инструмент(ролик)–заготовка при ЭМПЗ, определяется по формуле.

$$Q_{\text{ЭМПЗ}} = \eta I_2 U_2 \tau, \quad (1)$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий потери электрического тока во вторичной цепи;  $I_2$  — сила тока во вторичной цепи, А;  $U_2$  — напряжение вторичной цепи, В;  $\tau$  — время обработки, с.



Количество теплоты  $Q_T$ , поглощаемое в высокотемпературной зоне поверхности детали и инструмента за время обработки  $\tau$ ,

$$Q_T = 0,24\eta I_2 U_2 \tau k_{дк}, \quad (2)$$

где  $k_{д}$  и  $k_{и}$  — коэффициенты, учитывающие отвод тепла в деталь и инструмент.

С другой стороны, исходя из уравнения теплового баланса:

$$Q_T = H\delta B\gamma C T_T, \quad (3)$$

где  $H\delta B\gamma = g$  — масса высоко температурного объема, кг ( $H$  — глубина зоны высоко температурного воздействия, м;  $\delta$  — глубина закалки, м;  $B$  — ширина высокотемпературной зоны, м;  $\gamma$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>);  $C$  — удельная теплоемкость металла, Дж/кг °С;  $T_T$  — температура фазовых превращений металла, °С

Приравняв выражения (2) и (3), получим формулу для определения глубины закалки  $\delta$  исходя из экспериментально подтвержденных электрических режимов обработки и свойств материала заготовки:

$$\delta = (0,24\eta I_2 U_2 \tau k_{дк}) / (H B \gamma C T_T). \quad (4)$$

ЭМПЗ подразделяется на технологии, требующие последующей механической обработки, и на способы, при которых поверхностная закалка является окончательной обработкой. Варьируя значениями  $I, V$ , скоростью вращения ролика/заготовки можно изменять значения  $\delta$  и получать закаленную зону требующей глубины.

**В четвертой главе проведено** математическое моделирование процессов комбинированной обработки. Конечно-элементное моделирование процесса ЭМПЗ состоит из двух последовательных анализов: переходного прочностного анализа (Transient Structural) и переходного теплового анализа (Transient Thermal). Анализ Transient Structural проводился при усилии поджатия инструмента  $P = 400$  Н для получения места контакта инструмента и заготовки с деформацией по стороне усилии поджатия и получению соответствующего пятна контакта. Общий вид зоны контакта инструмента и заготовки в программе ANSYS Workbench представлен на Рис 1.

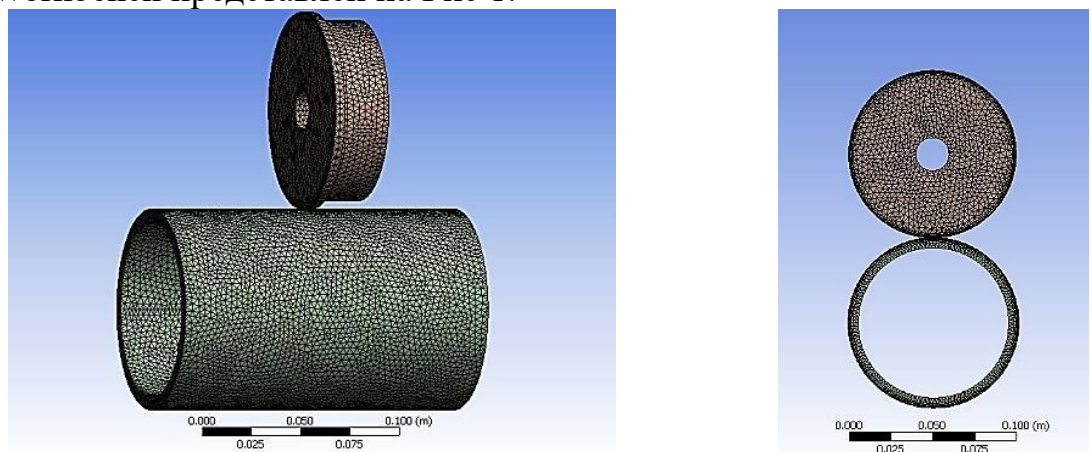


Рис. 1. Общий вид конечно-элементного разбиения зоны контакта при ЭМПЗ в программе ANSYS Workbench.

При анализе Transient Thermal использовали характеристики стали 38X2МЮА : плотность – 7710 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент температурного расширения –  $10^{-6}$  1/°С, изотропная теплопроводность – 48 Вт/м °С, удельная теплоемкость – 461 Дж/кг °С

Процесс ЭМПЗ сопровождается быстрым охлаждением поверхностей посредством конвекции в среде неподвижного воздуха. Принимаем коэффициент конвекции 10 Вт/ (м<sup>2</sup>·К) , температуру среды – 22°С.

В процессе термомеханического воздействия при ЭМПЗ температура в поверхностном слое стали превышает температуру фазовых превращений и даже температуру плавления стали 38X2МЮА (Рис. 2). Однако ввиду малого времени воздействия 0,04 с не происходит оплавления поверхности заготовки.

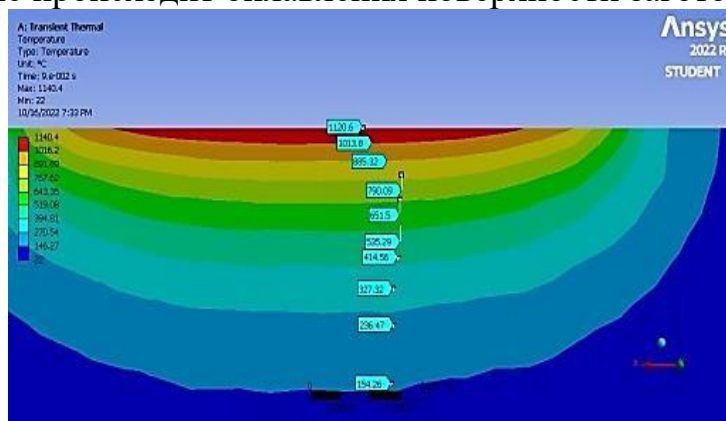


Рис. 2. Модель распределения температур на поверхности стали 38X2МЮА по глубине при ЭМПЗ

В упрочненной зоне формируется температурный градиент по глубине: температура снижается с максимальной температуры 1140 °С в центре пятна контакта инструмента с деталью вглубь упрочненной зоны (Рис. 2). В связи с этим в данной зоне формируется неоднородная градиентная структура.

Сходимость результатов моделирования и экспериментов подтверждается при сравнении распределения температур при воздействии единичной трека упрочненной зоны в результате моделирования в ANSYS на Рис. 3. с размерами упрочненной зоны, наблюдаемой на микрошлифах. Зоны закалки из твердого состояния и переходной зоны на микрошлифе соответствуют границам температур превращений на графике распределения температур, полученно в результате математического расчета.

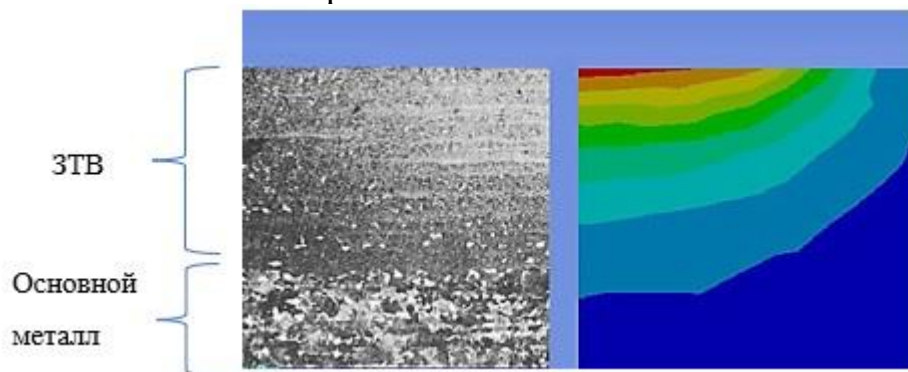


Рис. 3. Результаты моделирования и экспериментальные значения температуры и микроструктуры упрочненной зоны

При ЭМПЗ с бронзовым вращающимся роликом (БрХ1) следы пластической деформации практически отсутствуют. Глубина термического влияния в зависимости от плотности тока может достигать 1,5 мм. По глубине отчетливо виден упрочненный слой в виде мартенсита, троостита и феррита и более темная переходная зона. Микроструктура упрочненного слоя после ЭМПЗ представлена на рисунке 3, где упрочненная поверхность состоит из мартенсита и троосто-мартенсита.

Структура стали в поперечном сечении после ЭМПЗ состоит из зон термического влияния (ЗТВ) и основного металла (Рис. 3). Толщина слоя ЗТВ составили окло 1100 мкм.

Математическая модель теплового воздействия при ЭМПЗ образца построена для следующих режимах: скорость закалки  $v = 1,2, 1,6$  и  $1,9$  м/мин; сила тока во вторичной цепи  $I_2 = 1000 - 2000$  А; напряжение вторичной цепи  $U_2 = 3$  В. Результаты при разных силах тока и изменении частоты оборотов представлены на Рис. 4.

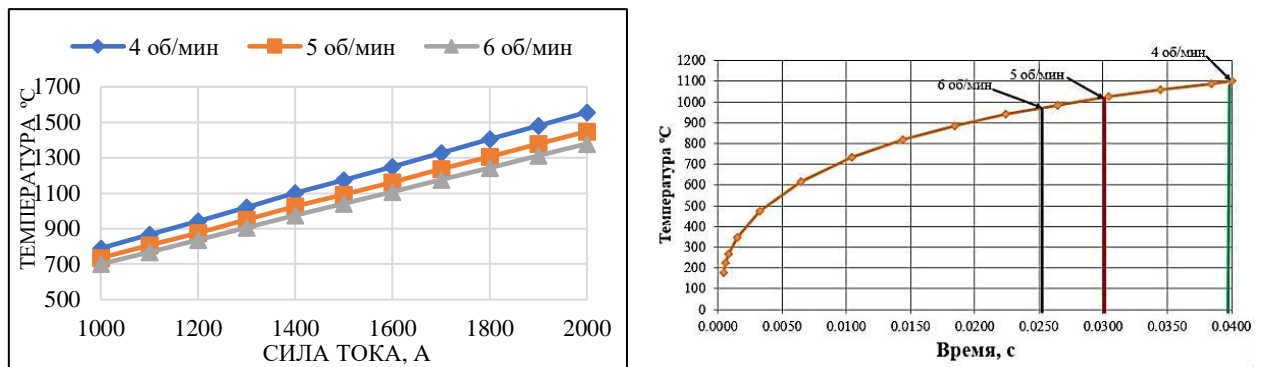


Рис. 4. Результаты расчета температуры в зоне контакта в зависимости от силы тока и числа оборотов образцов при ЭМПЗ

Распределение концентрации  $C_i(x,t)$  диффундирующего элемента по глубине  $x$  в момент времени  $t$  в каждом слое (фазе)  $i$  ( $i = \alpha, \gamma, \varepsilon$ ) в диффузионной зоне определяется из решения уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = D_i \left( \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2} \right), i = \alpha, \gamma, \varepsilon. \quad (5)$$

При выполнении условия сохранения масс (условие Стефана) на границах между слоями:

$$\frac{d\lambda_\varepsilon}{dt} = \frac{[J_\varepsilon - J_\gamma]_{\lambda_\varepsilon}}{C_{\min}^1 - C_{\max}^2} - v; \quad (6)$$

$$\lambda_\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{\Delta C_{12}} (\Delta C_1 D_\varepsilon - \Delta C_2 D_{\gamma'}) t}, \quad (7)$$

где  $\Delta C_{12}$  – изменение концентрации азота в  $\gamma + \varepsilon$  слое;  $\Delta C_1$  – изменение концентрации азота в  $\varepsilon$ - слое;  $\Delta C_2$  – изменение концентрации азота в  $\gamma$ - слое;  $D_\varepsilon$  – коэффициент диффузии в  $\varepsilon$ - слое;  $D_{\gamma'}$  – коэффициент диффузии в  $\gamma$ - слое;  $t$  – время выдержки,  $\lambda_\varepsilon$  – толщина  $\varepsilon$ -слоя,

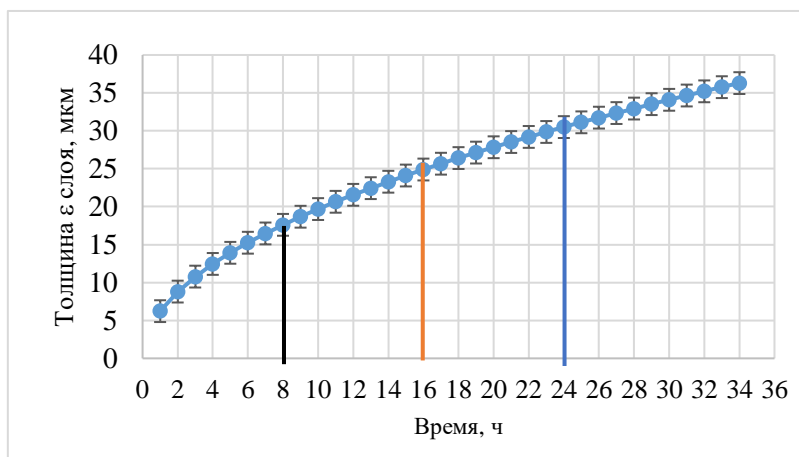


Рис. 5. Толщина  $\varepsilon$ -слоя в зависимости от времени при ИПА ( $T=540\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Результаты математической модели формирования глубины  $\varepsilon$ -слоя при ИПА приведены на Рис. 5.

В пятой главе исследовано влияние ЭМПЗ и ИПА на структуру и свойства стали 38Х2МЮА. ЭМПЗ приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя образцов до HV 756 на поверхности и постепенном снижении до 350 HV на глубине до 0,8 мм.

Металлографическими исследованиями структуры стали 38Х2МЮА после ЭМПЗ установлено наличие градиентного упрочненного слоя (Рис. 6). В поверхностном слое, при высоких скоростях охлаждения формируется структура, близкая к аморфной. На глубине 0,4 мм наблюдается мелкоигльчатый мартенсит. В переходной зоне формируется сорбитная структура, с постепенным переходом к исходной структуре стали 38Х2МЮА.

Исходная микротвердость в зоне основного металла составляет 350-370 HV. Следует отметить, что в данной работе электромеханическую поверхностную закалку проводили с целью, во первых, увеличения толщины упрочненного слоя, во вторых, для активации диффузии при последующем азотировании.

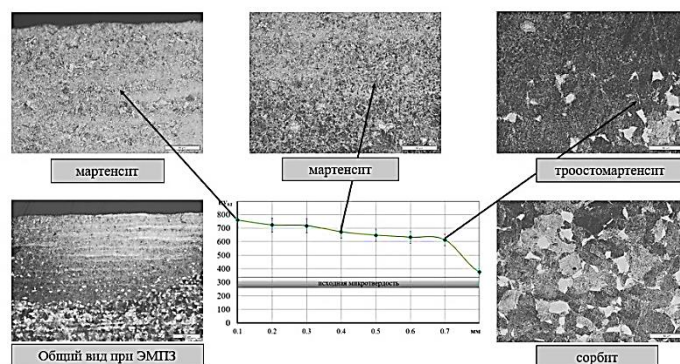


Рис.6. Распределение микротвёрдости стали 38Х2МЮА по глубине упрочнённого слоя после ЭМПЗ

Для установления влияния ЭМПЗ на скорость массопереноса азота исследовали образцы после азотирования в течение 2, 4, 6, 8, 16, 24ч при  $540^{\circ}\text{C}$ .

Анализ микроструктуры показывает, что при ЭМПЗ с перекрытием соседние треки накладываются друг на друга и образуют стойкую термически обработанную зону, что дает возможность получить равномерный по толщине азотированный слой в исследованных диапазонах времени насыщения (Рис 7).

Эффективные толщины слоев измеряли на кривых изменения микротвердости по толщине образцов после ЭМПЗ. После одновременного термического и деформационного воздействия при ЭМПЗ получили области с высокой микротвердостью около 760 HV и постепенным её уменьшением до микротвердости сердцевины 350 HV. Такие значения микротвердости на



поверхности является оптимальными и не приводят к отмежеванию высокотвердых зон при нагружении и не приводит к изменению исходной микрогеометрии обработанной поверхности.

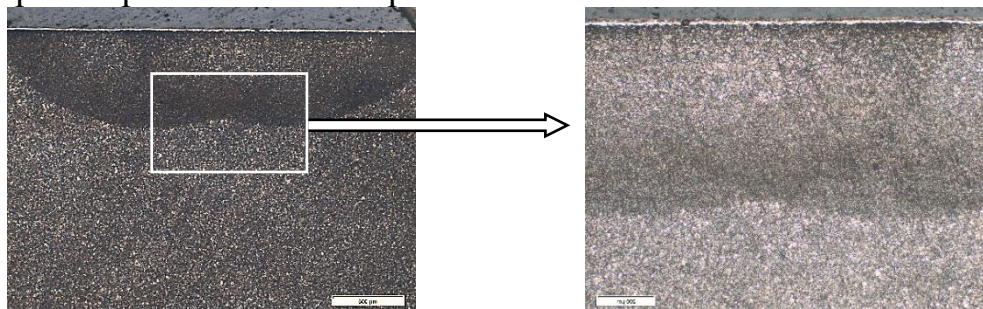


Рис. 7. Общий вид микроструктуры вдоль поверхностного слоя стали при перекрытии треков после ЭМПЗ и ИПА

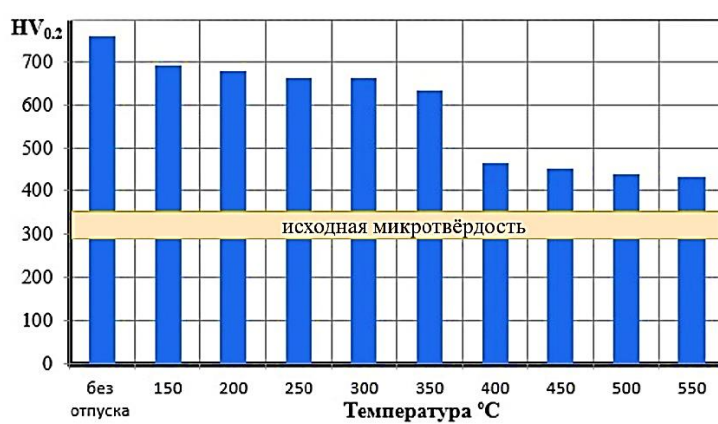


Рис.8. Изменение микротвёрдости при разных температурах

показал выравнивание значений микротвёрдости в диапазоне HV 680-630 на глубине до 0,4 мм от поверхности (Рис 8). Отличительной особенностью упрочненного ЭМПЗ поверхностного слоя стали 38Х2МЮА является незначительное снижение микротвёрдости до HV 460, вплоть до температуры нагрева 450°С. Последующая выдержка образцов при нагреве свыше 450 °С до 550 °С, не приводит к снижению микротвёрдости до исходного значения. Твердость поверхности при этом 756 HV, что более чем в два раза выше исходной HV 325.

Результаты изменения микротвердости образцов после комбинированной обработки (ЭМПЗ и ИПА) с выдержкой 2, 4, 6, часов приведены на Рис 9.

Установлено, что при выдержке 2 часа микротвердость

Поскольку ИПА производится при температуре 550 °С проведены испытания на теплостойкость образцов из стали 38Х2МЮА, упрочненных ЭМПЗ. Нагрев образцов выполняли в печи СНОЛ 1.6.2.5.1/9-И5 в интервале температур от 150 до 550 °С, с шагом 50 °С и выдержкой при каждой температуре 10 минут с охлаждением на воздухе.

Нагрев образцов в интервале температур 150-350°С

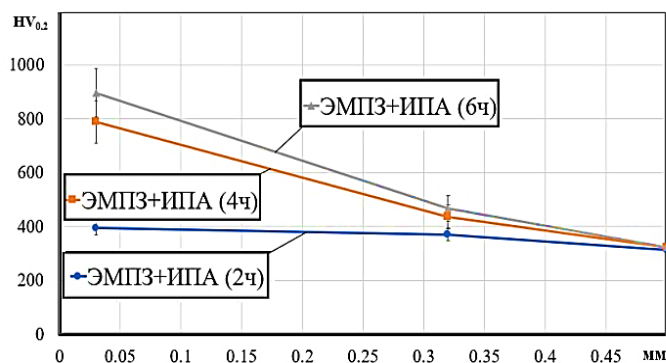


Рис. 9. Распределение микротвёрдости при разных температурах нагрева по глубине и времени посыщения после ЭМПЗ и ИПА

образцов практически не изменяется. При ИПА 4 часа микротвердость увеличивается до HV 789, а при 6 часах – до 900 HV.

Результаты влияния ЭМПЗ, ИПА и комбинированной обработки стали 38Х2МЮА представлены на Рис. 10.

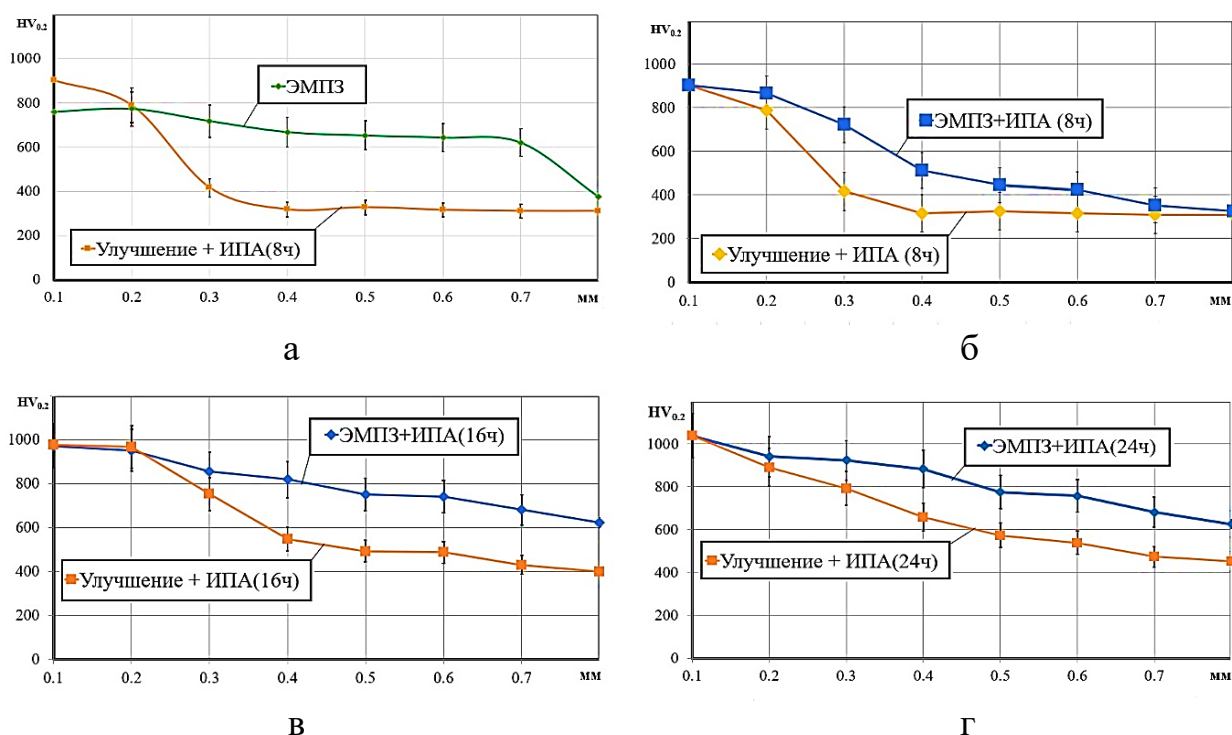


Рис. 10. Зависимость микротвердости поверхностного слоя по глубины упрочнения после ЭМПЗ и ИПА с выдержкой 8 (а, б), 16 (в) и 24 (г) часа

После комбинированной обработки ЭМПЗ и ИПА (16 и 24 часа) глубина азотированного слоя составляет более 0,7 мм и характеризуется микротвердостью 965-1080 HV. При этом плавное изменение микротвердости зоны термического влияния до исходного уровня в 365 HV связано с постепенным переходом указанных структур в структуру сердцевины. Комбинированная обработка сопровождается упрочнением градиентного поверхностного слоя стальных образцов на глубину до 0,2–0,7 мм с образованием бейнита, отличающегося повышенной микротвердостью.

После ИПА наблюдается большее повышение микротвердости, чем после ЭМПЗ, но мала глубина эффективной зоны. После ЭМПЗ эффективная зона больше, чем после ионно-плазменного азотирования (Рис. 11).

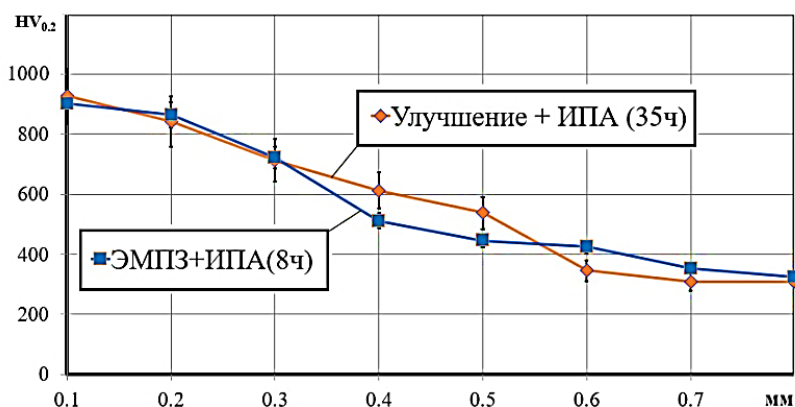


Рис. 11. Зависимость микротвердости от глубины упрочнения после ЭМПЗ и ИПА (8ч) и улучшения и ИПА (35ч)

Микроструктуры образцов из стали 38Х2МЮА после комбинированной обработки (ЭМПЗ и ИПА) при выдержке 8, 16 и 24 часа приведены на Рис. 12, 13 и 14. При ЭМПЗ и ИПА стали 38Х2МЮА образуются те же фазы ( $\epsilon$ ,  $\gamma'$  и  $\alpha$ ), как и после улучшения и ИПА но такого резкого разграничения между фазами не наблюдается. На поверхности расположен очень тонкий белый слой, состоящий из  $\epsilon$ -фазы. Затем следует серый слой, представляющий собой смесь  $\epsilon + \gamma' + \alpha$ -фаз.

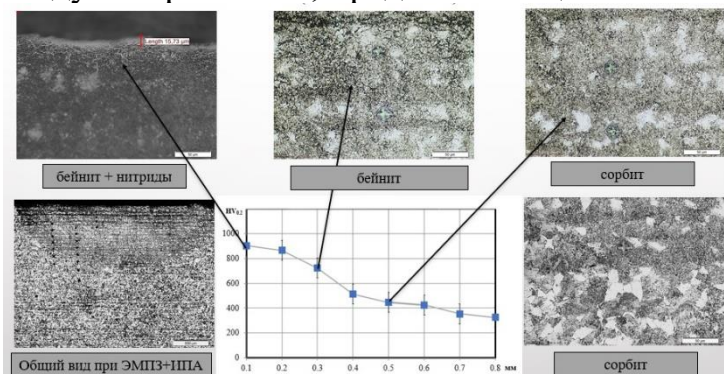


Рис. 12. Микроструктура после комбинированной обработки (ЭМПЗ+ИПА)8ч

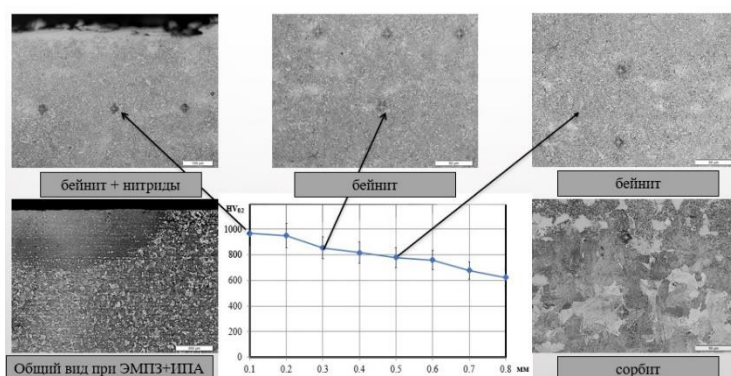


Рис. 13. Микроструктура после комбинированной обработки (ЭМПЗ+ИПА)16ч

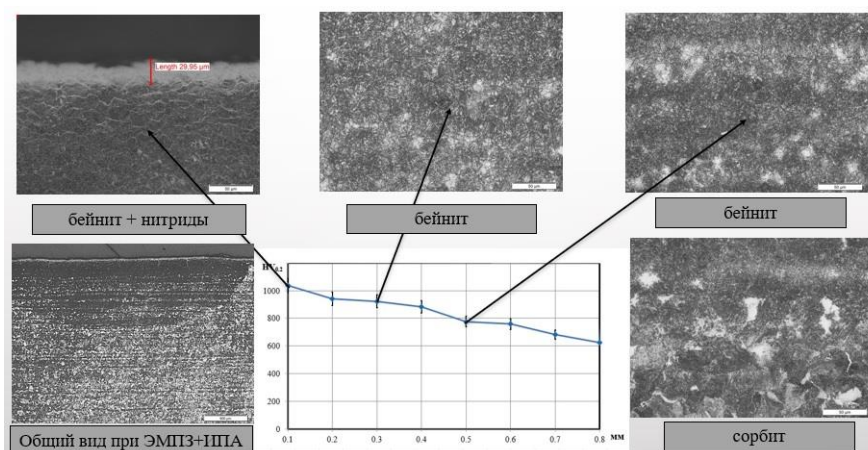


Рис. 14. Микроструктура после комбинированной обработки (ЭМПЗ+ИПА)24ч

Далее располагается  $\alpha$ -фаза. Основная (серая) часть азотированного слоя имеет сорбитообразное строение и отличается от сорбита сердцевины тем, что травится более сильно, вследствие высокого содержания азота.

Упрочненный слой на поверхности после комбинированной обработки (24ч) отличается большей толщиной белого слоя в структуре по сравнению с комбинированными обработкой (8ч и 16ч).



Глубина  $\varepsilon$  - слоя на поверхности повышается до 15, 21 и 30 мкм при времени ИПА 8, 16 и 24 часов соответственно. На глубине около 100 – 400 мкм выявляются нитриды, бейнит. На границе зоны с исходной структурой в основном наблюдается сорбит отпуска с плавным переходом к структуре исходного материала. На глубине свыше 500 – 600 мкм от поверхности образца наблюдается исходная структура закаленной стали.

Результаты трибологических испытаний образцов из стали 38Х2МЮА после ЭМПЗ и ИПА свидетельствуют о высокой эффективности разработанной технологии упрочнения. Интенсивность изнашивания образцов после ЭМПЗ и ИПА в начале испытаний составляет 0,15 г/секунд и после 240 секунд – 0,912 г/секунд. Интенсивность изнашивания образцов после улучшения и ИПА соответственно составляют 0,18 г/секунд и 1,36 г/секунд. Разница в значении износа при 8-и минутах испытаний составляет 0,006 грамм

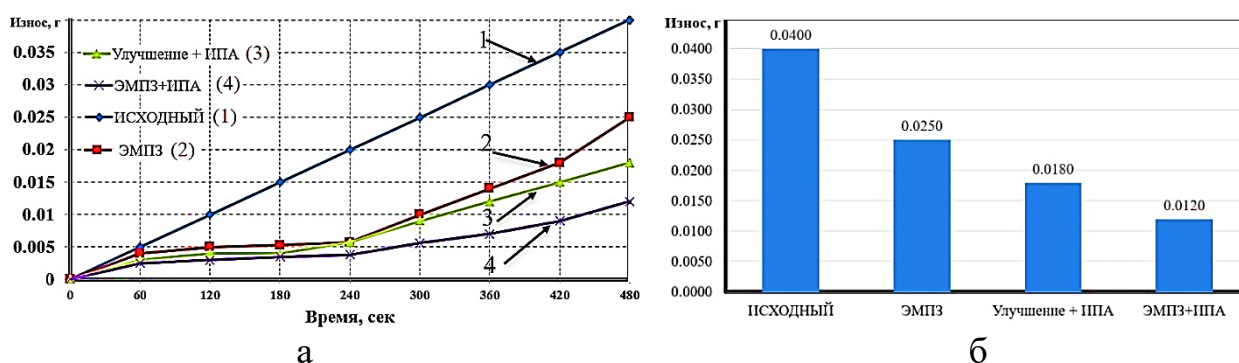


Рис. 15. Результаты трибологических испытаний: 1 – исходный образец; 2 – образец после ЭМПЗ; 3 – образец после улучшения и ИПА; 4 – образец после ЭМПЗ и ИПА (а) и суммарный износ за время 480 секунд (б)

Результаты исследований внедрены в ООО «Материалы Технологии Сервис», с технико-экономическим обоснованием упрочнения отверстия корпуса экструдера из стали 38Х2МЮА. Результаты расчета (Таблица 1) свидетельствуют, с одной стороны, об экономической целесообразности упрочнения отверстия корпуса ЭМПЗ, с учетом результатов износных испытаний (Рис. 15.) более эффективным следует признать разработанную комбинированную технологию ЭМПЗ и ИПА.

Таблица 1

Технологическая себестоимость упрочнения корпуса экструдера

Наименование Показателя	Сумма, руб.		
	Улучшение и ИПА (35 часов)	ЭМПЗ	ЭМПЗ и ИПА (8 часов)
Технологическая себестоимость	4253,81	528,34	1664,69

### Основные выводы по работе

1. Выполнен металлографический и рентгеноструктурный анализ структуры поверхностного слоя образцов из стали 38Х2МЮА в исходном состоянии, после улучшения и ИПА и после комбинированной обработки, включающей ЭМПЗ и ИПА.



2. Разработаны математические модели процесса обработки поверхностного слоя стали 38Х2МЮА с учетом выбранных режимов ЭМПЗ при различных деформационных нагрузках, с использованием программной среды ANSYS Workbench и расчёта толщины  $\varepsilon$  - слоя при ИПА. Приведены результаты моделирования технологии ЭМПЗ поверхностного слоя стали 38Х2МЮА, на основе режима упрочнения при следующих параметрах: скорости закалки – 1,2 м/мин; силе тока во вторичной цепи – 1400 А; напряжении вторичной цепи – 3 В; ширине электроконтактного воздействия – 5 мм; усилию прижатия инструментального ролика – 400 Н. Установлено, что при усилии поджатия инструмента 400 Н в месте контакта инструмента и заготовки деформация по стороне усилия поджатия  $h = 2,1738 \cdot 10^{-3}$  мм соответствует пятну контакта 5 x 0,8 мм.

3. Металлографическими исследованиями установлено, что комбинированная обработка ЭМПЗ и ИПА позволяет получить нитриды, и бейнитную структуру поверхностного слоя на глубине около 100 – 300 мкм и на глубине свыше 500 – 600 мкм от поверхности образца наблюдается характерная исходная структура. Полученные значения микротвердости исследуемых образцов позволяют сделать вывод о том, что модифицирование поверхности стали при комбинированной обработке приводит к повышению микротвердости и глубины азотирования, что способствует повышению работоспособности деталей из конструкционной стали 38Х2МЮА.

4. После ЭМПЗ с перекрытием при последующем азотировании формируются равномерные по поверхности диффузионные слои глубиной 0,3 мм, т.е. ЭМПЗ эффективно влияет на диффузионный массоперенос азота, что проявляется в ускорении азотонасыщения и увеличении глубины упрочненной зоны. Распределение микротвердости по толщине упрочненного после ЭМПЗ и ИПА градиентного слоя, имеет плавный характер. На глубину 0,8 мм за 8 часов по сравнению с тем, что при улучшении и ИПА получается за 35ч.

5. Результаты трибологических испытаний образцов из стали 38Х2МЮА после ЭМПЗ и ИПА свидетельствуют о высокой эффективности разработанной технологии упрочнения. Интенсивность изнашивания образцов после улучшения и ИПА соответственно составляют 0,18 г/секунд и 1,36 г/секунд. Интенсивность изнашивания образцов после ЭМПЗ и ИПА в начале испытаний составляет 0,15 г/секунд и после 240 секунд – 0,912 г/секунд.

6. Показано, что комбинированную обработку ЭМПЗ и ИПА целесообразно применять для упрочнения наружных и внутренних поверхностей деталей экструдеров, валов и шпинделей, втулок, плоских поверхностей, кулачков, деталей резьбовых соединений и зубчатых передач и других изделий работающих при температуре до 450°C. Технологическая себестоимость упрочнения корпуса экструдера составила: для улучшения и ИПА – 4253,81 рублей; для разработанной комбинированной технологии ЭМПЗ и ИПА – 1664,69 рублей на 100 шт изделий.

### Основные публикации по теме диссертации

1. Исследование структуры среднеуглеродистых сталей после электромеханической обработки / Мьят Со Лвин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. № 10 (190). С. 473-477. (0.25 п.л / 0.10 п.л)
2. Сравнительные испытания структуры и свойств поверхностного слоя стали 38Х2МЮА после ионно-плазменного азотирования и электромеханической поверхностной закалки Мьят Со Лвин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. № 3. С. 133-138. (0.31 п.л / 0.16 п.л)
3. Исследование структуры и свойств поверхностного слоя стали 20ХН3А после комбинированной обработки / Мьят Со Лвин [и др.] // Технология машиностроения и материаловедение. 2019. № 3. С. 60-62. (0.13 п.л / 0.07 п.л)
4. Increasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated energy flows / Myat Soe Lwin [ и др.] // Materials Today: Proceedings. 2020. ISSN 2214-7853. Volume 30, Part 3. P. 388-392. (0.31 п.л / 0.16 п.л)
5. Способ азотирования заготовок из сталей / Мьят Со Лвин [и др.] / Патент на изобретение № 2801624 // опубл 11.08.2023 г. (0,38 п.л / 0,22 п.л)
6. Развитие методов азотирования и преимущества плазменного азотирования / Мьят Со Лвин // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии" М.: 27-30 ноября 2018 г. ООО «Буки Веди». С.734-738. (0.25 п.л / 0.13 п.л)
7. Выбор способа упрочнения мелко модульных зубчатых колес авиадвигателей / Мьят Со Лвин [и др.] // XII конференция молодых специалистов по перспективам развития металлургических технологий. М.: 2023. С 78-81. (0.25 п.л / 0.13 п.л)
8. Результаты исследования микротвердости и износостойкости азотируемой стали 38Х2МЮА / Мьят Со Лвин [и др.] // I международная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции». Пермь, 2023. С 91-95 (0.25 п.л / 0.13 п.л)