

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
(НИТУ МИСИС)

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТРОИЦКИЙ ИНСТИТУТ ИННОВАЦИОННЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
(АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

КУТУКОВ Антон Константинович

**УПРОЧНЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ ПОТОКОМ
ПЛАЗМЫ И ЛАЗЕРНЫМ НАКЛЕПОМ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

2.6.17 – Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

доктор физико-математических наук
Савченко Александр Григорьевич

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ

доктор физико-математических наук
Христофоров Олег Борисович

Москва – 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В процессе эксплуатации более половины промышленных изделий выходят из строя по причине износа, образования трещин или разрушения тонкого поверхностного слоя. Сердцевина материалов при этом остается неповрежденной. В этой связи важной технологической задачей является повышение эксплуатационных свойств поверхности материалов. Основными параметрами, ответственными за эксплуатационные свойства поверхности промышленных изделий, являются износостойкость, усталостная прочность и коррозионная стойкость. Поэтому поиск эффективных методов поверхностной обработки конструкционных материалов, обеспечивающих одновременное улучшение указанных свойств, относится к числу **актуальных** и еще **не решенных** задач материаловедения.

Для улучшения таких характеристик металлических материалов, как твердость, прочность и износостойкость используют методы закалки. Для сталей известно, что значительное повышение твердости достигается при протекании мартенситного превращения, причем интенсивность процесса прямо зависит от скорости охлаждения. Однако во время закалки при сверхбыстром охлаждении в материале образуются высокие внутренние остаточные напряжения, которые приводят к короблению и образованию трещин в материале, что сильно снижает усталостную прочность изделий. При применении традиционных методов термической обработки объемных материалов снижение внутренних напряжений достигается посредством отпуска, но его побочным и нежелательным эффектом является уменьшение твердости, прочности и износостойкости, вследствие распада пересыщенных твердых растворов мартенсита и аустенита. В России наиболее распространёнными методами финишной обработки изделий, позволяющими уменьшить внутренние растягивающие напряжения, являются механические методы – дробеструйная обработка или прокатка шариками и роликами. При этом основным недостатком этих методов является нежелательное изменение в топографии поверхности и небольшая глубина, на которой достигаются нужные значения остаточных напряжений.

Таким образом, отсутствие универсального способа обработки поверхности определяет актуальность диссертационной работы, в которой в качестве новых перспективных подходов к увеличению износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости исследованы еще слабо изученные и мало апробированные в промышленности методы обработки поверхности импульсными потоками плазмы (ИПП) и лазерным наклепом (ЛН). Механизм обработки ИПП заключается в термическом воздействии на материал, в то время как ЛН оказывает на него механическое воздействие.

Диссертационная работа выполнялась в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» (РТТН)¹, куда вошел проект НИОКР на тему «Создание технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения», где основной целью является не только разработка технологии упрочнения конструкционных материалов, но и создание образцов новых технологических установок, которые в дальнейшем можно было бы легко адаптировать для решения конкретных производственных задач. Основные результаты работы получены в процессе проведения НИОКР, выполнявшихся в период с 2020 по 2024 гг. по государственным контрактам №№ Н.4ф.241.09.20.1095 от 16.06.2020; Н.4х.241.09.21.1112 от 29.04.2021; Н.4ф.241.09.22.1120 от 25.08.2022; № Н.4к.241.09.23.1058 от 17.04.2023.

Степень разработанности темы исследования. Перед началом работы было известно, что обработка ИПП увеличивает такие свойства поверхности материалов, как износостойкость, коррозионная стойкость, однако ухудшает пластичность и усталостную прочность, создавая в поверхностном слое материала нежелательные растягивающие напряжения, ведущие к

¹ Ганжур О. Правительство утвердило 14-ый национальный проект по развитию атомной науки и технологий [электронный ресурс] // Страна Росатом: [сайт]. – 2021. URL: <https://strana-rosatom.ru/2021/02/08/31102/> (дата обращения: 15.03.2024)

образованию микротрещин. При этом исследований, касающихся установления закономерностей и систематизации параметров обработки ИПП и ЛН конструкционных сталей, при которых достигается определенный комплекс физико-механических характеристик упрочненного слоя, в литературе обнаружено не было. Ранее также не проводились работы по определению температур нагрева во время обработки ИПП, при которых происходят определенные структурные изменения в поверхностном слое.

ЛН, наоборот, является методом, позволяющим создавать сжимающие остаточные напряжения, либо уменьшать уровень растягивающих напряжений в поверхностном слое металлов, тем самым увеличивая усталостную прочность. При этом считается, что ЛН незначительно увеличивает значения микротвердости по причине отсутствия термического нагрева поверхностного слоя во время обработки. Однако систематических исследований изменения твердости в модифицированном поверхностном слое в результате лазерного ударного воздействия в работах не было представлено.

Из вышесказанного следует, что методы обработки поверхности материалов ИПП и ЛН могут улучшать различные свойства материалов и быть взаимодополняющими, однако, помимо очевидных достоинств, обладают и определёнными недостатками, либо недостаточной изученностью, что определило **актуальность** проведения дальнейших исследований, направленных на оптимизацию этих технологий применительно к упрочнению промышленных изделий из конструкционных сталей.

Целью работы является установление закономерностей формирования структуры поверхностного модифицированного слоя, изменения значений микротвердости, характера остаточных напряжений и шероховатости поверхности образцов конструкционных сталей после их отдельной обработки ИПП и ЛН, а также оптимизация на этой основе режимов обработки конструкционных сталей ИПП и ЛН.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Обработка конструкционных сталей ИПП и ЛН в широком диапазоне режимов работы плазменных ускорителей и установки лазерного наклепа.
2. Исследование изменения структуры и фазовых превращений в поверхностном слое образцов конструкционных сталей после их обработки ИПП и ЛН методами дифрактометрии, электронной микроскопии, профилометрии и оптической металлографии.
3. Изучение изменения микротвердости, шероховатости и остаточных напряжений в поверхностном слое образцов конструкционных сталей после их обработки ИПП и ЛН.
4. Определение оптимальных режимов обработки конструкционных сталей ИПП, характеризующихся максимальным увеличением микротвердости поверхности с минимальным изменением шероховатости и оптимальной глубиной образования упрочнённого модифицированного слоя.
5. Определение оптимальных режимов обработки ЛН, характеризующихся минимальным изменением шероховатости поверхности материала при максимальном увеличении микротвердости и образовании сжимающих остаточных напряжений.

Научная новизна

1. Получены новые данные о закономерностях формирования и различии структуры, фазового состава и морфологии поверхностного модифицированного слоя низкоуглеродистых, углеродистых и высокоуглеродистых конструкционных сталей после обработки ИПП при тепловой нагрузке в диапазоне от 20 до 80 Дж/см², длительности плазменного воздействия от 25 мкс до 1 мс и использовании гелия или азота в качестве плазмообразующего газа.
2. Продемонстрирован эффект увеличения толщины модифицированного слоя конструкционных углеродистых и высокоуглеродистых сталей с 10 до 125 мкм за счет увеличения длительности плазменного воздействия от 25 мкс до 1 мс при обработке ИПП.
3. Для углеродистых и высокоуглеродистых конструкционных сталей найдены условия

увеличения микротвердости HV в 4,5 раза с уменьшением шероховатости поверхности до 35 % после обработки ИПП

4. Впервые показано, что обработка ИПП позволяет получать высокие значения сжимающих остаточных напряжений (ОН) в модифицированном поверхностном слое. Выявлена и реализована совокупность условий обработки ИПП, обеспечивающих, наряду с получением высоких сжимающих ОН, многократное повышение микротвердости HV и уменьшение шероховатости поверхности, что отвечает требованиям высокоэффективной технологии упрочнения изделий из конструкционных сталей.

5. Получены новые данные об изменении структуры, фазового состава и морфологии поверхностного слоя сталей марок ШХ15 и 40ХН2МА после обработки ЛН с плотностью мощности от 1 до 10 ГВт/см² и диаметром лазерного пятна 3-10 мм.

6. Исследована эволюция микротвердости, шероховатости и остаточных напряжений в результате обработки сталей марок ШХ15 и 40ХН2МА лазерным наклепом. Получены сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое и увеличенные значения микротвердости: в 1,8 раза - для стали ШХ15 и в 1,3 раза – для стали 40ХН2МА.

Практическая значимость

1. Получены модифицированные слои конструкционных сталей с максимальной толщиной 125 мкм и увеличенной в 4,5 раза микротвердостью.

2. Подобраны режимы обработки, при которых происходит закалка поверхностного слоя конструкционных сталей с одновременным уменьшением шероховатости поверхности. Это расширяет применимость метода упрочняющей обработки ИПП для изделий ответственного назначения, когда критически важным является соблюдение установленных норм по шероховатости поверхности.

3. Реализованный метод обработки ЛН позволяет получать сжимающие остаточные напряжения (ОН) или уменьшать значения остаточных напряжений в поверхностном слое сталей. Найден режим обработки ИПП, при котором в поверхностном слое также образуются сжимающие остаточные напряжения. Это существенно снижает риск образования и развития трещин в процессе эксплуатации, что увеличивает усталостную прочность материалов.

4. Созданы уникальные установки, адаптированные для обработки промышленных изделий методами ИПП и ЛН. Созданный плазменный ускоритель и установка лазерного наклепа позволяют проводить обработку изделий металлических материалов сложной геометрической формы.

5. Пробные эксперименты по упрочнению методом ИПП бурильных замков, выпускаемых АО «Газпром Бурение», показали высокую эффективность этого способа обработки. Результаты испытаний представлены в приложении А диссертации.

6. Совместно с компанией ООО «Новые инженерные технологии» проведены пробные эксперименты по упрочнению методами ИПП и ЛН пуансонов пресс-оснастки. Продемонстрировано повышение максимального срока эксплуатации пуансонов с 11 до 43 дней. Результаты испытаний представлены в приложении Б диссертации.

7. Пробные эксперименты по упрочнению методом ИПП стальных защитных чехлов для термопар, выпускаемых компанией АО «Овен», показали высокую эффективность обработки. Срок эксплуатации защитных термопарных чехлов увеличен с 11 до 18 дней. Результаты испытаний представлены в приложении В диссертации.

Положения, выносимые на защиту

1. Получены новые данные об эволюции микротвердости, шероховатости и остаточных напряжениях, а также о структурно-фазовом состоянии и морфологии поверхностных слоев конструкционных сталей модифицированных ИПП при плотности поглощенной энергии от 20 до 80 Дж/см², длительности плазменного воздействия от 25 мкс до 1 мс с плазмообразующими газами гелием и азотом.

2. При обработке ИПП увеличение длительности плазменного воздействия на поверхность низколегированных углеродистых и высокоуглеродистых сталей от 25 мкс до 1 мс

позволяет увеличить толщину модифицированного слоя от 10 до 125 мкм, что предпочтительно для упрочнения конструкционных материалов.

3. Найден режим обработки конструкционных сталей ИПП при тепловых нагрузках Q от 35 до 50 Дж/см², характеризующийся увеличением микротвердости HV до 4 раз, уменьшением шероховатости поверхности и получением высоких значений сжимающих остаточных напряжений. Реализованный режим обработки ИПП перспективен для создания высокоэффективной технологии упрочнения конструкционных материалов, обеспечивающей одновременное повышение износостойкости и усталостной прочности с толщиной модифицированного слоя до 50 мкм.

4. Обработка конструкционных сталей марок 40ХН2МА и ШХ15 методом ЛН с мощностью 1-10 ГВт/см² и длительностью импульса 17 нс позволяют увеличить сжимающие остаточные напряжения в их поверхностных слоях при одновременном уменьшении шероховатости и увеличении микротвердости (на 80 % – для стали ШХ15 и на 30 % – для стали 40ХН2МА). Увеличенные значения микротвердости зафиксированы на глубинах до 3 мм.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась использованием при проведении экспериментальных исследований современных, широко апробированных и оригинальных аттестованных методик, современного исследовательского оборудования, применением статистических методов обработки полученных данных, а также воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, получаемых разными методами.

Апробация работы

Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2022 (22 - 25 марта 2022 г., НИЯУ МИФИ, г. Москва); XVIII международная научная конференция «Физико-химические процессы в атомных системах» (6-7 декабря 2022 г., г. Москва); XXVI конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (26-27 января 2023 г., г. Москва), IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023 (28 - 31 марта 2023 г., НИЯУ МИФИ, г. Москва), L Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (20 – 24 марта 2023 г., г. Звенигород), X Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА» (28 июня – 1 июля 2023 г., г. Санкт-Петербург), X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2024 (26 - 29 марта 2024 г., НИЯУ МИФИ, г. Москва).

Публикации

По материалам работы опубликовано 15 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 10 докладов в сборниках трудов научных конференций.

Личный вклад автора

В работе представлены результаты исследований, выполненных в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» непосредственно автором работы или при его активном участии. Личный вклад автора в данную работу состоит в подготовке экспериментального оборудования, разработке концепции экспериментов, подборе оптимальных параметров, проведении экспериментов, интерпретации и обработке полученных результатов. Начиная с 2022 года автор работы является руководителем проекта по выполнению НИОКР по теме «Создание технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения», входящего в комплексную программу РГТН. В рамках НИОКР под руководством

автора была разработана и создана установка для обработки материалов ИПП².

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, 3-х приложений. Работа содержит 115 страниц, включая 5 таблиц, 67 рисунков, 8 формул. 139 источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, приведена её общая характеристика, сформулированы цель и основные задачи исследования, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературных данных. Описаны основные причины выхода из строя промышленных изделий, изготовленных из конструкционных низколегированных сталей во время их эксплуатации. Рассмотрены основные методы улучшения эксплуатационных характеристик изделий, широко используемые на сегодняшний день в промышленности, проанализированы их достоинства и недостатки. Приведены результаты исследований перспективных методов обработки конструкционных сталей, которые на сегодняшний день недостаточно широко внедрены в промышленность, но имеют большой потенциал занять свою технологическую нишу в будущем, в том числе радиационно-пучковых технологий упрочнения материалов. Проанализирован накопленный опыт по обработке материалов ИПП и ЛН, представлены имеющиеся результаты измерения характеристик поверхностного слоя, модифицированного обработкой ИПП и ЛН. Сделан вывод о целесообразности продолжения работ по изучению и оптимизации методов обработки ИПП и ЛН, совместному использованию этих двух методов, а также совершенствованию материально-инструментальной базы, предназначенной для использования этих методов в промышленности.

Во второй главе обоснован выбор и указаны характеристики выбранных для исследования конструкционных сталей, кратко описано устройство и даны основные характеристики экспериментальных установок для обработки ИПП и ЛН, дано описание методик исследования сталей до и после обработки.

При обработке ИПП в качестве материалов для исследования характеристик модифицированного слоя были выбраны 11 марок низколегированных конструкционных сталей (таблица 1). Стали двух марок ШХ15 и 40ХН2МА были выбраны для исследования при обработке ЛН.

Таблица 1 – Марки конструкционных сталей, выбранные для исследования методов упрочнения импульсным потоком плазмы и лазерным наклепом

Низкоуглеродистые	Среднеуглеродистые	Высокоуглеродистые
Ст3	Ст45	-
20Х	40Х	65Г
18Х2Н4МА	40ХН2МА	60С2ХА
12ХН3А	50ХН	ШХ15

Выбор объектов исследования определяется тем, что на сегодняшний день до 75 % всех используемых марок конструкционных сталей составляют относительно дешевые низколегированные стали.

Установка для обработки указанных материалов ИПП представляет собой квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель (КСПУ) с собственным магнитным

² Установка для обработки изделий сложной геометрической формы импульсными плазменными потоками / А.К. Кутуков, С.Е. Панин, В.Л. Подковыров и др. // Инженерная физика. – 2023. – № 10. – С. 47-58.

полем, который формирует аксиальные импульсные потоки плазмы (рисунок 1). КСПУ содержит систему из двух коаксиальных электродов, на которые подается высокое напряжение. После импульсного напуска газа через электромагнитный клапан в межэлектродный зазор происходит его ионизация. Ускорение образованной плазмы до скоростей ~ 50 км/сек происходит за счет силы Ампера, представляющей собой произведение радиальной компоненты тока разряда на собственное азимутальное магнитное поле, порожденное протеканием тока по внутреннему электроду.

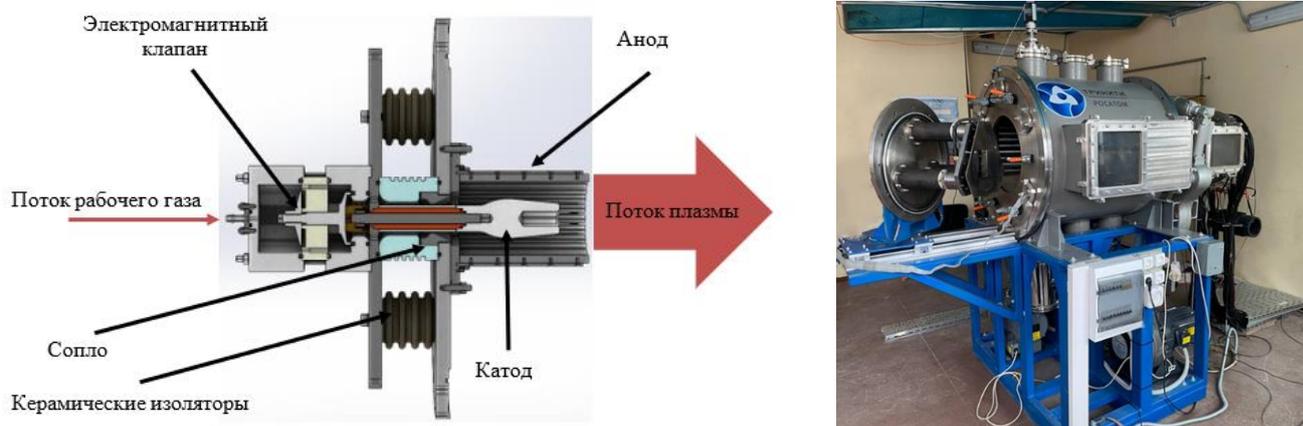


Рисунок 1 – Схема квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ) и внешний вид разработанной установки

Установка, оснащенная автоматизированными системами управления и позиционирования обрабатываемых изделий, отличается компактностью, удобством в размещении и смене изделий. Разработанная система энергопитания и управления позволяет производить регулирование таких ключевых параметров процесса обработки, как длительность (от 0,2 до 1 мс) и величина теплового воздействия (от 20 до 80 Дж/см²). Следует отметить, что формирование разряда с длительностью более 1 мс оказавшееся наиболее эффективным для целей обработки ИПП, ранее не достигалось ни на одном из аналогичных плазменных ускорителей. Характеристики разработанной установки позволяют производить обработку изделий сложной геометрической формы в широком диапазоне режимов.

Обработка ЛН сталей ШХ15 и 40ХН2МА производилась с использованием импульсной твердотельной лазерной системы с двухкаскадным усилителем с активными элементами 45×340 мм из фосфатного стекла с неодимом (рисунок 2). Лазерная система выполнена по четырехпроходной схеме с обращением волнового фронта и оснащена средствами диагностики параметров лазерного излучения. Длительность лазерного импульса составляла 17 нс по полувысоте импульса. Диаметр зоны обработки за один импульс – до 10 мм. Плотность мощности излучения q в зоне обработки варьировалась от 1 до 10 ГВт/см².

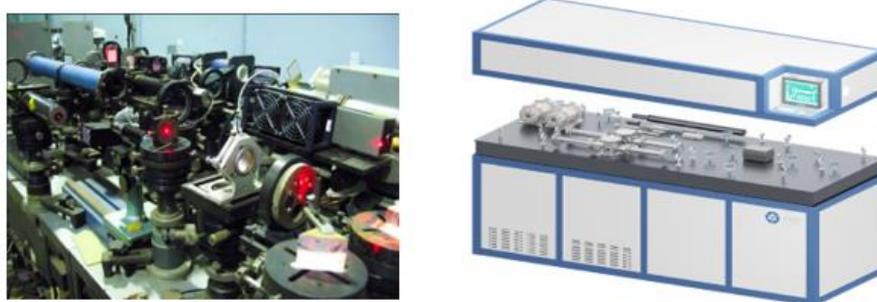


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд лазерного наклепа и облик ключевых элементов разрабатываемого макетного образца установки для лазерного наклепа

Процесс обработки ЛН проиллюстрирован на рисунке 3. Обрабатываемая поверхность изделия покрывалась поглощающим слоем с низкой температурой испарения. Поверх этого слоя поступает широкая прозрачная струя воды толщиной 2–3 мм. Энергия лазерного импульса поглощается непрозрачным слоем, что приводит к формированию абляционной плазмы, которая ограничена с одной стороны поверхностью изделия, а с другой – слоем воды.

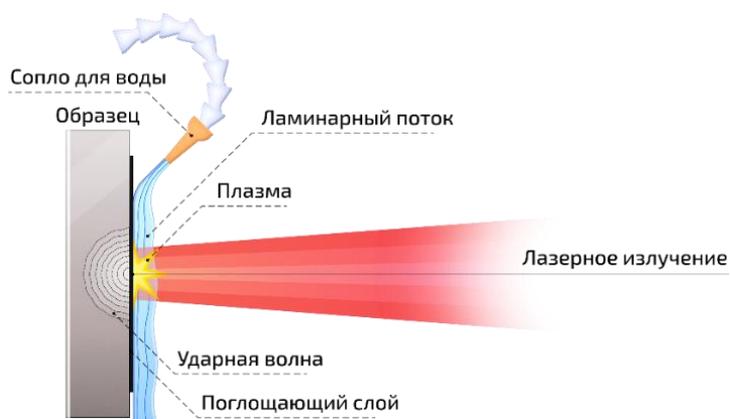


Рисунок 3 – Схема упрочнения лазерным наклепом

Измерение шероховатости поверхности образцов материалов до и после обработки ИПП и ЛН проводили методом оптической профилометрии на конфокальном микроскопе LEXT OLS5000. Измерение микротвердости с поверхности и по глубине модифицированного слоя проводили методом Виккерса на твердомере типа КВ 50 SR с нагрузкой индентора 50 г в течение 7 секунд.

Исследование топографии поверхности, оценку структуры, размера зерен и толщины модифицированного слоя проводили методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Для проведения СЭМ использовали микроскоп Tescan Vega 3. Элементный состав определяли методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (EDX). В качестве EDX-анализатора использовали AZtecLive Automated Ultim Max 100.

Количественный и качественный анализ микроструктуры образцов материалов проводили методами оптической микроскопии на прямом автоматизированном оптическом микроскопе Leica DM 6M с ПО «АХАЛИТ» для количественного анализа изображения. Травление и выявление микроструктуры конструкционных сталей проводили с использованием 4 % раствора азотной кислоты в этиловом спирте. Для выявления структуры закаленной области сталей использовали раствор хромовой и соляной кислот.

Приготовление образцов и резку конструкционных сталей проводили с помощью отрезного круга из оксида алюминия (Al_2O_3) в бакелитовой связке. На программируемом автоматическом шлифовально-полировальном станке LS3 проводили шлифовку образцов с использованием дисков из карбида кремния и полирование их поверхности с использованием тонкоизмельченной алмазной пасты.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре ДРОН-8 с использованием $Co-K\alpha$ излучения (с Fe-фильтром). На дифрактометре применялась рентгенооптическая схема Брэгга-Брентано. Достоинством метода является высокая точность получаемых значений, особенно для наиболее интенсивных линий. На основании полученных рентгенограмм для образцов были измерены остаточные напряжения. В качестве оценки использовался метод $\sin^2\Psi$, который основан на измерении деформаций по положению дифракционного пика.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и свойств поверхностных слоёв исследуемых конструкционных сталей, формируемых в результате обработки ИПП, включая такие характеристики модифицированного слоя, как его толщина, микротвердость, шероховатость и остаточные напряжения.

Установлено, что максимальный эффект улучшения физико-механических свойств модифицированного поверхностного слоя достигается при определенных значениях совокупности ключевых параметров обработки ИПП, к которым относятся плотность поглощенной энергии или тепловая нагрузка Q , вид плазмообразующего газа, количество импульсов при обработке (N), длительность плазменного воздействия на материал и расстояние от обрабатываемого образца до электродов ускорителя.

Тепловую нагрузку и ее распределение по площади воздействия определяли с помощью специально разработанного многоэлементного 2D-калориметра с автоматизированной системой регистрации и обработки измерений.

На рисунке 4 представлены результаты измерения тепловой нагрузки на обрабатываемую поверхность в зависимости от энергии разряда и от длительности импульса плазменного воздействия для рабочих газов гелий и азот.

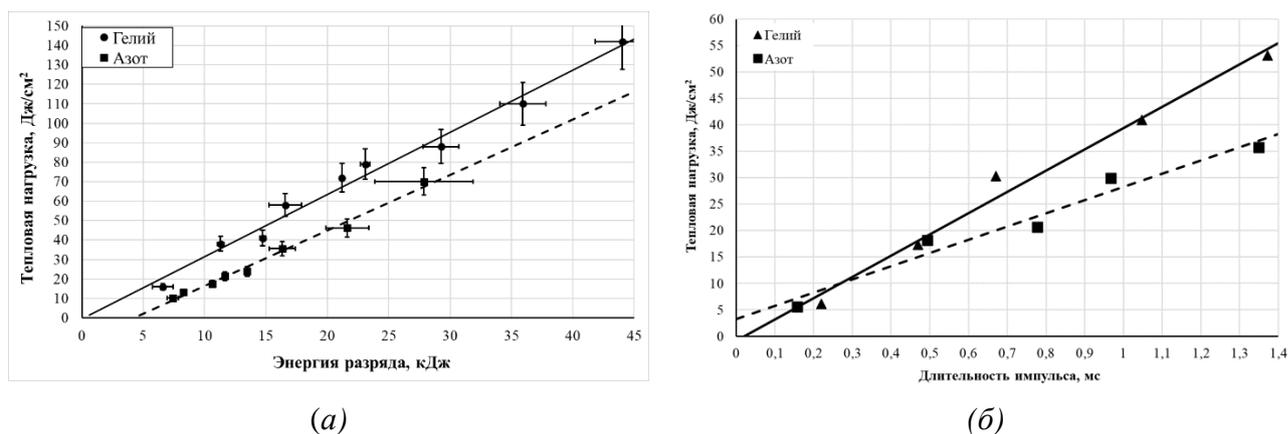


Рисунок 4 – Зависимость тепловой нагрузки от энергии разряда (а) и длительности импульса плазменного воздействия (б)

Тепловая нагрузка, длительность теплового воздействия на поверхность и количество «термических воздействий» (в нашем случае импульсов плазменного ускорителя) играют большую роль при любой обработке материалов. Указанные параметры влияют на топографию поверхности, толщину модифицированного слоя и результирующие физико-химические свойства модифицируемого слоя. При обработке образцов конструкционных сталей длительность плазменного воздействия τ на ускорителе КСПУ варьировали в диапазоне от 0,1 до 1 мс. Ряд результатов был получен с использованием импульсного плазменного ускорителя МКТ³ в диапазоне длительности воздействия от 10 до 25 мкс. Исследование свойств было проведено для количества импульсов от 1 до 20. Тепловая нагрузка варьировалась от 20 до 80 Дж/см². Между импульсами образец остывал до комнатной температуры. Для исследуемых сталей выбранный диапазон по нагреву поверхностного слоя простирается от 550 °С до температур выше плавления, что дает возможность исследовать весь спектр возможных структурных превращений в поверхностном слое. Верификация данных по оценке величины теплового воздействия проведена посредством моделирования в программной среде «Ansys» с учётом результатов возможных фазовых превращений в материалах.

Выбор в качестве плазмообразующего газа гелия обусловлен его инертностью, – при его использовании исключается возможность образования нежелательных химических связей. Азот же является наиболее широко используемым в промышленности газом, и применяется при различных способах химической или химико-термической обработки материалов, которые заключаются в насыщении атомами газа поверхностных слоев материала (азотирование).

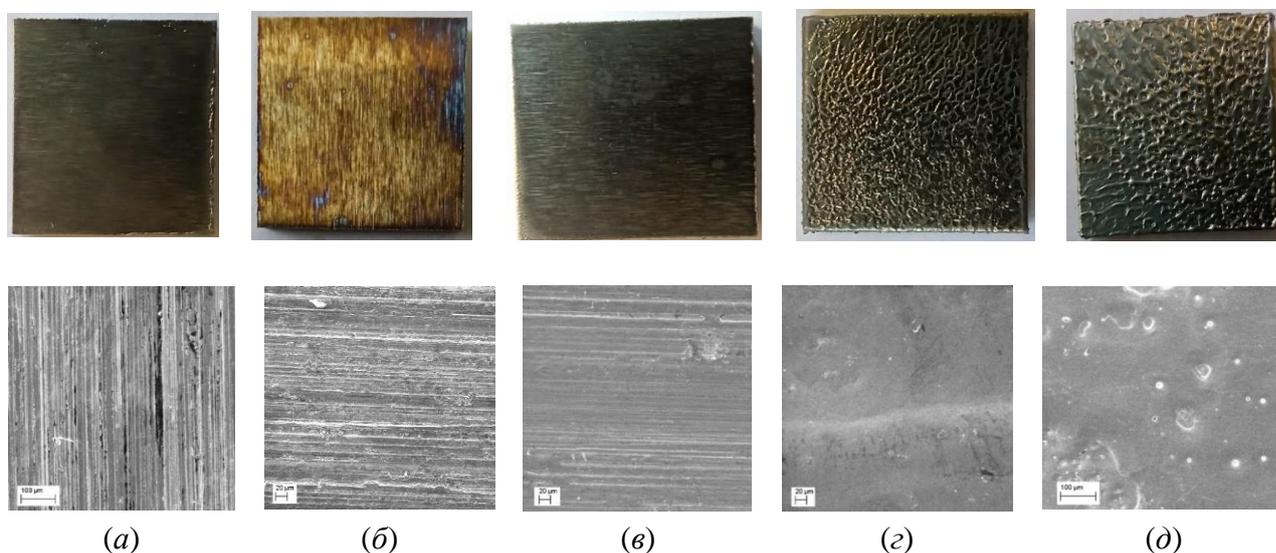
³Effect of Pulsed Plasma Flow Treatment Parameters on the Thickness, Microhardness, and Elemental and Phase Compositions of Modified Surface Layers of Structural Steel / A. K. Kutukov, I. M. Poznyak, S. E. Panin et. al. // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – V. 95. – №. 10. – С. 1-6.

Для обработки при максимальной длительности импульса 1 мс было выделено три диапазона тепловой нагрузки Q , приводящих к различным картинам модификации поверхностного слоя (таблица 2). Данная классификация оказалась справедлива для всех 11 исследуемых марок сталей по причине близких значений их теплофизических характеристик.

Таблица 2 – Диапазоны обработки ИПП по тепловой нагрузке с различным типом модификации поверхности конструкционных сталей при длительности импульса 1 мс

Диапазон	Тепловая нагрузка	Температура нагрева	Характеристика поверхности
№ 1	$< 35 \text{ Дж/см}^2$	$< 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	Без видимой модификации
№ 2	$35\text{-}50 \text{ Дж/см}^2$	$1000\text{-}1500 \text{ }^\circ\text{C}$	Закалка из твердой фазы
№ 3	$> 50 \text{ Дж/см}^2$	$> 1500 \text{ }^\circ\text{C}$	Закалка из расплава

Рисунок 5 иллюстрирует изменение морфологии поверхности в результате различных режимов обработки ИПП.



(а) – исходный образец; (б) – $Q < 35 \text{ Дж/см}^2$; (в) – Q от 35 до 50 Дж/см²; (г) – Q от 50 до 70 Дж/см²; (д) – $Q > 70 \text{ Дж/см}^2$

Рисунок 5 – Фотографии (вверху) и микрофотографии (внизу) поверхности образцов стали ШХ15, обработанных ИПП при различных тепловых нагрузках Q

При обработке ИПП в диапазоне № 1 на поверхности сталей зафиксировано наличие оксидных пленок (видны цвета побежалости), других значительных изменений обнаружено не было (рисунок 5б).

При обработке в диапазоне № 2 цвета побежалости отсутствуют, однако наблюдается уменьшение следов механической обработки (рисунок 5в).

Обработка в диапазоне № 3 влияет на рельеф поверхности, делая его волнистым по причине растекания расплавленного материала и резкого застывания во время охлаждения (рисунок 5г, д).

Большое влияние на указанные изменения оказывает как температура нагрева поверхности, так и градиент температуры в зоне обработки. Чем больше градиент температур при охлаждении, тем более сильное концентрационное переохлаждение наблюдается в поверхностном слое, при котором ячеистая микроструктура поверхности (рисунок 6а) переходит в дендритную (рисунок 6б). Различий в микроструктуре при обработке с плазмообразующими газами гелий и азот не обнаружено. При этом для некоторых низкоуглеродистых марок сталей,

обработанных с использованием азотной плазмы, на поверхности наблюдались трещины (рисунок 6в), что предположительно объясняется присутствием больших растягивающих напряжений в поверхностном слое.

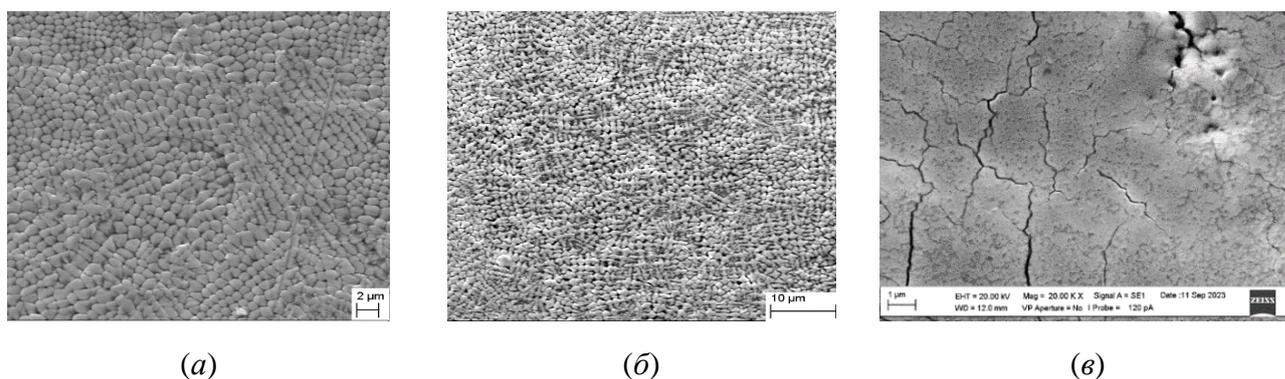


Рисунок 6 – СЭМ-изображения образцов стали Ст45, $Q = 55$ Дж/см² (а), 60С2ХА, $Q = 70$ Дж/см² (б) и 18Х2Н4МА $Q = 70$ Дж/см² (в)

Установлено, что использование гелиевой плазмы не влияет на элементный состав поверхностного слоя. После обработки образцов азотной плазмой, в ходе EDX-анализа обнаруживается присутствие азота. Выявлены закономерности изменения элементного состава при обработке азотной плазмой, зависящие от количества легирующих компонентов стали. Для сталей ШХ15, Ст3, Ст45, 65Г, 20Х, 40Х, и 60С2ХА концентрация азота растет от 3,5 до 7 % при увеличении тепловой нагрузки. Для сталей 40ХН2МА, 18Х2Н4МА, 12ХН3А и 50ХН концентрация азота растет с увеличением тепловой нагрузки вплоть до температуры плавления поверхности и резко уменьшается в режимах обработки выше границы плавления. Уменьшению количества азота способствуют легирующие добавки, снижающие растворимость азота в стали (Cr, Ni).

По результатам измерения шероховатости образцов сталей после обработки ИПП при различных тепловых нагрузках ($\tau = 1$ мс) был построен соответствующий график зависимости (рисунок 7). В диапазоне № 1-2 происходит сглаживание поверхности в интервале 10-35 % (зеленая прямая $R_{a1}/R_{a0}(Q_{1-2})$). Примечательно, что чем выше исходная шероховатость образца R_{a0} , тем большей степени сглаживание удастся достичь в результате обработки. Тем самым, наибольшее сглаживание наблюдалось для образцов с исходной шероховатостью 2,0 мкм. При обработке в режиме № 3 шероховатость после воздействия ИПП увеличивается в 2 и более раз по причине образования волн застывшего расплавленного слоя (красная кривая $R_{a1}/R_{a0}(Q_3)$).

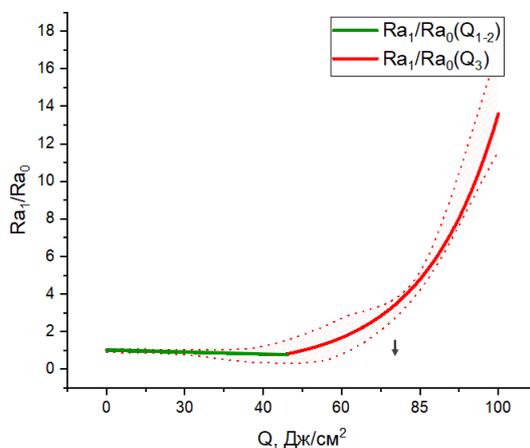
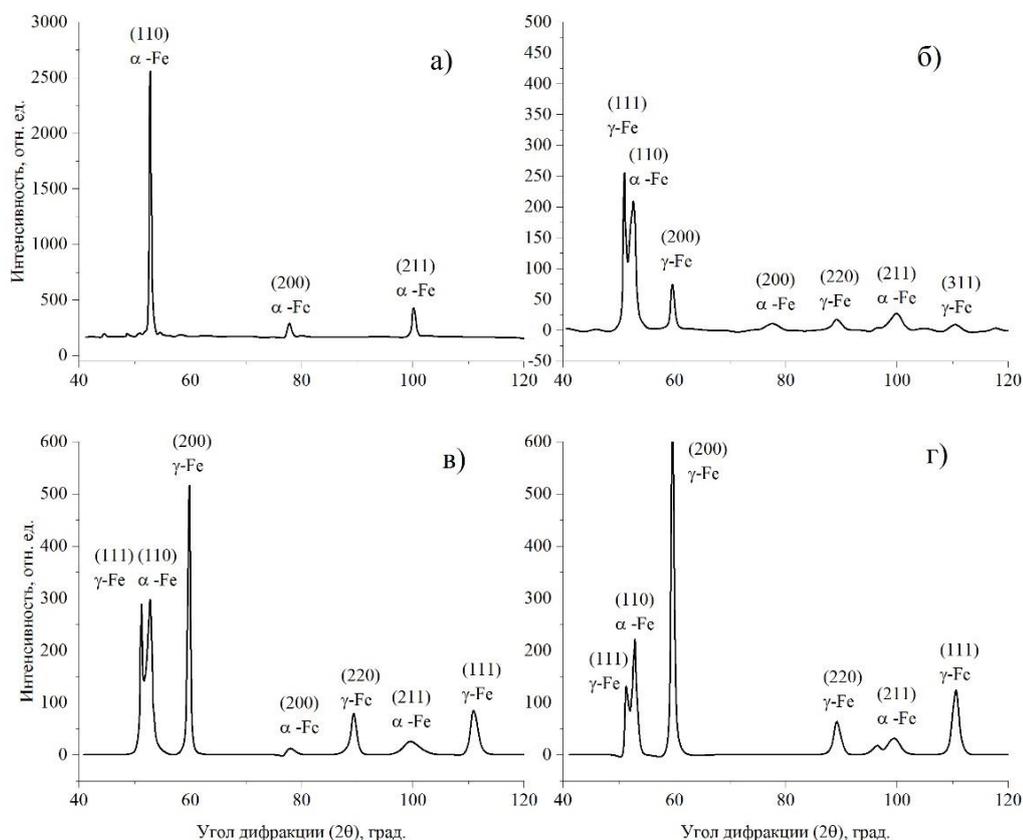


Рисунок 7 – Зависимость отношения результирующей шероховатости поверхности сталей к исходной R_{a1}/R_{a0} от тепловой нагрузки Q

С помощью РФА установлено, что обработка ИПП в диапазоне № 1 не изменяет фазовый состав поверхностного слоя, а увеличение интенсивности пиков дифракционных линий может указывать на протекание процессов поверхностного отжига (рисунок 8а).



(а) – $Q < 35$ Дж/см²; (б) – Q от 35 до 50 Дж/см²; (в) – Q от 50 до 70 Дж/см²; (г) – $Q > 70$ Дж/см²

Рисунок 8 – Дифрактограммы образцов стали ШХ15, обработанных потоком гелиевой плазмы при различных значениях Q

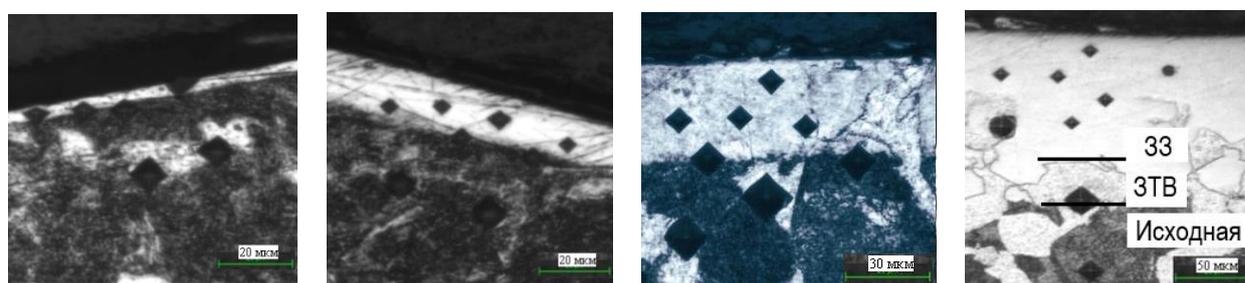
После обработки стали ШХ15 в диапазоне № 2 на соответствующей дифрактограмме отмечается появление новой фазы – γ -Fe (рисунок 8б), которая представляет собой остаточный аустенит. Пики ОЦК-фазы заметно уменьшились: увеличение дефектности, которое приводит к снижению интенсивности пиков, а также их относительное уширение свидетельствуют о возникновении фазы мартенсита.

После воздействия ИПП в диапазоне № 3 отмечается резкое возрастание интенсивности пика (200) γ -Fe (рисунок 8в, г). С увеличением тепловой нагрузки до 70 Дж/см² доля аустенита падает – мартенситное превращение протекает более полно (рисунок 8г). Предполагается, что полученные результаты свидетельствуют об ориентированном росте в поверхностных слоях, что согласуется с образованием столбчатых структур (рисунок 8а, б).

Известно, что чем толще модифицированный слой с нужными физико-механическими свойствами, тем больший эксплуатационный ресурс будет у материала. Исходя из этого, важным аспектом работы было исследование возможности увеличения толщины модифицированного слоя при обработке.

Для обработанных ИПП сталей характерно образование градиентно-слоистой структуры. Толщина модифицированного слоя и структурных составляющих прямо зависела от длительности импульса, что продемонстрировано на фотографиях торцевых срезов образцов (рисунок 9). Количество образующихся подслоев, как и толщина всего модифицированного слоя, также зависели от тепловой нагрузки и от легирующих добавок в сталях. В ходе исследования

обнаружено несколько структурных составляющих модифицированного слоя – зона закалки (ЗЗ), зона термического влияния (ЗТВ) и исходная структура (рисунок 9з). При обработке с превышением порога плавления ЗЗ зачастую представляла собой псевдоаморфный белый не травящийся слой (рисунок 9).



(а) (б) (в) (г)

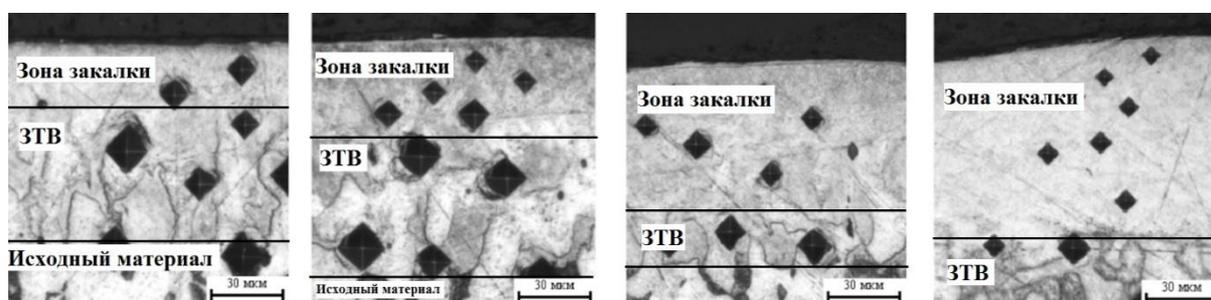
(а) – 0,15 мс; (б) – 0,2 мс; (в) – 0,6 мс; (г) – 1 мс

Рисунок 9 – Фотографии срезов образцов Ст45, обработанных ИПП с различной длительностью импульса при фиксированной расчетной температуре нагрева 1500 °С

Таким образом, пиковые значения толщины модифицированного слоя зафиксированы при предельной длительности импульса 1 мс. Для данной длительности детально рассмотрена зависимость толщины от тепловой нагрузки.

После обработки ИПП в режиме № 1, модифицированного слоя на торцевых шлифах не обнаруживается. При режиме № 2 появляется слой толщиной до 50 мкм. Структура слоя состоит из мартенсита и феррита, о чем свидетельствует уширение пика (110) и появление γ -Fe, установленное в ходе РФА (рисунок 8б). После обработки ИПП в режиме № 3 модифицированный слой может достигать толщины 125 мкм. При этом структура слоя зоны закалки представляет собой мартенсит, а зона термического влияния состоит из смеси феррита, мартенсита и структур отпуска.

Существенное влияние на толщину слоя закалки оказывает количество импульсов. На рисунке 10 представлены фотографии срезов стали 20Х с количеством импульсов в диапазоне от 1 до 20, на которых наблюдается увеличение толщины слоя закалки от 25 до 80 мкм. Таким образом, несмотря на охлаждение стали после импульса, каждый последующий импульс приводит к увеличению зоны термического воздействия. Это может быть связано с изменением в теплопроводности модифицированного слоя. Во многом конечная толщина модифицированного слоя определяется прокаливаемостью материала.



(а) (б) (в) (г)

(а) – 1 импульс; (б) – 3 импульса; (в) – 5 импульсов; (г) – 10 импульсов.

Рисунок 10 – Фотографии срезов образцов стали 20Х, обработанных плазмой при различном количестве импульсов с энергией падающего потока 50 Дж/см²

В ходе анализа измеренных значений микротвердости сталей, обработанных ИПП по различным режимам ($\tau = 1$ мс), установлено, что для сталей ШХ15 и 40ХН2МА зависимости $HV_{50}(Q)$ имеют экспоненциальный вид (рисунок 11). По мере увеличения Q микротвердость поверхностного слоя возрастает, причем предельные значения HV достигаются уже при 50-55 Дж/см². Выход значений на плато наблюдается в начале диапазона № 3, при котором нагрев превышает порог плавления сталей. Ограничение по степени упрочнения говорит о максимально возможной доле мартенсита в модифицированном слое при данном виде термообработки.

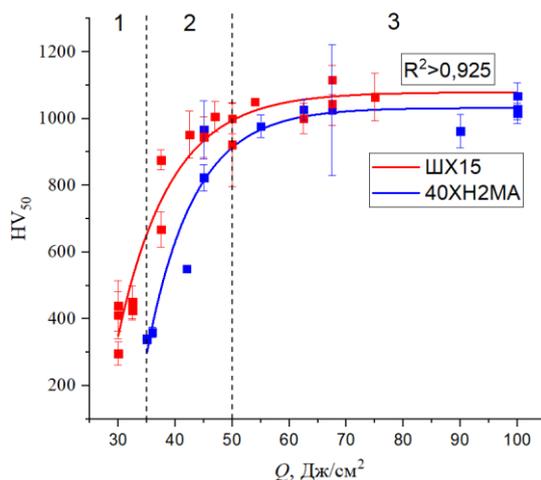


Рисунок 11 – Зависимость микротвердости поверхности сталей ШХ15 и 40ХН2МА после обработки ИПП от тепловой нагрузки

Для всех марок сталей характерно снижение микротвердости по глубине модифицированного слоя. Для примера, на рисунке 12 представлены результаты распределения микротвердости по глубине для стали 40ХН2МА. Распределение микротвердости по глубине определялось толщиной структурных составляющих модифицированного слоя (рисунок 9), которая, в свою очередь, зависела от тепловой нагрузки. Стоит обратить внимание, что значения микротвердости, измеренные с поверхности, наибольшие, что может объясняться образованием тонкого псевдоаморфного слоя при обработке ИПП в диапазоне режимов № 3.

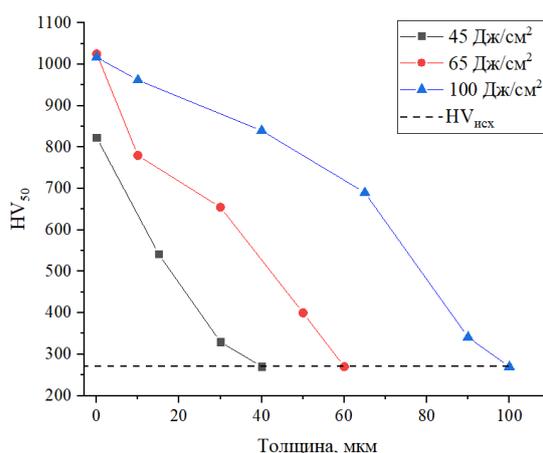


Рисунок 12 – Распределение микротвердости по глубине для стали 40ХН2МА, в зависимости от режима обработки ИПП

На рисунке 13 представлена гистограмма с исходными и максимальными значениями микротвердости, которые удалось получить, подобрав режим обработки. Видно, что после обработки ИПП микротвердость поверхности значительно увеличивается. При этом пиковые

значения микротвердости для разных марок сталей, различны. Было установлено, что степень упрочнения определялась содержанием углерода в стали. Наименьший прирост в микротвердости отмечен для низкоуглеродистых сталей (1,5-2 раза). Для других групп сталей прирост находился в диапазоне от 3 до 4,8 раз. Хотя для низкоуглеродистых сталей закалка не так эффективна, тем не менее полученные результаты показывают, что метод обработки ИПП позволяет проводить более эффективную закалку низкоуглеродистых сталей, по сравнению с альтернативными способами обработки.

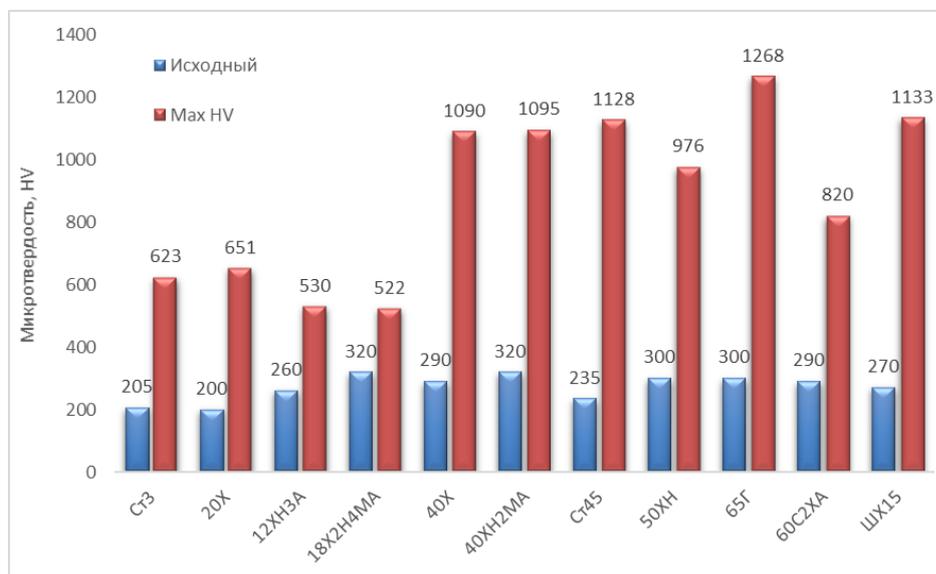


Рисунок 13 – Исходные и максимальные значения микротвердости для различных конструкционных сталей, полученные при оптимизированных режимах обработки

В результате анализа измеренных остаточных напряжений (ОН) было обнаружено, что при обработке в диапазонах № 1 и № 2 присутствуют исключительно сжимающие ОН (рисунок 14). При этом предполагается, что сжимающие ОН обусловлены фазовыми переходами при закалке. Превращение аустенита в мартенсит сопровождается объемным расширением, в то время как окружающий материал ограничивает расширение преобразованной фазы, что приводит к сжатию поверхностного слоя. Дополнительное сжатие по схожему механизму также возможно при превращении перлита в аустенит во время нагрева.

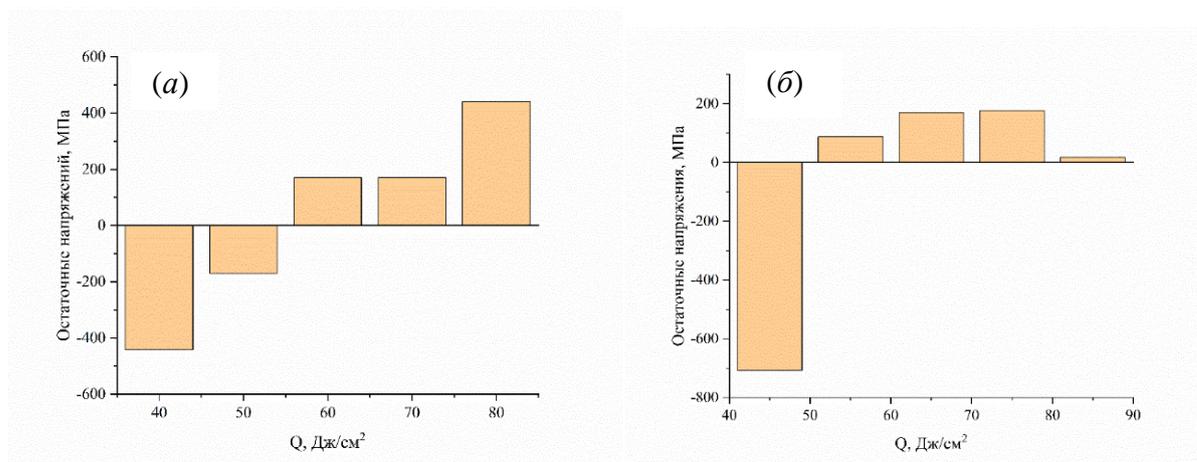


Рисунок 14 – Зависимость остаточных напряжений от тепловой нагрузки при обработке ИПП сталей марки ШХ15 (а) и 40ХН2МА (б)

Обработка ИПП в диапазоне № 3 переводит ОН в положительную область. Как было указано в ходе РФА (рисунок 8), при обработке с нагревом выше порога плавления происходит

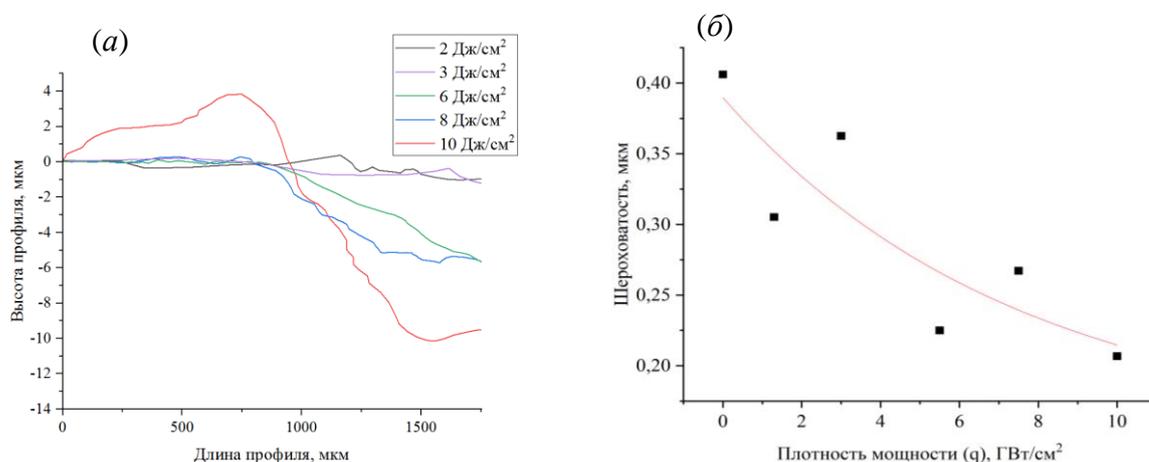
уменьшение доли аустенита, вместе с чем мартенситное превращение протекает более полно. Толщина закалочного слоя при этом растет, а нижние твердые слои также продолжают выступать препятствием к расширению поверхностного слоя. В этих условиях, сжимающие осевые напряжения трансформируются в растягивающие напряжения в зоне термического влияния. При этом предполагается, что термическая усадка расплава приводит к увеличению растягивающих ОН в анализируемой области, что превалирует над сжимающими фазовыми напряжениями при мартенситном превращении.

Таким образом, остаточные напряжения тесно связаны с изменением микроструктуры слоя закалки и зоны термического влияния. При обработке ИПП в диапазоне № 3 толщина модифицированного слоя максимальна, однако остаточные напряжения являются растягивающими, что может снижать усталостную прочность.

Обработка ИПП в диапазоне № 2, при умеренных тепловых нагрузках, позволяет получать модифицированные поверхностные слои, как с повышенной твердостью, так и со сжимающими ОН, что является предпосылкой повышения, как износо- и коррозионной стойкости, так и усталостной прочности.

В четвертой главе представлены результаты исследования структуры и свойств сталей ШХ15 и 40ХН2МА после их обработки методом лазерного наклепа (ЛН).

Исследование изображений, полученных с помощью электронного и оптического микроскопов, показало, что ЛН образцов сталей ШХ15 и 40ХН2МА не оказывает визуально наблюдаемых изменений в структуре и морфологии их поверхностных слоев. Это объясняется отсутствием нагрева поверхностного слоя в ходе обработки ЛН. Однако в процессе обработки изменения происходят за счет механического воздействия, – от приложения силы возникающей ударной волны. В частности, при режимах обработки начиная с $q = 3$ ГВт/см² для ШХ15 и 6 ГВт/см² для 40ХН2МА обнаруживается пятно вдавливания материала в зоне воздействия. Результаты профилометрии показали, что при дальнейшем увеличении нагрузки q , высота ступеньки по периметру зоны обработки увеличивается (рисунок 15а). Возможно, при данных режимах обработки, материал под воздействием силы удара переходит из области упругой деформации в зону пластического течения.



(а) – профили поверхности на границе зоны обработки ЛН; (б) значения шероховатости в пятне

Рисунок 15 – Результаты профилометрии стали ШХ15, обработанной ЛН при различных мощностях излучения

При больших плотностях мощности происходит наведение растягивающих ОН в поверхностном слое. Предполагается, что давление, оказываемое на поверхность, является по величине достаточным для отражения ударной волны от тыльной поверхности образца. В результате повторного прохождения ударной волны сквозь материал происходит движение дислокации в противоположном направлении, что приводит к изменению распределения ОН.

Внутри пятна, в зависимости от мощности излучения, зафиксировано изменение шероховатости поверхности (рисунок 15б). Для стали ШХ15 характерна тенденция сглаживания рельефа, что объясняется высокой нагрузкой равномерного вдавливания материала по всей площади пятна, приводящее к пластической деформации.

На рентгенограммах после обработки ЛН обнаруживаются структурные различия, отражающиеся в изменении интенсивности линии, что указывает на формирование статических искажений решетки. С увеличением q на рентгенограммах наблюдается смещение пиков в сторону больших углов, что указывает на наведение остаточных напряжений. Однако, опять же, по причине отсутствия термического воздействия, признаков каких-либо фазовых превращений выявлено не было (рисунок 16).

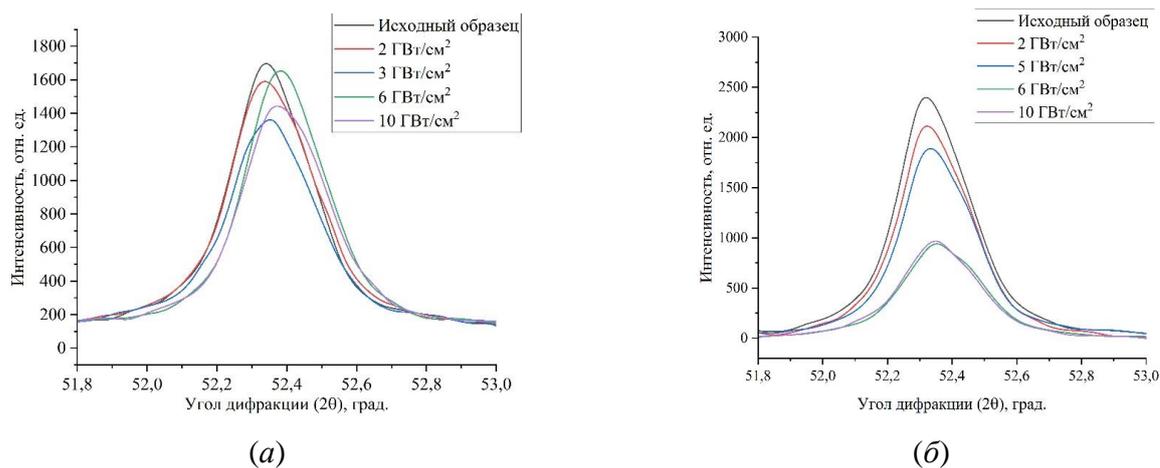


Рисунок 16 – Участки рентгенограмм образцов ШХ15 (а) и 40ХН2МА (б), обработанных ЛН при различных плотностях мощности излучения

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что при определенных условиях обработки, ЛН позволяет получать сжимающие остаточные напряжения (ОН) для сталей ШХ15 и 40ХН2МА. Выявлено, что для каждого материала существует значение плотности мощности излучения q , при котором в поверхностных слоях начинают формироваться сжимающие ОН (для стали ШХ – 3 ГВт/см², для 40ХН2МА – 6 ГВт/см²). До указанных значений происходит уменьшение интенсивности линии, что свидетельствует о присутствии статических искажений решетки. Для режимов с приведенными выше значениями q характерно смещение дифракционных пиков в сторону больших углов. Именно при данных значениях q происходит пластическая деформация: давление ударной волны превышает предел текучести.

Лазерный наклёп позволяет увеличить микротвердость поверхности стали ШХ15 на 80 %, а стали 40ХН2МА на 30 % (рисунок 17). Максимальные значения микротвердости достигаются при $q = 3$ и 6 ГВт/см² для ШХ15 и 40ХН2МА соответственно. Как видно на рисунке 16, при данных режимах обработки ЛН на соответствующих дифрактограммах характерные пики имеют минимальную интенсивность, что может указывать на возможное увеличение плотности дислокаций в поверхностном слое, приводящее к росту микротвердости.

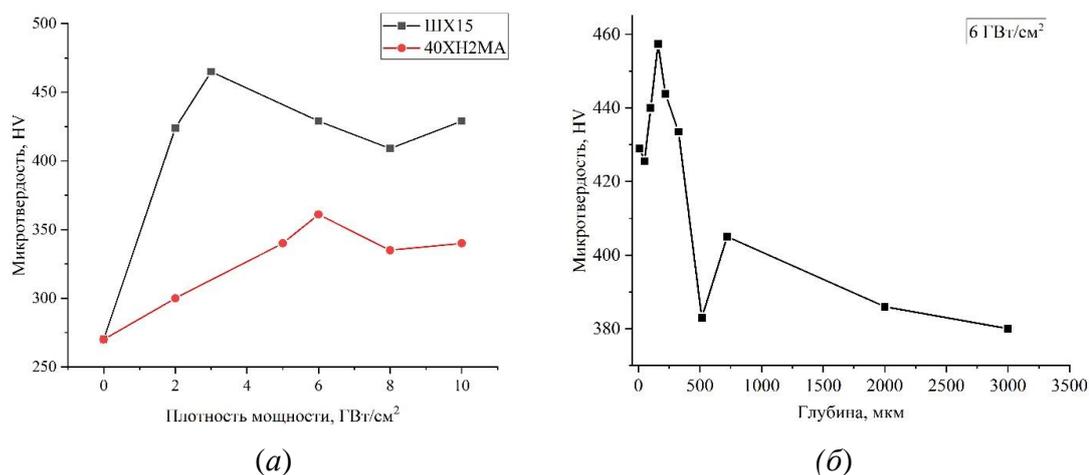


Рисунок 17 – Результаты измерения микротвердости сталей после обработки ЛН с различными значениями q (а) и распределение микротвердости стали ШХ15 по глубине после ЛН при $q = 6$ ГВт/см² (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основании проведенных исследований выполнено решение ряда актуальных задач в области материаловедения, связанных с упрочнением поверхностных слоёв конструкционных низколегированных сталей импульсными потоками плазмы и лазерного излучения.

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующем.

1. Для обработки импульсными потоками плазмы:

- Выявлены режимы обработки, при которых происходят характерные изменения морфологии и структурно-фазового состояния модифицированного слоя, а именно: закалка из твердой фазы ($Q = 35-50$ Дж/см²) и закалка в режиме с расплавом ($Q > 50$ Дж/см²). Обработка с меньшим нагревом (меньшей тепловой нагрузкой Q) не приводила к видимой модификации поверхности сталей.

- Установлено существенное повышение микротвердости поверхности всех одиннадцати исследованных марок сталей, характеризующееся насыщающимся ростом значений микротвердости по мере возрастания тепловой нагрузки Q . По достижении порога плавления изменения микротвёрдости выходят на плато вследствие достижения предельной доли мартенсита в модифицированном поверхностном слое. Предельная степень упрочнения сталей в наибольшей степени зависела от содержания углерода и изменялась в диапазоне от 2 до 4,8 раз.

- Установлены следующие закономерности влияния тепловой нагрузки на морфологию поверхности сталей в результате обработки: до порога плавления сталей происходит незначительное сглаживание поверхности; при плавлении наблюдается образование рельефа, приводящее к экспоненциальному росту шероховатости R_a с увеличением Q .

- Показано, что толщина модифицированного слоя сталей напрямую зависит от поглощённой тепловой нагрузки, длительности и количества импульсов, а также от химического состава стали, и во многом определяется ее прокаливаемостью. При обработке исследованного ряда сталей при $Q \sim 80$ Дж/см² и $\tau = 1$ мс была достигнута толщина модифицированного слоя 120 мкм.

- Определены режимы обработки сталей ШХ15 и 40XN2MA, при которых достигается наиболее эффективное повышение эксплуатационных характеристик модифицированного слоя. При данных режимах реализуется закалка из твердой фазы. В качестве плазмообразующего газа для обработки рекомендуется использование гелия, поскольку использование азота приводит к образованию поверхностных дефектов.

2. Для обработки сталей ШХ15 и 40XN2MA лазерным наклёпом:

- Воздействие лазерным излучением не приводит к качественному изменению структурно-фазового состояния сталей. При этом лазерный наклёп влияет на макрорельеф поверхности в зоне воздействия, приводя к пластической деформации (вдавливанию) материала в результате давления, оказываемого на поверхность. Отмечена прямая зависимость глубины вдавливания от плотности мощности лазерного излучения в диапазоне 2-10 ГВт/см² при длительности воздействия $\tau = 17$ нс на полувысоте лазерного импульса.

- В результате обработки лазерным наклёпом увеличивается микротвердость сталей. Степень упрочнения по значениям HV в среднем не превышала 50 %. По сравнению с обработкой импульсными потоками плазмы, повышенные значения микротвердости наблюдаются на много большей глубине, достигающей 1 мм.

- Определены режимы, при которых образуются сжимающие остаточные напряжения: 2 ГВт/см² для ШХ15 и 6 ГВт/см² для 40ХН2МА. Обработка при меньшей плотности мощности не вносит вклад в остаточные напряжения. При обработке с большей нагрузкой остаточные напряжения переходят в область растягивающих, что может указывать на негативное влияние отраженной ударной волны.

Анализ влияния обработки импульсными потоками плазмы и лазерным наклёпом на поверхность сталей показал, что каждый из методов имеет свой механизм упрочнения, при котором, в зависимости от режима обработки, реализуется та или иная совокупность параметров модифицированного слоя, причем далеко не все изменения свойств поверхности приводят к улучшению эксплуатационных свойств материалов.

Пробные эксперименты с использованием оптимизированных режимов обработки ИПП и ЛН для упрочнения стальных изделий ответственного назначения (бурильных замков, термопарных чехлов, пуансонов пресс-оснастки) продемонстрировано значительное повышение срока их эксплуатации.

Полученные результаты перспективны для развития каждого из исследованных методов обработки ИПП и ЛН, а также служат основой для создания новой технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также входящих в международные базы цитирования SCOPUS и Web of Science:

1. Effect of Pulsed Plasma Flow Treatment Parameters on the Thickness, Microhardness, and Elemental and Phase Compositions of Modified Surface Layers of Structural Steel / **А.К. Kutukov**, I.M. Poznyak, S.E. Panin et. al. // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – V. 85. – №. 11. – С. 1925-1930.

2. Определение оптимальных условий упрочнения импульсными плазменными потоками низколегированных конструкционных сталей с различным содержанием углерода / **А.К. Кутуков**, Н.А. Данилина, С.Е. Панин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19. - № 1. – С. 30-35. – DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-1-30-35

3. **Кутуков А.К.**, Сергеечев А.А., Гапонова В.В. Повышение коррозионной стойкости низколегированных конструкционных сталей импульсно-плазменной обработкой // Практика противокоррозионной защиты. – 2023. – Т. 28. – № 2. – С. 17-21. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-2 5.

4. **Кутуков А.К.** и др. Изменение шероховатости и микротвердости стали ШХ15 при обработке импульсными плазменными потоками // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2023. – Т. 20. - № 3. – С. 398–405.

5. Установка для обработки изделий сложной геометрической формы импульсными плазменными потоками / **А.К. Кутуков**, С.Е. Панин, В.Л. Подковыров и др. // Инженерная физика. – 2023. – № 10. – С. 47-58. – DOI: 10.25791/infizik.10.2023.1362.

6. Поверхностная закалка конструкционных сталей ШХ15 и 40ХН2МА импульсными потоками плазмы / **А.К. Кутуков**, А.А. Сергеечев, М.А. Миллер, Е.М. Миронова // Упрочняющие

технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 7. С. 315—321. DOI: 10.36652/1813-1336-2024-20-7-315-321.

7. Моделирование кинетики лазерного упрочнения титанового сплава / А.Г. Сухарев, Р.В. Смирнов, М.Д. Таран, А.К. Кутуков // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, № 8. – С. 1331-1340. DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58561.275-23.

- в сборниках трудов конференций:

1. Изучение изменения микротвердости и структуры поверхности конструкционных сталей при обработке импульсными плазменными потоками / **А.К. Кутуков**, Д.В. Коваленко, В.А. Барсуков и др. // Лазерные, плазменные исследования и технологии. ЛаПлаз-2022., Москва, 22–25 марта 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2022. – С. 157.

2. Влияние облучения гелиевой и азотной плазмой на коррозионную стойкость конструкционных сталей / **А.К. Кутуков**, В.В. Гапонова, М.А. Миллер и др. // XVIII международной научной конференции «Физико-химические процессы в атомных системах», г. Москва, 6–7 декабря 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2022. – С. 78.

3. Установка для обработки изделий сложной геометрической формы импульсными плазменными потоками с целью улучшения их физико-механических свойств / С.Е. Панин, **А.К. Кутуков**, Г.С. Байбаков и др. // I Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 20–24 марта 2023 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». - 2023. – С. 269.

4. Определение температуры поверхности конструкционных материалов при обработке импульсными плазменными потоками / А.А. Сергеечев, **А.К. Кутуков**, С.Е. Панин и др. // Материалы XXVI конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 26-27 января 2023 г.: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ. - 2023. – С. 99-102.

5. Изменение шероховатости и микротвердости стали ШХ15 при обработке импульсными плазменными потоками / **А.К. Кутуков**, М.А. Миллер, В.В. Гапонова и др. // Материалы XXVI конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 26-27 января 2023 г.: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ. - 2023. – С. 116-118.

6. Влияние лазерной ударной обработки на значения остаточных напряжений, шероховатости и микротвердости в поверхностном слое сталей ШХ15 и 40ХН2МА / **А.К. Кутуков**, Р.В. Смирнов, Е.А. Пеганов и др. // IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ. – 2023. – С. 66.

7. Влияние лазерной ударной обработки на структуру и микротвердость стали ШХ15 / В.В. Гапонова, **А.К. Кутуков**, И.С. Макогон и др. // X Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА»: сборник тезисов. Часть 2. – Москва: ООО «Издательский дом Недра», 2023. – С. 91-92.

8. Закалка импульсными плазменными потоками конструкционных сталей ШХ15 и 40ХН2МА / **А.К. Кутуков**, А.А. Беляков, А.А. Сергеечев и др. // X Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА»: сборник тезисов. Часть 2. – Москва: ООО «Издательский дом Недра», 2023. – С. 86-87.

9. Модификация металлических поверхностей ударной волной, создаваемой мощным лазерным излучением / Е.А. Пеганов, И.С. Макогон, **А.К. Кутуков** и др. // X Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА»: сборник тезисов. Часть 2. – Москва: ООО «Издательский дом Недра», 2023. – С. 122-123.

10. Обработка конструкционных сталей импульсными потоками плазмы / А.А. Сергеечев, **А.К. Кутуков**, М.А. Миллер и др. / X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2024»: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. – С. 222.