

На правах рукописи

БАРИНОВ Сергей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ
ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ
РЕСУРСОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ**

2.5.6. Технология машиностроения
2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Брянск – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и Муромском институте (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Киричек Андрей Викторович

Официальные оппоненты: **Приходько Вячеслав Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН РФ,
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет (МАДИ)», профессор
кафедры «Технология конструкционных
материалов»

Блюменштейн Валерий Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева»,
профессор кафедры «Технология
машиностроения»

Тамаркин Михаил Аркадьевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», заведующий
кафедрой «Технология
машиностроения»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Российский университет
транспорта (МИИТ)»

Защита состоится «14» октября 2025 г. в 14 ⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.277.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10 б, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте: <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/barinov-sergey-vladimirovich>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Нагоркин Максим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Стратегия и государственная программа научно-технологического развития Российской Федерации требует от науки и производства решения проблемы обеспечения высоких эксплуатационных свойств и несущей способности изделий при работе в экстремальных условиях: непрерывного повышения нагрузок, низких или высоких температурах, коррозионно-активной среде. Возможности большинства материалов и технологий достигли предела. Необходимо создание новых технологий, позволяющих максимально полно раскрыть потенциал имеющихся материалов.

Выделен класс нуждающихся в глубоком упрочнении крупногабаритных ресурсопределяющих деталей, таких как: валки прокатных станов, корпуса и детали атомных реакторов, крупные детали ракетно-космической техники, крупные зубчатые колеса и подшипники качения, специальные изделия двойного назначения. Такие детали определяют срок службы изделия в целом и, как правило, имеют высокую стоимость. Например, валки реверсивной клетки прокатного стана-5000 имеют длину более 11 м и диаметр рабочей части 1,2 м. Ресурс работы двух работающих в паре валков составляет 2-4 недели или 4-10 тыс. тонн проката, а их стоимость превышает 36 млн. руб. Срок службы атомного реактора определяется ресурсом сварного корпуса, а средняя стоимость реактора с внутрикорпусными деталями составляет 900 млн. руб. Даже небольшое увеличение ресурса таких деталей сопровождается значительным экономическим эффектом.

Известно, что несущий слой ответственных деталей необходимо упрочнять, а толщина упрочненного слоя должна быть глубже, чем расположение наиболее нагруженной точки. Для класса «крупногабаритных ресурсопределяющих» деталей требуемая глубина упрочнения составляет 5-10 мм. Покрyтия и поверхностное легирование обеспечивают упрочнение поверхностного слоя на доли миллиметров. Применение термического упрочнения проблематично из-за больших габаритов деталей. Возможности большинства традиционных способов поверхностного пластического деформирования (ППД) ограничиваются глубиной упрочнения до 2-3 мм. Только динамические деформационные способы могут обеспечить необходимую глубину упрочнения вследствие высокой энергетической эффективности. Наиболее широкие технологические возможности, в том числе глубину упрочнения до 15 мм, имеет волновое деформационное упрочнение (ВДУ), отличающееся способом подвода энергии в очаг деформации – ударом через промежуточное звено – волновод.

При ударе в очаге деформации формируется импульс, энергия, форма и длительность которого зависят от типа ударной системы. При ударе шаром (обработка дробью), импульс имеет большую амплитуду при небольшой длительности, а его коэффициент полезного действия (КПД), т.е. доля энергии удара, затрачиваемая на пластическую деформацию - составляет всего 12 %. При ударе протяженным телом - бойком, КПД достигает 26 %, а при ударе через промежуточное звено - КПД возрастает до 38 %.

Технология ВДУ впервые предложена и запатентована в 1997 году профессорами Киричком А.В., Соловьевым Д.Л., Лазуткиным А.Г. Различными аспектами реализации ВДУ, в том числе его применения в сочетании с термической обработкой (ТО), химико-термической обработкой (ХТО) и аддитивным синтезом, занимались: Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Афонин А.Н., Силантьев С.А., Тарасов Д.Е., Яшин А.В., Федонина С.О. и др.

При ВДУ акустическая волна деформации поступает в обрабатываемый материал в виде потока импульсов. Волна деформации, проходя участки обрабатываемого изделия с разной акустической жесткостью, частично отражается, а на границах изделия отражается полностью, формируя обратную волну. В результате суммирования всей совокупности разнонаправленных проходящих и отраженных волн деформации одновременно в каждой точке изделия возникают волновые состояния, определяющие степень упрочнения материала.

Установлено, что с целью упрочнения металлических деталей целесообразно использовать ударные системы, в которых длина бойка больше длины волновода (процесс ВДУ). В этом случае в очаг деформации поступает пролонгированный импульс, состоящий из головной и хвостовой (отраженной) частей. Большая длительность импульса и существенно большая энергия, сообщаемая в очаг деформации, позволяют достичь КПД 65%. Дальнейшее повышение энергетической эффективности ВДУ требует расчетов и адаптации ударной системы и параметров процесса к инструменту, обрабатываемому изделию и его материалу. При удлиненном бойке зависимости классической механики не работают, для определения параметров импульса необходимо применение математического аппарата волновой теории удара. Аналитическое решение получено при ряде допущений и серьезном упрощении формы изделия, что накладывает ограничения на применение известных рекомендаций.

Задачу поиска параметров элементов ударных систем, обеспечивающих высокую энергетическую эффективность ВДУ и максимально возможный КПД, необходимо решать методом конечных элементов, который позволяет задавать реальную форму и изделия, и инструмента, и бойка, и волновода. Крайне актуальна разработка конечно элементной модели - универсальной цифровой платформы, позволяющей моделировать как процессы ВДУ, так и варианты их комбинирования с другими технологиями.

Более глубокое исследование влияния ВДУ на: технологическую наследственность; механические свойства материалов при повышенных и отрицательных температурах; эксплуатационные свойства, такие как коррозионная стойкость, циклическая прочность; наличие, размеры и формы полостей в изделии позволит выявить новые зависимости и закономерности ВДУ, расширить область его применения, в том числе в составе комбинированных технологий.

Исходя из изложенного, сформулированы цель и задачи исследований.

Целью работы является повышение эксплуатационных свойств изделий и механических свойств материалов за счет поиска рациональных режимов

обработки конечно-элементным моделированием процесса ВДУ и расширение технологических возможностей волнового деформационного упрочнения (ВДУ), а также разработки комбинированных технологий сварки, наплавки - аддитивного синтеза (Wire Arc Additive Manufacturing/3D Metal Print) с ВДУ.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**.

1. Провести критический анализ технологических возможностей ВДУ и выявить направления совершенствования технологии.

2. Разработать конечно-элементную модель ВДУ. Исследовать влияние на эффективность упрочнения масштабного фактора: параметров ударной системы, размеров обрабатываемых деталей, с учетом применяемого инструмента, свойств обрабатываемого материала и макроструктурной технологической наследственности.

3. Разработать модели комбинированных процессов сварки, наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ.

4. Исследовать влияние температурного фактора: температуры ВДУ, а также температуры испытаний (эксплуатации деталей), на механические свойства упрочненного материала.

5. Исследовать влияние ВДУ на такие эксплуатационные свойства, как: сопротивление контактному выкрашиванию, коррозионная стойкость, циклическая прочность.

6. Разработать технологические рекомендации по обеспечению ВДУ требуемых показателей качества поверхностного слоя, механических и эксплуатационных свойств.

7. Выполнить производственную апробацию применения ВДУ, в том числе в составе комбинированных технологий.

Объект исследований – технология ВДУ и комбинированная технология сварки, наплавки – аддитивного синтеза и ВДУ.

Предмет исследований – закономерности и зависимости параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств от технологических параметров ВДУ.

Научная новизна полученных результатов.

Установлено, что вследствие интерференционного волнового характера ВДУ упрочняется не только контактная, но и опорная поверхности, глубокий поверхностный слой монолитного материала детали получает гетерогенное упрочнение, на характер упрочнения влияет технологически наследуемая и изменяемая в процессе обработки исходная макроструктура; (*п. 6, 7 паспорта научной специальности 2.5.6*).

Установлены закономерности влияния параметров ВДУ на механические и эксплуатационные свойства и определены технологические режимы, обеспечивающие: кратное (в 2...6 раз) повышение сопротивления контактному выкрашиванию (ΔI); повышение прочности работающих в условиях знакопеременных нагрузок сварных швов в 1,7...2,9 раза по сравнению со сварными образцами без упрочнения и в 2,3...3,5 раза по сравнению с исходным материалом той же марки; повышение коррозионной стойкости в 1,6

раза; максимальное повышение пределов текучести и прочности при минимальном снижении пластичности и ударной вязкости в результате обработки нагретого до 200...400°C материала испытуемых в температурном интервале -60...+300°C деталей; (*п. 7 паспорта научной специальности 2.5.6*).

Разработаны конечно-элементные модели ударной системы с промежуточным звеном и технологии волнового деформационного упрочнения деталей с конечными размерами, выявлены условия энергетической эффективности ВДУ и уточнены рекомендации, касающиеся выбора рациональных параметров бойка и волновода, а также закономерности влияния на глубину и степень упрочнения масштабного фактора - формы и размеров образцов из различных материалов, наличия в них областей с разной акустической жесткостью (углов, полостей, отверстий) (*п. 3, 4, 7 паспорта научной специальности 2.5.6*).

Разработаны комбинированные конечно-элементные модели ВДУ сварного шва и аддитивного синтеза WAAM/3DMP, отличающиеся регулярным обменом данными об изделии без потери информации при переходе между принципиально отличающимися по физическому характеру воздействий на материал заготовки операциями электродуговой сварки/синтеза и ВДУ. Установлены закономерности влияния технологических параметров комбинированного процесса на технологические остаточные напряжения, степень и глубину упрочнения поверхностного слоя изделия (*п. 2, 3, 7 паспорта научной специальности 2.5.5*).

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в разработке и применении конечно-элементных моделей для исследования волнового деформационного упрочнения и комбинированных процессов (сварка/WAAM-синтез + ВДУ). Практическая значимость состоит в разработке технологических рекомендаций (режимы ВДУ, параметры ударных систем, выбор инструмента и схем обработки, температура нагрева), обеспечивающих значительное повышение эксплуатационных свойств (сопротивление контактному выкрашиванию до 6 раз, коррозионная стойкость до 1,6 раза, прочность сварных швов до 3,5 раз). Решения апробированы на предприятиях с ожидаемым экономическим эффектом свыше 7,4 млн руб.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнялись с использованием основных положений технологии машиностроения, инженерии поверхности, теории математического моделирования. Применялись методы планирования эксперимента, регрессионного анализа и статистической обработки данных, использовалось современное производственное, лабораторное и испытательное оборудование.

Результаты работы. Результаты диссертационного исследования нашли применение в НПО «Техномаш им. С.А. Афанасьева», Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г.Волгодонск, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ОАО «РИП» (концерн Алмаз-Антей), ОАО

«Кулебакский завод металлических конструкций», НПП «Гидротехника», АО «ПО Муромский машиностроительный завод», Муромский ремонтный механический завод.

Положения, выносимые на защиту.

1. Конечно-элементная модель ВДУ, позволяющая исследовать влияние на энергетическую эффективность упрочнения: параметров ударной системы, применяемого инструмента, свойств обрабатываемого материала, размеров обрабатываемых деталей.

2. Конечно-элементная модель комбинированных процессов сварки с последующим ВДУ, позволяющую установить характер влияния ВДУ на степень и глубину упрочнения, остаточные напряжения, рекомендовать режимы ВДУ в зависимости от требуемой твердости и глубины упрочнения сварного шва и зоны термического влияния.

3. Конечно-элементные модели комбинированных процессов наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ, позволяющую в зависимости от габаритных размеров, скорости отвода тепла от опорной поверхности выращиваемого изделия, установить требуемое время охлаждения выращиваемых слоев детали до температуры их последующего ВДУ.

4. Результаты экспериментальных исследований, в том числе влияния температурного фактора: температуры заготовки перед ВДУ, а также температуры испытаний (эксплуатации), на механические свойства упрочненного материала.

5. Установленные закономерности влияния параметров ВДУ на характер упрочнения, структуру и механические свойства материала, параметры качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей.

6. Технологические рекомендации по обеспечению ВДУ требуемых показателей качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей.

Степень достоверности полученных результатов определяется адекватностью математических моделей, построенных с использованием экспериментальных результатов, удовлетворительным совпадением экспериментальных данных с результатами моделирования, их непротиворечивостью результатам исследований других авторов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международных научно-технических конференциях: «Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010)» (Воронеж, 2010 год), «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии (МК-12-ММФ)» (Липецк – 2011), «Фундаментальные проблемы техники и технологии» (Орел, 2012), «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (Рыбинск, 2012), «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного

машиностроения и металлургии» (Липецк, 2012), «Машиностроение - основа технологического развития России (ТМ-2013)» (Курск, 2013), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2013, 2015-2017), «Физика и технология наноматериалов и структур» (Курск, 2015), «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Курск, 2016), «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2019), «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 2019), «Инновации в машиностроении (ИнМаш-2019)» (Кемерово, 2019, 2023), Intelligent Manufacturing and Materials 2021 (Ялта, 2021), «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (Брянск, 2021), «Машиностроение, автоматизация и системы управления (МЕАКС 2020)» (Новосибирск, 2020), «Динамика технических систем - 2020» (Ростов-на-Дону, 2020), «Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ)» (Москва 2022, 2024), «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянск, 2022), «Наукоёмкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (Дивноморское, 2024); на всероссийских научно-технических конференциях: «Новые материалы и технологии НМТ-2010» (Москва, 2010), «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» (Курск, 2019), «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2021), «Новые технологии в машиностроении» (Воронеж, 2021); на всероссийской межвузовской научной конференции «Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России» (Муром, 2010-2023); Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению «GraphiCon» (2019-2021); региональная научно-практическая конференция молодых ученых и аспирантов «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России» (Орел-Ливны, 2010); Международный научный симпозиум технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии» (Ростов-на-Дону, 2016); научный симпозиум технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (Дивноморское, 2019, 2020, 2022); всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы техники и технологии» (Орел, 2014); международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2017); Всероссийская молодежная научно-практическая школа с международным участием «Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении» (Кемерово, 2018).

Диссертационная работа в полном объеме заслушана и обсуждена в рамках конференций и научно-технических семинаров профильных кафедр Брянского государственного технического университета, Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Волгоградского государственного технического

университета, Донского государственного технического университета, Кузбасского государственного технического университета, Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, а также в Российском университете транспорта (МИИТ).

Диссертационная работа выполнялась при поддержке: грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 14-08-31263 мол_а "Повышение долговечности созданием гетерогенной структуры деформационным упрочнением", (руководитель), 2014-2015г; № 16-08-01240 А, "Закономерности волнового деформационного многоконтактного нагружения полупространства", (руководитель), 2016-2017г; №18-38-20066 мол_а_вед, "Моделирование напряженно-деформированных состояний сплошных и сварных материалов, упрочненных волной деформации", (руководитель), 2018-2020г; № 19-08-00676 А, "Исследование влияния размеров изделия на характер упрочнения волной деформации", (руководитель), 2018-2021г; гранта Фонда перспективных исследований (ФПИ) «Разработка технологии и оборудования для комбинированного упрочнения с применением волны деформации специальных металлических изделий, полученных аддитивным и традиционным способами», (исполнитель), 2016-2020 г; гранта Российского научного фонда (РНФ) № 24-29-00666 «Повышение коррозионной стойкости изделий и сварных швов волной деформации», (руководитель), 2024-2025г; базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по теме № 075-00150-24-03 «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термомодеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин», (исполнитель), 2024-2026 г.

Публикации. По тематике диссертационного исследования опубликовано 120 научных работ, в том числе: главы в справочнике и книгах; 34 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России для опубликования результатов диссертационных исследований; 23 статьи в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Web of Science / Scopus (в т.ч.: 1 статья квартиля Q-1; 2 статьи квартиля Q-3; 3 статьи квартиля Q-4); 9 патентов на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 330 страниц машинописного текста, 22 таблицы, 129 рисунков, список используемой литературы из 210 наименований и приложение на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы.

Первая глава посвящена: анализу требований, предъявляемых к крупногабаритным ресурсопределяющим деталям; рассмотрению методов технологического обеспечения их срока службы; определению

перспективности применения ВДУ для упрочнения такого класса деталей. Определены основные направления совершенствования технологии ВДУ. Сформулированы задачи, решение которых обеспечит достижение поставленной цели исследований.

Во второй главе представлено описание экспериментального оборудования, стендов и установки для исследования процессов волнового деформационного упрочнения; оборудования и методики исследования механических и эксплуатационных свойств; методика планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных; обоснованию выбора системы инженерного анализа ANSYS для моделирования процессов ВДУ методом конечных элементов, общая структурная схема исследований.

Структурная схема исследований включает четыре этапа: 1) исследование эффективности волновых процессов, протекающих в ударной системе боек-волновод; 2) исследование эффективности волновых процессов, протекающих в изделии с конечными размерами; 3) разработка моделей комбинированных технологий ВДУ сварного шва и ВДУ синтезируемого электродуговым методом изделия; исследование влияния температурного фактора; 4) экспериментальные исследования влияния ВДУ на эксплуатационные свойства, разработка общих технологических рекомендаций, производственная апробация.

Третья глава посвящена исследованию энергетической эффективности волновых процессов, протекающих в ударной системе боек-волновод. При ударе бойка по волноводу возникает волна деформации, которая распространяется в ударной системе и воздействует на очаг деформации (рисунок 1).

Известно, что геометрические размеры и свойства материала элементов ударной системы оказывают доминирующее влияние на энергию импульса, поступающую в очаг деформации. Для оценки энергетической эффективности применяющихся в процессе ВДУ ударных систем с промежуточным звеном – волноводом, и длине бойка не менее длины волновода, разработана конечно-элементная модель (КЭМ) ударной системы.

В целях сокращения времени расчета приняты следующие допущения: а) боек и волновод - сплошные цилиндрические тела, которые воспринимают только осевую нагрузку и упруго деформируются в направлении оси Y , перемещения по осям X и Z отсутствуют; б) обрабатывается изотропное полупространство; в) контакт бойка и волновода, волновода и обрабатываемой поверхности осуществляется по номинальной площади, макроотклонения контактирующих поверхностей, их волнистость и шероховатость не учитываются. Расчет выполнен в симметричной постановке.

Энергетическая эффективность оценивалась по КПД ударной системы – отношению энергии, затраченной на упруго пластическую деформацию материала в очаге деформации к кинетической энергии удара бойка по волноводу. КПД рассчитан по разработанной КЭМ ударной системы, включающей разработанные модели материалов обрабатываемой детали, бойка

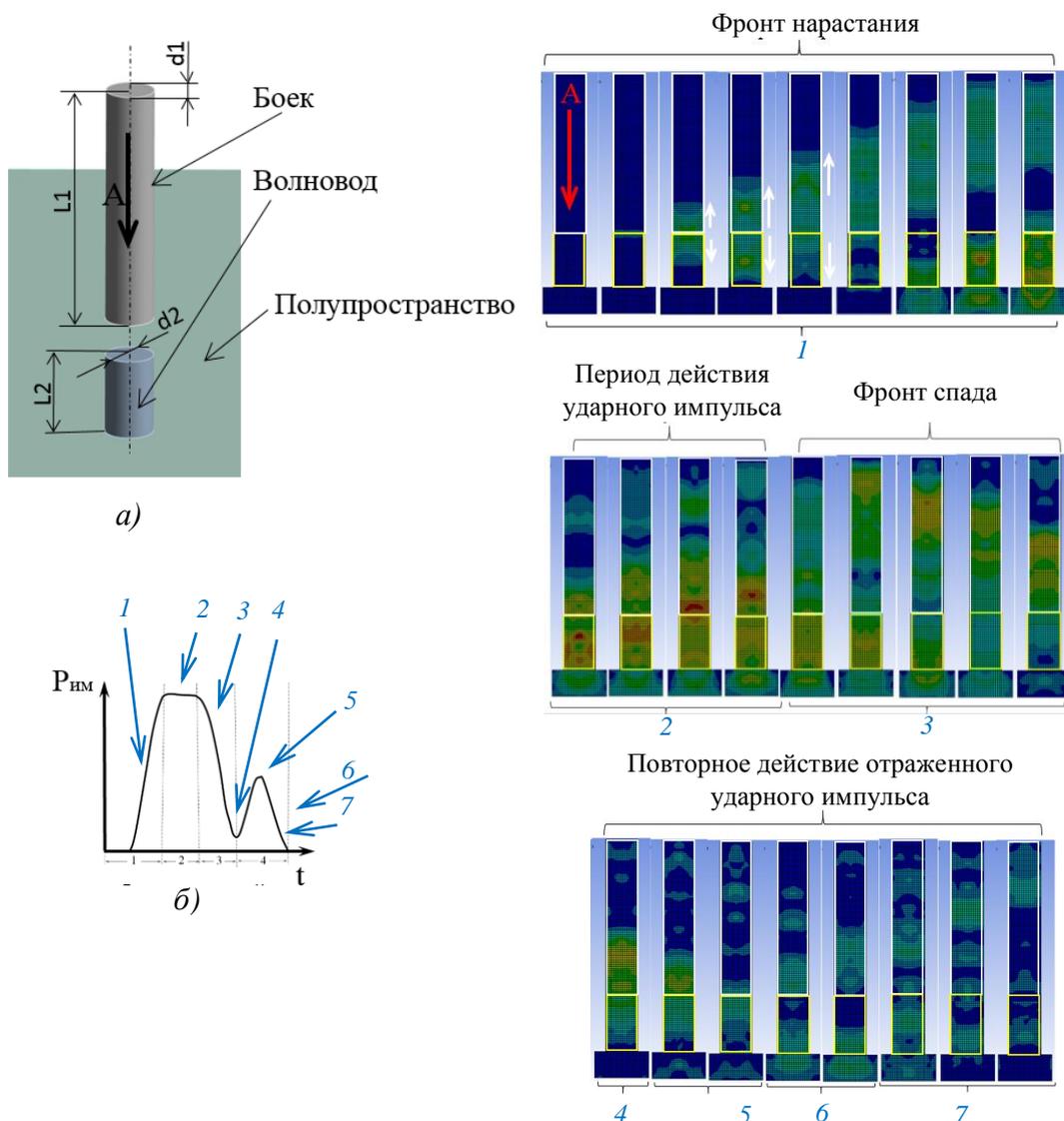


Рисунок 1 - Распространение волн упругой деформации после одного удара бойка по волноводу: а - общий вид модели ударной системы; б - формируемый ударный импульс в результате удара бойка по волноводу

и волновода, при создании которых использованы как справочные, так и экспериментальные данные.

Исходя из известных рекомендаций о рациональных соотношениях длин и диаметров бойка (L_1, d_1) и волновода (L_2, d_2) - $L_1 / L_2 = 3 \dots 5$; $L_1 / d_1 =$ не менее 4, разработан и реализован план расчетного эксперимента в следующем диапазоне варьирования факторов: $30 < d_1 < 60$ мм; $0,1 < L_1 / d_1 < 10$; $1 < L_1 / L_2 < 10$. Эксперименты проводились при постоянной кинетической энергии удара бойка по волноводу $A = 35$ Дж. Адекватность модели ударного импульса оценена по результатам сравнения с экспериментальными данными, полученными на разработанном стенде - макете ударной системы. Расчетные значения силы, длительности и энергии ударного импульса, формирующегося в очаге деформации, соответствуют экспериментальным данным с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Установлено, что ударные системы с параметрами: $30 < d_1 = d_2 < 90$ мм, $1 < L_1 / L_2 < 10$, $5 < L_1 / d_1 < 10$ обеспечивают передачу КПД (η) более 80 % энергии ударного импульса в очаг деформации. Нецелесообразно использовать ударные системы диаметром более 60 мм, так как уровень технической сложности растет быстрее, чем энергетическая эффективность этой системы. При ограничении размеров и веса ударной системы до: $L_1 + L_2 < 1000$ мм; $L_2 > 100$ мм; $m_1 + m_2 < 15$ кг; то η более 80 % возможно, при: $1 < L_1 / L_2 < 3$; $30 < d_1 = d_2 < 90$; $5 < L_1 / d_1 < 10$.

Немаловажное влияние на результат упрочнения оказывают свойства материала обрабатываемой детали, влияние которых на энергетическую эффективность ВДУ не было исследовано ранее. Эксперимент проводился на трех разных по физико-механическим свойствам материалах: сталь 40Х, алюминиевый сплав АМГ6, титановый сплав ВТ1-0. В результате исследований установлено преимущественное влияние параметров бойка, существенное влияние соотношения длин бойка и волновода и наименее значимое влияние обрабатываемого материала. Влияние обрабатываемого материала на энергетическую эффективность импульса в очаге деформации составляет: 1-3% если η более 80 %; 6-10 % если η менее 60 %.

Исследование влияния формы инструмента на характер упрочнения выполнялось на примере единичного удара для одноконтактных (рисунок 2, а) и многоконтактных схем ВДУ (рисунок 2, б). Исследования выполнялись на образцах из сталей (40Х, 45, 10ХСНД, 30ХГСА, 09Г2С) и алюминиевых сплавов (АМГ2 и АМГ6) с энергиями 100 Дж и 35 Дж, соответственно. В качестве инструментов использовались: шары диаметром 10, 18, 27 мм; стержневые ролики длиной 60 мм и диаметрами 10, 18 и 27 мм; плоские стержни высотой 18 мм и диаметрами 6, 12 и 24 мм (удар наносился плоским торцом стержня); стержни с контактным сферическим торцом диаметром 12 мм.

В результате выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований установлено, что:

- при обработке материалов с исходной твердостью 170-230 *HV* целесообразна одноконтактная схема ВДУ с обработкой детали периферийной поверхностью цилиндрического инструмента (например, ролика диаметром 10 мм и длиной 60 мм), что при ударе с энергией 150 Дж обеспечивает упрочненный слой глубиной более 7 мм с максимальной степенью упрочнения более 40 %;

- при обработке более пластичных материалов целесообразно применять многоконтактные схемы ВДУ и использовать в качестве инструментов стержневые инденторы с плоским или сферическим торцом \varnothing 6 мм, увеличивая количество инденторов с уменьшением твердости материала и устанавливая их с зазором для увеличения производительности обработки без снижения параметров упрочнения (например, при ВДУ образцов с *HV* 65 – 3 индентора, а для образцов с *HV* 45 – 5 инденторов).

В четвертой главе выполнено исследование влияния на эффективность волновых процессов масштабного фактора - конечных размеров обрабатываемого изделия. Эффективность оценивалась по глубине и степени

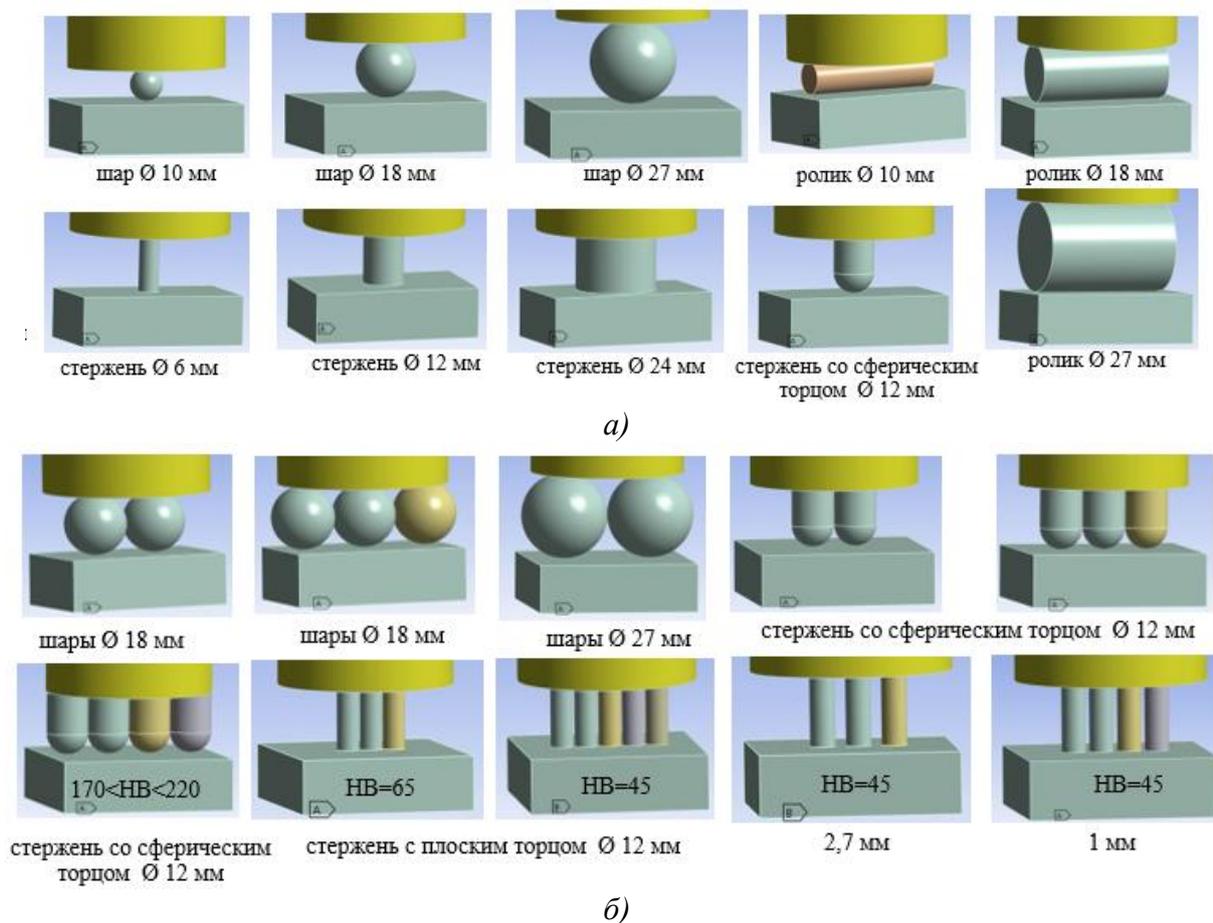


Рисунок 2 - Схемы ВДУ: а – одноконтактные; б – многоконтактные

упрочнения призматических образцов, имеющих конечные размеры (длина 50...150 мм, ширина 20...40 мм, высота 10...20 мм) и изготовленных из стали 45, титана ВТ 1-0, бронзы БрАЖ 9-4, алюминия В95.

При ВДУ на всех границах с изменяющейся акустической жесткостью волна деформации претерпевает изменения, разделяется на отраженную и проходящую. В процессе обработки в каждой элементарной точке изделия вследствие интерференции волн последовательно формируются и меняются напряженно-деформированные состояния. Локальные области материала испытывают определенную степень растяжения-сжатия, которая, в конечном счете, определяет характер и степень упрочнения материала. Акустические волны деформации отражаются и от границ обрабатываемого изделия, оказывая непосредственное влияние на параметры упрочнения. Упрочнение является следствием деформации каждого элементарного объема материала, а параметры упрочнения зависят не только от конечных размеров, но и от формы образца, наличия, размеров и формы полостей в нем. В этой связи представляют интерес не исследованные ранее закономерности упрочнения материала, имеющего анизотропию свойств.

Для исследований эффективности волновых процессов, протекающих в изделии с конечными размерами, дополнена модель ударной системы ВДУ. С целью сокращения времени расчета (в 18 раз) в модели боек и волновод ударной системы заменены формируемым ими ударным импульсом (изменение

силы удара во времени). Модель позволяет определять степени и глубину упрочнения в зависимости от режимов ВДУ, марки материала и размеров образца.

На основании анализа результатов моделирования и натуральных экспериментов, установлено влияние ВДУ на макроструктурную технологическую наследственность, сформулированы выводы и рекомендации.

Установлено, что вследствие интерференционного волнового характера упрочнения при ВДУ упрочняется не только контактная, но и опорная поверхности (рисунок 3). Это обеспечивает возможность бесконтактного деформационного упрочнения противоположной воздействию индентора стороны образца. Установлены отношения между величинами степени (ΔH_μ) и глубины (h_μ) упрочнения на контактной (к) и опорной (о) поверхностях у упрочненных образцов из разных материалов (таблица 1).

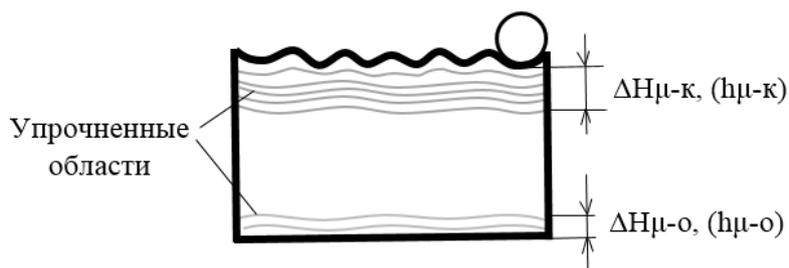


Рисунок 3 - Схема и расположения упрочненных областей после ВДУ

Таблица 1 - Взаимосвязь между величинами ΔH_μ и h_μ упрочнения на контактной и опорной поверхностях у упрочненных образцов из разных материалов

HV ₀ , МПа	800	1500	1700	2000
$\Delta H_{\mu-к} / \Delta H_{\mu-о}$	1,4	5,1	4,8	1,9
$h_{\mu-к} / h_{\mu-о}$	1,3	5,7	1,5	2,6
Материал	Алюмин В-95	Бронза Браж 9-4	Титан ВТ 1-0	Сталь 45

Для обработки изделий из стали, сплавов титана и бронзы целесообразно использовать ударные системы $L_1 / L_2 = 3 \dots 5$, так как они обеспечивают на 7,3 % большую степень и на 9,5 % большую глубину упрочнения, чем $L_1 / L_2 = 10$. При аналогичных результатах упрочнения длина ударной системы $L_1 / L_2 = 3$ на 50 % меньше, чем у $L_1 / L_2 = 5$, что делает её более удобной для использования. Для обработки изделий из алюминиевых сплавов следует использовать ударные системы $L_1 / L_2 = 5$, так как они обеспечивают большую на 34 % степень и на 12 % глубину упрочнения, чем $L_1 / L_2 = 10$, и на 23 и 29 %, чем $L_1 / L_2 = 3$.

Так как размеры образцов влияют на параметры упрочнения, рекомендуется режимы ВДУ крупногабаритных изделий исследовать на образцах с размерами не менее (длина × ширина × высота) 150×40×20 мм, а при меньших размерах образцов корректировать параметры упрочнения (рисунок 4). При равных объемах и толщине образцов, одинаковых режимах ВДУ, прямоугольная форма образца обеспечивает большую степень упрочнения, чем

треугольная и цилиндрическая, а наличие в изделии полостей или пазов усиливает эффект упрочнения.

С ростом размера полости (паза) увеличивается степень упрочнения изделий: из стали от 10 до 110 %, из бронзы от 50 до 220 %, при этом прямоугольная форма полости по сравнению с треугольной и цилиндрической, обеспечивает повышение степени упрочнения образцов из: бронзы Браз 9-4 на 8 %, титана ВТ 1-0 и стали 45 на 4 %, алюминия В95 на 21 %. Степень упрочнения над полостями выше, чем у рядом расположенных областей на 10-30 % в стальных образцах, на 10 - 60 % - в бронзовых.

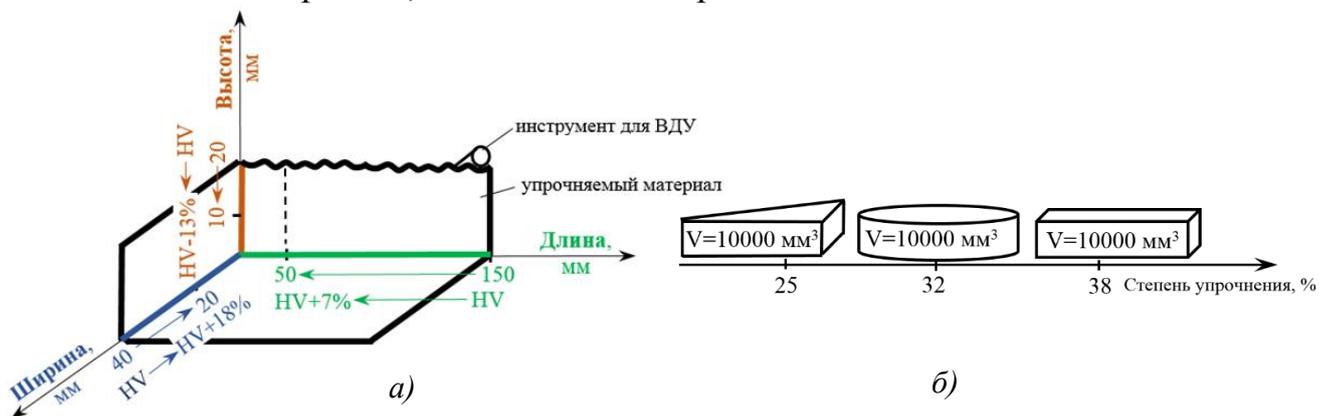


Рисунок 4 - Влияние на степень упрочнения размеров и формы образца: а – размеров; б – формы

Установлено, что на характер упрочнения при ВДУ влияет направление волокон исходной макроструктуры (рисунок 5, а, б). При совпадении направления волокон с направлением деформационного воздействия образец упрочняется по всему сечению преимущественно вдоль волокон, но степень упрочнения материала меньше, по сравнению с деформационным воздействием поперек волокон, при котором глубина упрочненного слоя со степенью упрочнения не менее 50 % составляет не менее 3 мм. Выявлена уникальная способность ВДУ при определенных условиях обработки кардинально изменять технологическую наследственность путем дробления волокон исходной макроструктуры и дрейфа твердых структурных составляющих к контактной и опорной поверхностям, формирования вязкой пластичной сердцевины (рисунок 5, в).

Установлена взаимосвязь между режимами ВДУ, микроструктурой и прочностью образцов из сталей 45, 40Х, 35ХГСА. В результате ВДУ с коэффициентом перекрытия $K = 0,7...0,9$ наблюдалось небольшое повышение предела прочности на 8...13 % и значительное повышение предела текучести на 40...80 % сопровождающееся снижением пластичности на 35...38 %. Впервые в результате воздействия волны деформации установлено формирование в поверхностном слое глобулярного феррита и текстурирование поверхностного слоя - образование под углом 40 - 45° волокнистой структуры в виде чередования прослоек феррита и перлита, а также дробление цементитных пластин до ультрамелкозернистых размеров (рисунок 6).

Получены регрессионные модели, отражающие взаимосвязь между пределом

Расположение волокон исходной наследственной структуры

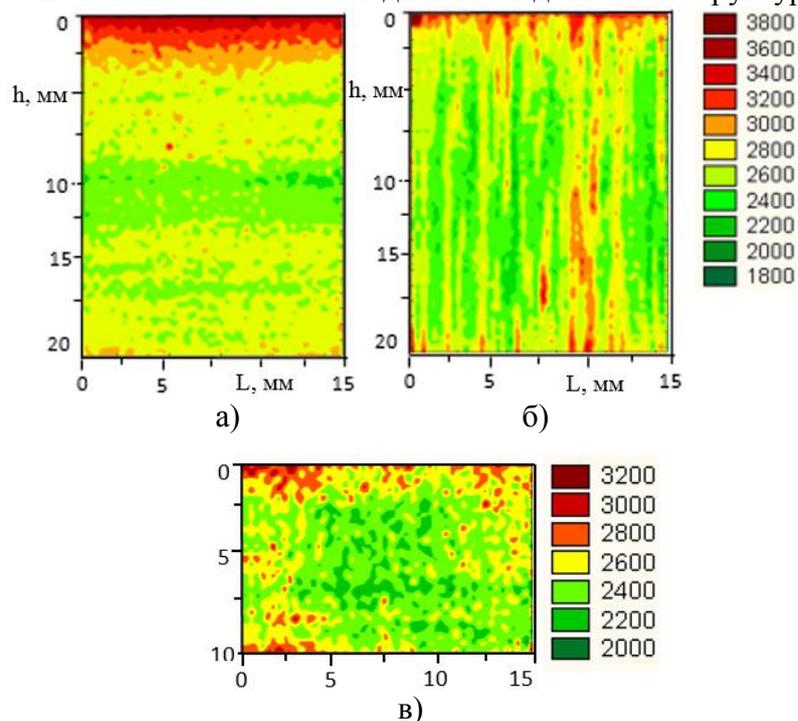


Рисунок 5 - Карты микротвердости (HV , МПа) после ВДУ: а – продольное; б – поперечное; в – получение волной деформации локальных чередований твердо вязких областей вместо волокнистой структуры в поверхностном слое

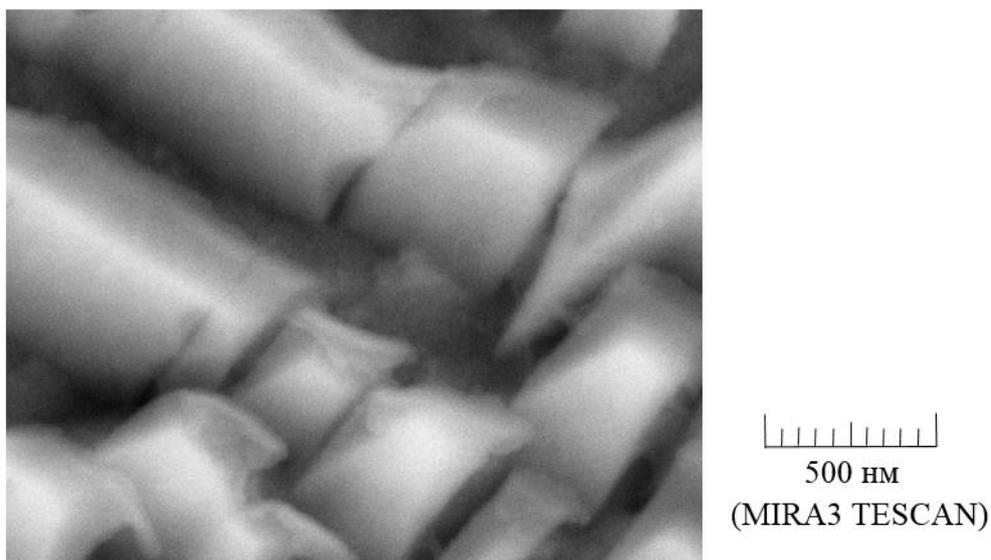


Рисунок 6 - Дробление цементитных пластин до ультрамелкозернистых размеров, в образце из стали 40X, упрочненном с $K=0,4$ на глубине 2,5 мкм, $\times 20000$

прочности, глубиной и степенью упрочнения материала, толщиной слоя с микроструктурными изменениями и коэффициентом перекрытия отпечатков для сталей 45 (1), 40X (2), 35ХГСА (3), соответственно:

$$\sigma_{\sigma} = 542,62 + 31,33\Delta H_{\mu} - 42,97h_{\mu} + 514,27h_{\text{мик.ст.}} + 225,24K, \quad (1)$$

$$\sigma_{\sigma} = 508 - 6,67\Delta H_{\mu} + 19,33h_{\mu} + 66,71h_{\text{мик.ст.}} + 90K, \quad (2)$$

$$\sigma_{\sigma} = 360,88 + 8,77\Delta H_{\mu} + 1,15h_{\mu} + 680h_{\text{мик.ст.}} - 150,05K. \quad (3)$$

где σ_{σ} – предел прочности, МПа;

ΔH_{μ} - степень упрочнения, %;

h_{μ} - глубина упрочнения, мм;

K – коэффициент перекрытия отпечатков;

$h_{\text{мик.ст}}$ – толщина слоя с микроструктурными изменениями, мм.

Пятая глава посвящена разработке модели комбинированных технологий ВДУ сварного шва и ВДУ выращенного электродуговым методом изделия, проведено исследование влияния температурного фактора на результаты упрочнения.

Разработка комбинированной конечно-элементной модели (КЭМ) процесса упрочнения сварных швов методом ВДУ проводилась в четыре этапа (рисунок 7). На первом этапе формировалась геометрия сварного изделия, сварного шва и инструмента для ВДУ. На втором этапе создавалась модель материала сварного шва. На третьем этапе решалась тепловая задача нагрева сварного шва, результатом которой являлся расчет остаточных напряжений, возникающих в сварной заготовке. На четвертом этапе полученный сварной шов подвергался ВДУ с различными режимами обработки разными типами инструментов.

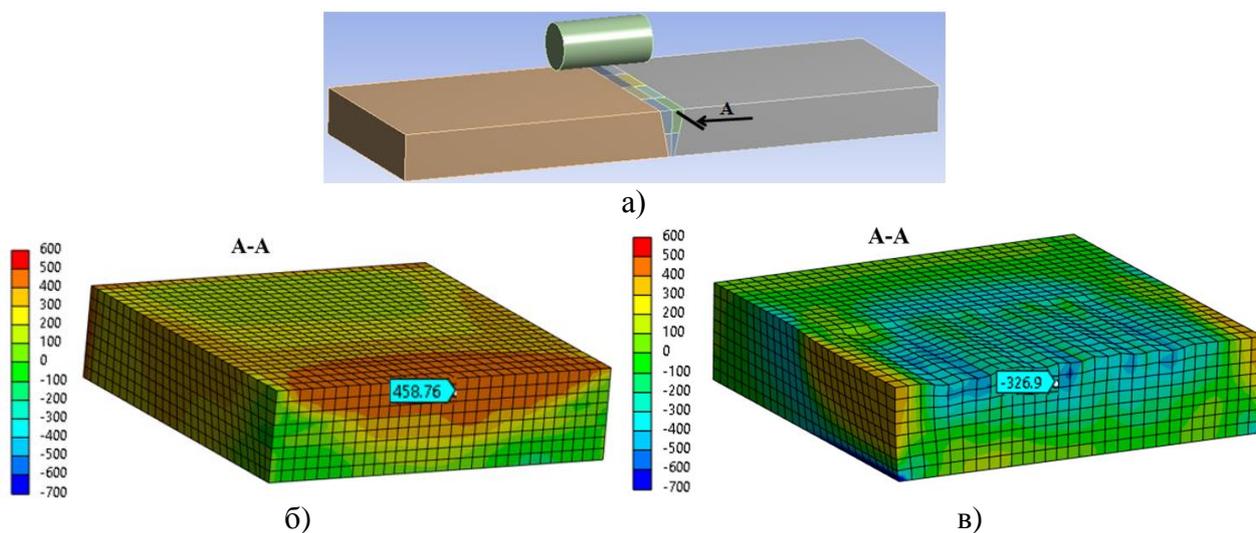


Рисунок 7 - Распределение в модели сварного шва остаточных напряжений, (МПа):
 а - пример схемы комбинированной КЭМ сварки и ВДУ; б - в образце после сварки;
 в - в сварном образце после ВДУ

Адекватность моделирования оценивалась сравнением данных моделирования и значений, полученных в результате натурного эксперимента, при одинаковых исходных условиях, посредством измерения распределения микротвердости в сечении сварного шва. Полученные теоретические данные по распределению микротвердости в поверхностном слое с удовлетворительной вероятностью (92 %) соответствуют экспериментальным значениям.

В эксперименте с КЭМ исследовались воздействия различных типов инструментов для ВДУ на сварные швы пластин из стали 40Х. ВДУ сварных швов проводилось с энергией 150 Дж с частотой ударов 10 Гц и с режимами, соответствующими коэффициентам перекрытия отпечатков $K = 0,3$ и $K = 0,6$. Установлена целесообразность использования ВДУ для повышения твердости,

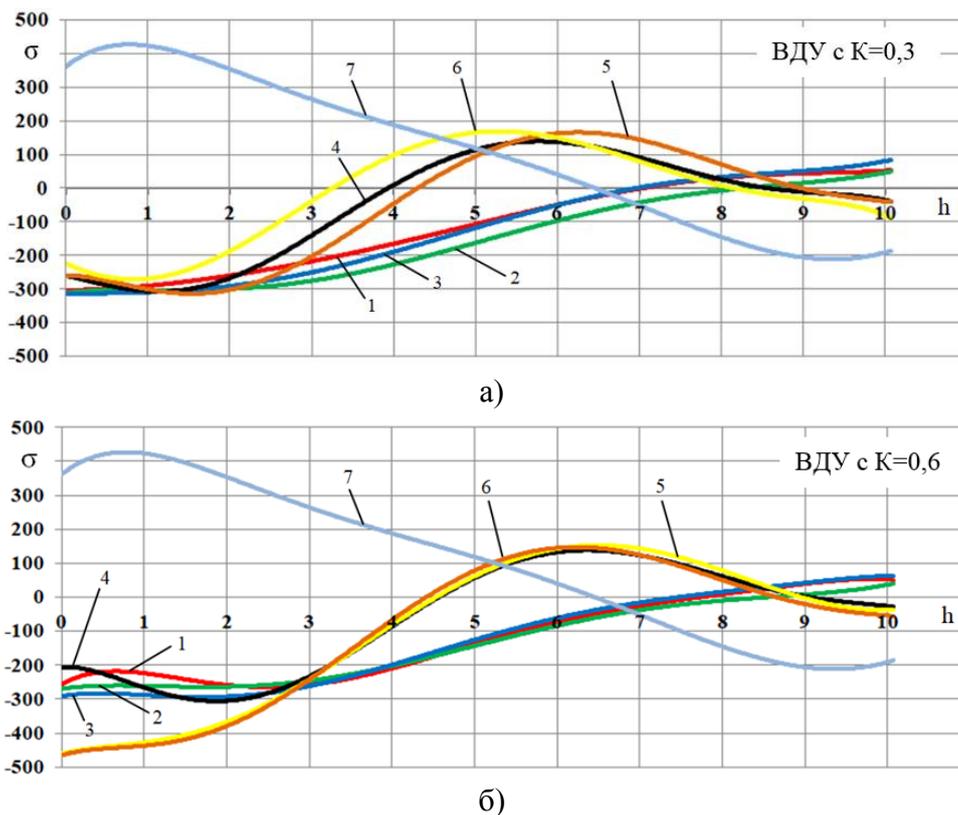


Рисунок 8 - Распределение остаточных напряжений (σ , МПа) по толщине сварного слоя (h , мм) при его ВДУ: 1 - роликом 10 мм; 2 - роликом 18 мм; 3 - роликом 27 мм; 4 - стержнями со сферическим торцом 12 мм; 5 - шарами 18 мм; 6 - шарами 27 мм; 7 - сварной шов без упрочнения: а - ВДУ с $K = 0,3$; б - ВДУ с $K = 0,6$

глубины упрочнения и обеспечения плавного перехода растягивающих напряжений в сжимающие в сварных швах и зоне термического влияния (рисунок 8).

Установлено, что в случае необходимости повышения твердости до 50 % зоны термического влияния сварных швов толщиной до 5 мм необходимо использовать в качестве инструмента шары диаметром 18 мм и проводить ВДУ по многоконтактной схеме с $K = 0,6$.

Установлено, что для повышения прочности сварных швов толщиной до 10 мм без значительного повышения твердости до 20 %, после сварки целесообразно использовать стержневые ролики диаметром 10 мм и проводить ВДУ с $K = 0,3 - 0,6$. Установлено, что, если приоритетом является не повышение твердости, а получение в поверхностном слое сварного шва глубиной до 10 мм максимально возможных остаточных напряжений сжатия, необходимо использовать ролик диаметром от 18 до 27 мм и применять ВДУ с $K = 0,3$.

Разработка КЭМ аддитивного синтеза по технологии WAAM/3DMP (Wire Arc Additive Manufacturing/3D Metal Print) и ВДУ проводилась в несколько этапов. В начале создавались: геометрия выращиваемого изделия, установочный стол, инструмент для упрочнения. Далее производилась разбивка геометрии выращиваемого изделия на слои (объем металла, наплавляемый за один проход горелки), и затем каждый слой разбивался на единичные наплавочные объемы, формируемые за единицу времени. Затем этим объемам присваивалась функция внутреннего нагрева «Internal Heat Generation»,

настраивалась «Element Birth and Death», задавались граничные условия и настройки решателя (рисунок 9). На следующем этапе встраивалась и настраивалась созданная модель процесса ВДУ. Разработанная КЭМ комбинированной технологии позволяет моделировать послойный синтез и упрочнение заданного объема материала, настраивать время выдержки для требуемого охлаждения выращенного материала (рисунок 10).

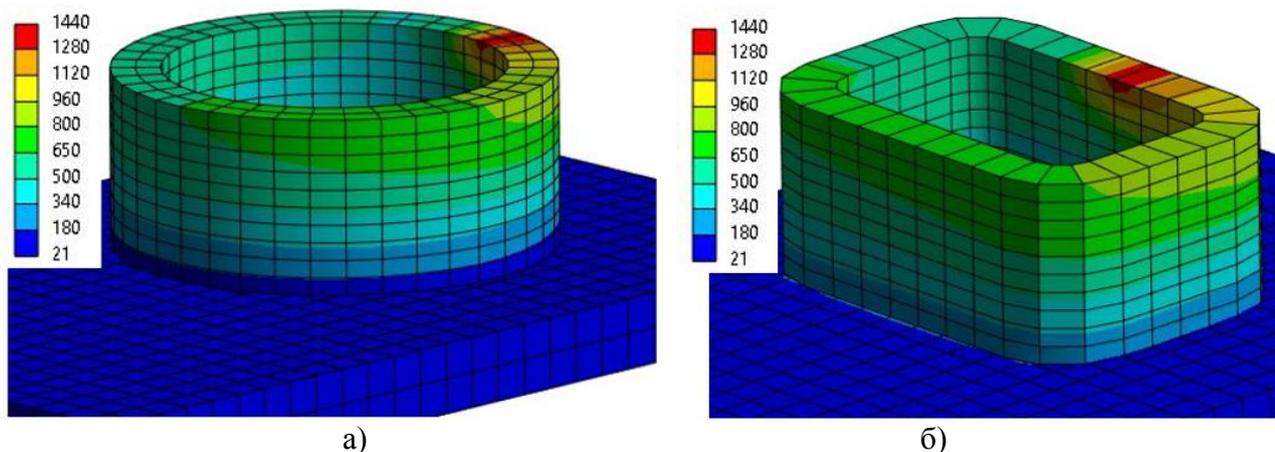


Рисунок 9 - Примеры распределения в оболочках температурных полей ($^{\circ}\text{C}$) через несколько секунд после завершения их синтеза: а – цилиндрической; б – коробчатой

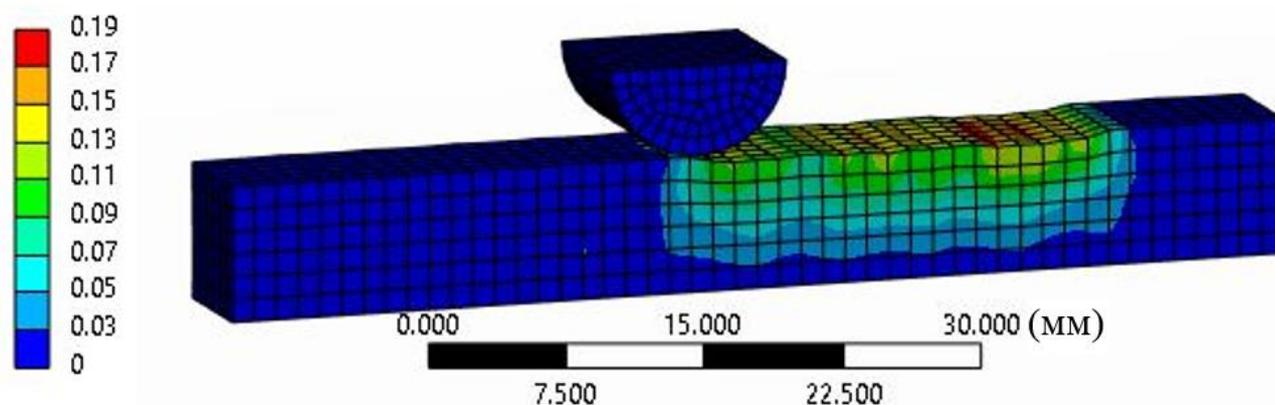


Рисунок 10 – Распределение Equivalent Plastic Stain (mm/mm) в процессе ВДУ трех наплавленных слоев при температуре $+300^{\circ}\text{C}$ с равномерностью упрочнения $K=0,4$

Исследования проводились на стали 04X19H9. Адекватность КЭМ WAAM/3DMP и ВДУ оценивалась: 1) сравнением размеров отпечатков ударов шаров в наплаваемый материал при его температурах $+20$, $+250$, $+500^{\circ}\text{C}$; 2) послойным сравнением данных тепловизора с формируемыми температурными полями в модели, полученными при аналогичных условиях. В результате сравнения установлено, что полученные теоретические данные с вероятностью 90% соответствуют экспериментальным значениям, а результаты расчета можно считать значимыми.

Исследованы температурные режимы синтезируемого изделия объемом (V_u), охлаждающегося путем отвода тепловых потоков через объем установочного стола (V_c) в диапазоне $30 \leq V_c / V_u \leq 100$. Разработанная комбинированная конечно-элементная модель процесса аддитивного синтеза

WAAM/3DMP, совмещенного с ВДУ, позволяет обоснованно определять рациональные значения временных и температурных параметров ВДУ, управлять температурными полями в изделии за счет целенаправленного обеспечения заданной скорости теплоотвода, выбора теплоемкости и размеров установочного стола, длительности пауз и холостых технологических переходов с учетом формы синтезируемого изделия.

Например, установлено, что: увеличение объемов наплавляемого материала в 3 раза приводит к снижению среднего значения максимальной температуры (T_{max}) на последнем наплавляемом слое, соответственно, у цилиндрических и (призматических) оболочек на 382 °С (509 °С); при этом цилиндрическая форма оболочки по сравнению с призматической приводит к снижению T_{max} для: наплавляемого объема $V_1 = 15000 \text{ мм}^3$ ($\varnothing_{нар} 35 \text{ мм}$) на 323 °С для; $V_2 = 30000 \text{ мм}^3$ ($\varnothing_{нар} 62 \text{ мм}$) на 250 °С; $V_3 = 45000 \text{ мм}^3$ ($\varnothing_{нар} 90 \text{ мм}$) на 196 °С.

Установлено значимое влияние температуры упрочняемого материала на степень и глубину упрочнения. Проведены экспериментальные исследования влияния на механические свойства материала температурного фактора - температуры материала при упрочнении и испытании.

Исследования выполнялись на образцах из сталей 12Х18Н10Т, 10ХСНД, 30ХГСА, 40Х при следующих параметрах: энергия удара 150 Дж; ударная система $L_1 / L_2 = 3$, $L_1 / d_1 = 5$; $K = 0,4$; инструмент - стержневой ролик ($\varnothing 10 \text{ мм}$ и длиной 60 мм); температуры материала перед ВДУ: +20; +200; +400; +500 °С; температуры при которых определялись механические свойства: -60 °С; +20 °С; +300 °С.

Установлено, что предварительный нагрев упрочняемого материала перед ВДУ, по сравнению с упрочнением материала комнатной температуры, позволяет повысить степень упрочнения до 44 %, глубину упрочнения до 71 %. Выявлены рациональные температуры нагрева образцов перед ВДУ, позволяющие повысить степень и глубину упрочнения, соответственно, на: 31% и 64 % для стали 12Х18Н10Т, ВДУ при температуре 200 °С; 43 % и 71 % для стали 10ХСНД, ВДУ при температуре 400 °С; 22 % и 33 % для стали 30ХГСА, ВДУ при температуре 200 °С; 44 % и 70 % для стали 40Х, ВДУ при температуре 400 °С.

В зависимости от материала и температуры эксплуатации изделия и исходя из условия максимально достижимого увеличения пределов текучести и прочности при снижении относительного удлинения не более чем до 50 %, а ударной вязкости - не более чем до 40 %, определены рациональные температуры начала ВДУ (°С) (таблица 2).

Выявлены возможности повышения пределов текучести и прочности и снижения относительного удлинения и ударной вязкости при исследовании взаимосвязи между температурой испытаний (эксплуатации) и механическими свойствами сталей (12Х18Н10Т, 10ХСНД, 30ХГСА, 40Х) после их ВДУ с предварительным нагревом и без него (рисунок 11).

При анализе влияния предварительного нагрева перед ВДУ на механические свойства сталей 12Х18Н10Т, 30ХГСА, 10ХСНД и 40Х установлено, что во всем

Таблица 2 – Температура ВДУ (°С)

Сталь	Температура эксплуатации изделия, °С		
	-60	+20	+300
12X18H10T	20	200	200
10XСНД	400	400	400
30XГСА	20	20	20
40X	400	400	400

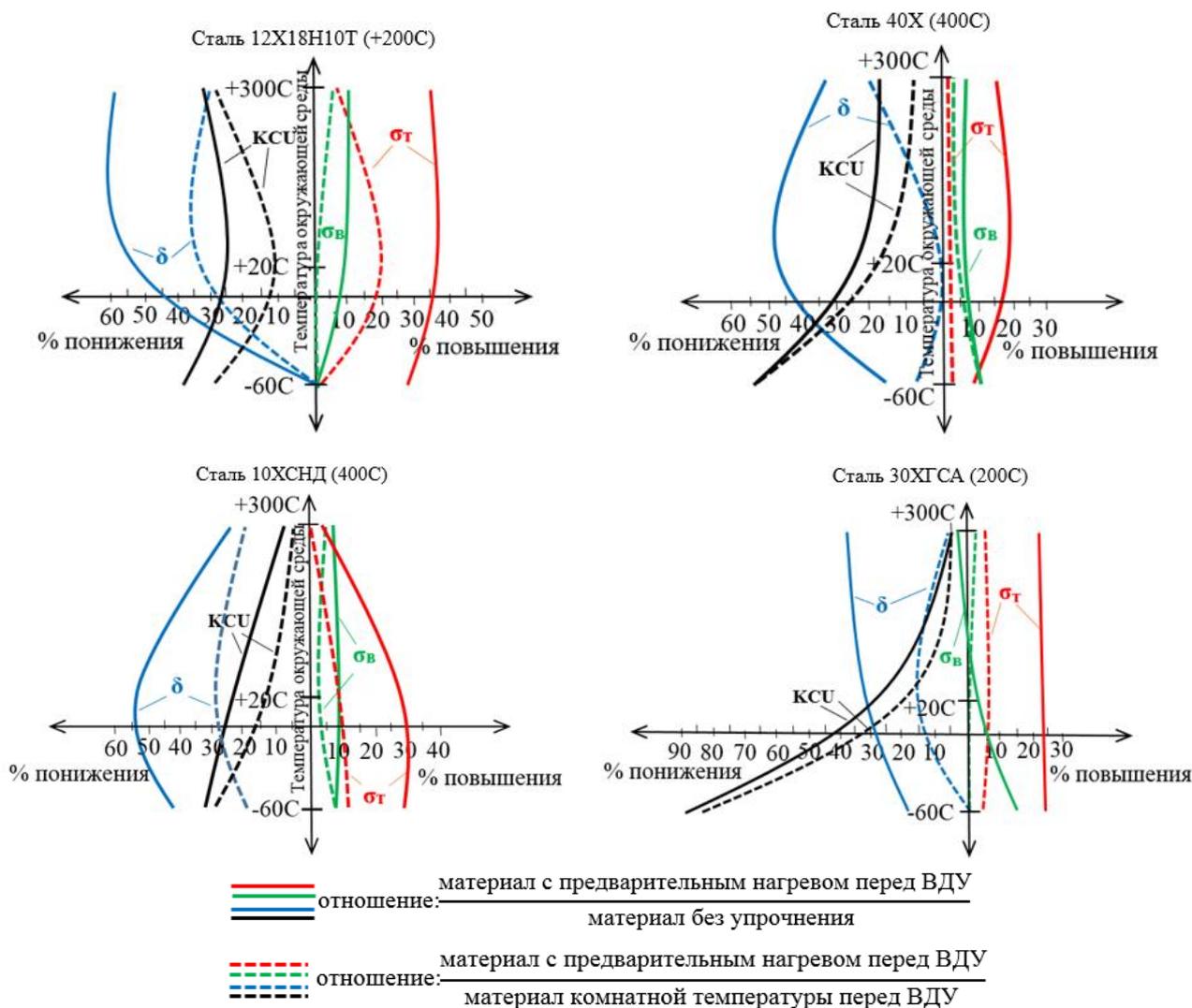


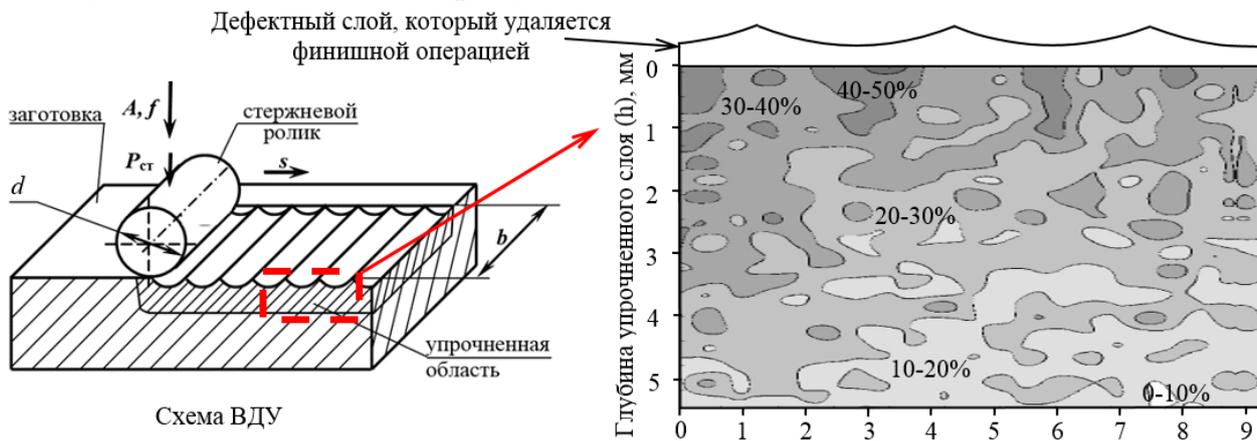
Рисунок 11 - Взаимосвязь пределов текучести и прочности, относительного удлинения, ударной вязкости с окружающей температурой и механическими свойствами после их ВДУ с предварительным нагревом и без него

диапазоне температур испытаний (- 60 °С, + 20 °С, + 300 °С) наблюдается значительное увеличение прочностных характеристик (σ_T и σ_B) при одновременном снижении пластических свойств (KCU и δ). Максимальный прирост прочности отмечается при низких температурах (- 60 °С): для сталей 30XГСА и 40X σ_T возрастает на 50 - 70 %, а σ_B – на 40 - 60 %; для 12X18H10T повышение составляет 40 - 50 % для σ_T и 30 - 40 % для σ_B ; для 10XСНД – 40 - 60% для σ_T и 30 - 50 % для σ_B . При комнатной температуре (+ 20 °С) рост прочностных характеристик остается значительным: σ_T увеличивается на 30 - 60%, а σ_B – на 20 - 50 %. При высоких температурах (+ 300 °С) эффект

уменьшается, но сохраняется на уровне 20 - 50 % для σ_T и 10 - 40 % для σ_B . Ударная вязкость (KCU) снижается сильнее при повышении температуры испытаний: на 15 - 50 % для всех сталей, причем наибольшее падение характерно для 30ХГСА и 40Х. Относительное удлинение (δ) также ухудшается с повышением температуры: на 10 - 40 %, причем максимальное снижение пластичности наблюдается при +300 °С. Таким образом, предварительный нагрев перед ВДУ существенно улучшает прочностные характеристики всех исследуемых сталей, но приводит к ухудшению пластичности и ударной вязкости, особенно заметному при высоких температурах испытаний.

В шестой главе выполнялись экспериментальные исследования влияния ВДУ на эксплуатационные свойства: сопротивление контактному выкрашиванию, циклическую прочность сварных швов, коррозионную стойкость.

Установлено, что вследствие волнового интерференционного механизма ВДУ, глубокий поверхностный слой монолитного материала детали получает гетерогенное упрочнение в виде совокупности чередующихся более твердых и более вязко-пластичных областей, что способствует повышению эксплуатационных свойств (рисунок 12).



Распределение упрочненных областей ширине образца (t), мм

Рисунок 12 - Гетерогенное распределение упрочненных областей (степеней упрочнения, %) после ВДУ, на примере упрочнения стали 40Х, с энергией ударов 70 Дж, $K=0,3$: A – энергия ударов, Дж; $P_{ст}$ – статическая сила поджатия, Н; f – частота ударов, Гц; d – диаметр ролика, мм; l – ширина ролика, мм; s – скорость подачи заготовки, мм/с

Предложено оценивать гетерогенность упрочнения посредством параметров относительной опорной твердости $L_{\Delta H}^h$ и относительного количества локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$. Исследования сопротивления контактному выкрашиванию (ΔI) нескольких видов упрочненных ВДУ сталей проводились на специально разработанном стенде, который позволяет циклически нагружать исследуемую поверхность сферическими контртелами. ΔI – это параметр, позволяющий качественно и количественно сравнить величины выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной.

В результате испытаний установлены технологические режимы ВДУ, позволяющие повысить сопротивление контактному выкрашиванию изделий: из стали 45 в 4...6 раз, из стали 40Х в 2...2,3 раз, из стали 35ХГСА в 2,1...2,8

раз. Как правило, ВДУ с $K = 0,4$ обеспечивает наилучшие результаты, однако, с увеличением удельной энергии удара, диапазон эффективных значений ΔI смещается в сторону меньшего значения коэффициента перекрытия, что связано с увеличением очага деформации под единичным отпечатком.

Даже при цементации и закалке после ВДУ имеет место благоприятная технологическая наследственность гетерогенного упрочнения, а технология комбинированного упрочнения ВДУ+ХТО (цементация) обеспечивает кратное увеличение сопротивления контактному выкрашиванию ΔI для стали 20Х2Н4А до 2,5 раз.

На основании анализа результатов испытаний ΔI и карт распределения микротвердости в данных образцах установлена взаимосвязь между сопротивлением контактному выкрашиванию и параметрами гетерогенности упрочнения:

- у стали 45 ΔI 4 – 6 раз может быть обеспечено при преобладающей степени упрочнения ΔH 45 - 55 % с $L_{\Delta H}^h$ от 55 до 70 % и $N_{\Delta H}^h$ от 2,5 до 3,1 шт/мм;
- у стали 40Х ΔI 2 – 2,3 раз при ΔH 50 - 70 % с $L_{\Delta H}^h = 53-70$ % и $N_{\Delta H}^h = 0,9-1,5$ шт/мм;
- у стали 35ХГСА ΔI 2,1 – 2,8 раз при ΔH 50 - 120 % с $L_{\Delta H}^h = 30 - 50$ % и $N_{\Delta H}^h = 0,4 - 1,1$ шт/мм.

Получены модели, описывающие взаимосвязь параметров гетерогенности и сопротивления контактному выкрашиванию для сталей 45 (4), 40Х (5), 35ХГСА (6).

$$\Delta I = 4,12727 - 0,086158\Delta H + 0,009446L_{\Delta H}^h + 1,15528N_{\Delta H}^h \quad (4)$$

$$\Delta I = 1,306093 - 0,009794\Delta H + 0,009218L_{\Delta H}^h + 0,623352N_{\Delta H}^h \quad (5)$$

$$\Delta I = 2,034601 - 0,002843\Delta H + 0,003638L_{\Delta H}^h - 0,260304N_{\Delta H}^h \quad (6)$$

Исследование циклической прочности сварных швов проводилась на серво-гидравлической испытательной машине Torsion 10, позволяет производить статическое и усталостное нагружение кручением с помощью высокомоментного гидромотора. Исследовалось поведение материала, работающего в области малоциклового усталости (не более $5 \cdot 10^4$; циклов) в условиях симметричного нагружения при циклическом скручивании. Оценивали число циклов нагружения до разрушения. В результате исследований установлено, что в условиях знакопеременных нагрузок, повышается прочность сварных швов после ВДУ (сталь 10ХСНД; 09Г2С; 30ХГСА), соответственно, в 2,9; 2; 1,7 раза по сравнению со сварными образцами без упрочнения и в 3,5; 2,3; 2,4 раза, соответственно, по сравнению с материалами без сварки и упрочнения. ВДУ способствует кратному повышению отношения допустимого числа циклов нагружения к числу циклов, при которых появилась первая трещина – t . Для образцов из сталей 10ХСНД; 09Г2С; 30ХГСА значение t после ВДУ, соответственно, 5; 4,5; 3,2. Для образцов со сварными швами без ВДУ - t , соответственно, 2,9; 1,6; 2,7. У материалов без сварки и упрочнения, значение t , соответственно, 2,3; 1,8; 2,4. В результате для всех исследованных сталей наблюдалось значительное увеличение числа циклов до разрушения после ВДУ, как по сравнению с

неупрочненными сварными образцами, так и с материалами без сварки и упрочнения. Наиболее заметный эффект от упрочнения достигнут для стали 10ХСНД, где прочность увеличилась в 2,9 раза по сравнению со сварными образцами без упрочнения и в 3,5 раза относительно материала без швов, а также значительно выросло отношение допустимого числа циклов к моменту появления первой трещины ($t = 5$). Таким образом, применение ВДУ является эффективным методом повышения долговечности сварных конструкций при циклических нагрузках.

Исследование коррозионной стойкости образцов после ВДУ выполнялось на установке для проведения коррозионных испытаний в соляном тумане S1000. В процессе испытаний оценивалась потеря массы образцов. В результате исследований установлена взаимосвязь между степенью упрочнения и коррозионной стойкостью обработанных ВДУ материалов. Так, при небольшой степени упрочнения ($\Delta HV = 9,5$ %) коррозионная стойкость упрочненного материала относительно неупрочненного снижается на 35 %. Средняя степень упрочнения ($\Delta HV = 21$ %) не повлияла на коррозионную стойкость. Повышение степени упрочнения с 27 до 43 % способствует повышению коррозионной стойкости в 1,6 раза. В связи с более высокой степенью упрочнения при росте значения коэффициента перекрытия отпечатков, ВДУ с $K = 0,6$ по сравнению с $K = 0,3$ обеспечивает повышение коррозионной стойкости на 11,3 %.

Сформулированы общие технологические рекомендации. Выполнена производственная апробация предлагаемых решений с применением технологии ВДУ, в том числе в составе комбинированных технологий. Работа апробирована на предприятиях ряда регионов РФ с суммарным ожидаемым экономическим эффектом более 7,4 млн руб.

Общие технологические рекомендации

1. Рекомендации по выбору параметров ударной системы для ВДУ с КПД (η) более 80%:

1.1. без ограничения длины и массы ударной системы и с ограничением: суммарной длины < 1000 мм; массы < 15 кг; диаметра бойка и волновода до 60 мм (таблица 3).

Таблица 3

Соотношения геометрических параметров ударной системы					
без ограничения длины и массы уд. системы			с ограничением длины и массы уд. системы		
$d_1 = d_2$	L_1 / d_1	L_1 / L_2	$d_1 = d_2$	L_1 / d_1	L_1 / L_2
30...48	10	1...5	св. 30	10	1...3
48...90	5...10	1...10	св. 48	5...10	1...3
			до 60	5	1...3

1.2. в зависимости от марки обрабатываемого материала (таблица 4).

Таблица 4

Обрабатываемый материал	Сталь	Титановые сплавы	Бронза	Алюминиевые сплавы
Рекомендуемое отношение длин бойка и волновода L_1 / L_2	3...5	3...5	3...5	5

2. Рекомендации по выбору схемы ВДУ и инструмента в зависимости от исходной твердости обрабатываемого материала (таблица 5).

Таблица 5

Твердость, <i>HV</i>	Схема ВДУ	Тип инструмента	Число инструментов, шт
> 230	одноконтактная	стержневой ролик Ø 10 мм	1
< 230	многоконтактная	инденторы с торцом Ø 6 мм	3...5

3. Рекомендации по температуре нагрева упрочняемого материала перед ВДУ (таблица 6) и формируемым механическим свойствам при разной температуре эксплуатации (таблица 7) (выделено зеленым маркером).

Таблица 6

Марка стали	Температура ВДУ*, °C	$\Delta HV / \Delta HV_{20}$	h / h_{20}
12X18H10T	200	1,31	1,64
	400	1	1,67
	500	1,03	1,48
30XГСА	200	1,22	1,33
	400	1,05	1,23
	500	1,03	1,19
10XСНД	200	1,34	1,51
	400	1,43	1,71
	500	1,37	1,5
40X	200	1,13	1,65
	400	1,44	1,7
	500	1,49	1,66

(индексы ΔHV_{20} ; (h_{20}) обозначают, что значения степени и глубины упрочнения принадлежат материалу, упрочненному при температуре +20 °C)

Таблица 7

Марка стали	Температура образцов перед ВДУ*, °C	σ_m / σ_{m0}			σ_6 / σ_{60}			δ / δ_0			KCU / KCU ₀		
		Температура эксплуатации, °C											
		-60	+20	+300	-60	+20	+300	-60	+20	+300	-60	+20	+300
12X18H10T	20	1,34	1,27	1,42	0,98	1,10	1,09	1,01	0,68	0,59	0,92	0,80	0,97
	200	1,35	1,56	1,52	0,98	1,10	1,14	1,01	0,44	0,41	0,64	0,74	0,70
	400	1,34	1,32	1,37	0,98	1,10	1,04	1,01	0,44	0,38	0,64	0,54	0,70
30XГСА	20	1,24	1,23	1,22	1,17	1,01	0,94	0,82	0,81	0,67	0,75	0,90	0,92
	200	1,29	1,31	1,28	1,16	1,00	0,96	0,82	0,69	0,63	0,11	0,73	0,88
	400	1,29	1,29	1,27	1,15	1,02	0,97	0,32	0,50	0,58	0,08	0,65	0,84
10XСНД	20	1,22	1,25	1,04	1,00	1,07	1,02	0,71	0,66	0,95	0,97	0,88	0,97
	200	1,31	1,27	1,07	1,04	1,07	1,06	0,64	0,63	0,95	0,96	0,85	0,88
	400	1,40	1,45	1,02	1,08	1,12	1,06	0,57	0,47	0,77	0,75	0,78	0,92
40X	20	1,07	1,22	1,17	1	1,05	1,04	0,78	0,59	0,83	0,90	0,93	0,89
	200	1,09	1,23	1,16	1,08	1,07	1,07	0,78	0,59	0,67	0,65	0,79	0,82
	400	1,09	1,23	1,13	1,14	1,06	1,04	0,80	0,59	0,67	0,45	0,77	0,83
	500	1,08	1,15	1,13	1,11	1,06	1,04	0,63	0,56	0,67	0,29	0,67	0,82

(индексом 0 обозначаются характеристики неупрочненного материала)

*Параметры ударной системы: $L_1 / L_2 = 3$, $L_1 / d_1 = 5$; режим ВДУ: удельная энергия $a = 2,5$ Дж/мм, $K=0,4$, $f=10$ Гц; тип инструмента: стержневой ролик Ø 10 мм.

4. Рекомендации по ВДУ* сварных швов (таблица 8).

Таблица 8

Толщина сварного шва	Результат упрочнения	Тип инструмента для ВДУ	Коэф. перекрытия, К	Схема ВДУ
до 5 мм	Повышение твердости зоны термического влияния сварного шва до 50%	шары \varnothing 18 мм	0,6	многоконтактная
до 10 мм	Повышение прочности сварного шва	стержневой ролик \varnothing 10 мм	0,3...0,6	одноконтактная
до 10 мм	Максимальные остаточные напряжения сжатия	стержневой ролик \varnothing 18–27 мм	0,3	одноконтактная

*Параметры ударной системы: $L_1 / L_2 = 3$, $L_1 / d_1 = 5$; режим ВДУ: удельная энергия $a = 3,75$ Дж/мм, частота $f = 10$ Гц.

5. Рекомендации по сквозному ВДУ* при синтезе образцов призматической формы (таблица 9).

Таблица 9

Число одновременно упрочняемых слоев, шт	Толщина, мм	Энергия ударов, Дж	Температура упрочняемого материала, °С
1	2,5	20	+24; +300
		25	+24
2	5	25	+300
		30	+24; +300
3	7,5	35...40	+24; +300

*Параметры ударной системы: $L_1 / L_2 = 3$, $L_1 / d_1 = 5$; режим ВДУ: частота $f = 10$ Гц, коэф. перекрытия $K=0,4$; толщина стенки образца 7 мм; ролик \varnothing 10 мм.

6. Рекомендации по «универсальному» режиму ВДУ стальных изделий, позволяющему повысить несколько эксплуатационных свойств (*сопротивление контактному выкрашиванию до 6 раз; коррозионную стойкость до 1,6 раза; прочность сварных швов в условиях знакопеременных нагрузок до 3,5 раз (при этом до 5 раз отсрочить время появления первой усталостной трещины в материале)*)
 Параметры ударной системы: $L_1 / L_2 = 3$, $L_1 / d_1 = 5$; режим ВДУ: удельная энергия $a = 2,5 - 6$ Дж/мм; частота $f = 9 - 14$ Гц; коэффициент перекрытия $K = 0,3 - 0,4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной научно-квалификационной работе приведены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение механических и эксплуатационных свойств крупных ресурсопределяющих деталей волновым деформационным упрочнением, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

1. Выделен класс нуждающихся в глубоком упрочнении крупногабаритных ресурсопределяющих деталей, в т.ч.: валки прокатных

станов, корпуса и детали атомных реакторов, крупные детали ракетно-космической техники, крупные зубчатые колеса и подшипники качения, специальные изделия двойного назначения. Установлена целесообразность применения технологии волнового деформационного упрочнения (ВДУ) или комбинированных технологий сварки и наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ и выявлены направления ее совершенствования.

2. Разработана конечно-элементная модель ударной системы с промежуточным звеном, выявлены условия энергетической эффективности ВДУ и уточнены рекомендации, касающиеся выбора рациональных параметров элементов ударной системы - бойка и волновода:

- ударные системы с параметрами: $30 < d_1 = d_2 < 90$ мм, $1 < L_1 / L_2 < 10$, $5 < L_1 / d_1 < 10$ обеспечивают передачу коэффициента полезного действия (η) более 80 % энергии ударного импульса в очаг деформации;

- применение ударных систем с диаметром бойка (d_1) и волновода (d_2) более 60 мм нецелесообразно, так как уровень технической сложности растет быстрее, чем энергетическая эффективность, а использование ударных систем с отношением $1 < L_1 / L_2 < 3$ длин бойка (L_1) и волновода (L_2) при диаметрах $d_1 = d_2 = 30$ мм, отношением $L_1 / d_1 = 10$ ($d_1 = d_2 = 48$ мм, $5 < L_1 / d_1 < 10$; $d_1 = d_2 = 60$ мм; $L_1 / d_1 = 5$) обеспечивает η более 80 %.

3. Установлено, что влияние материала среды нагружения на эффективность передачи энергии составляет: 1-3 % если η более 80 %; 6-10 % если η менее 60 %, однако, для обработки изделий из стали, титановых сплавов и бронз целесообразно использовать ударные системы $L_1 / L_2 = 3 \dots 5$, так как они при существенно меньшей длине (длина ударной системы $L_1 / L_2 = 3$ на 50 % меньше, чем у $L_1 / L_2 = 5$) обеспечивают на 7,3 % большую степень и на 9,5 % большую глубину упрочнения, чем $L_1 / L_2 = 10$, а для обработки изделий из алюминиевых сплавов - ударные системы $L_1 / L_2 = 5$, так как они по сравнению с ударными системами $L_1 / L_2 = 10$ и $L_1 / L_2 = 3$ обеспечивают большую степень/глубину упрочнения, соответственно, на 34 и 12 / 23 и 29 %.

4. Установлена эффективность одноконтактной схемы ВДУ для обработки широкого спектра изделий и материалов и многоконтактных схем ВДУ для изделий из пластичных материалов ($HB < 230$), при которых следует увеличивать количество инденторов с уменьшением твердости материала и устанавливать их с зазором для увеличения производительности обработки без снижения параметров упрочнения. При увеличении зазора между инструментами в диапазоне 1 – 3 мм производительность обработки возрастает на 15 – 25 %.

5. Разработана конечно-элементная модель ВДУ деталей с конечными размерами, выявлены закономерности влияния на параметры упрочнения масштабного фактора - наличия полостей, формы и размеров образцов:

- установлено, что при равных объемах и толщине образцов, одинаковых режимах ВДУ, прямоугольная форма образцов способствует повышению степени упрочнения до 7 %, глубины упрочнения до 20 %, по сравнению с треугольными и цилиндрическими образцами;

- наличие в образце пазов и полостей усиливает эффект ВДУ, повышение степени упрочнения зависит от размеров полостей и материала изделия: сталь - до 10...110 %; бронза - до 50...220 %, причем степень упрочнения материала над полостями выше, чем у рядом расположенных областей на 10 - 30 % в стальных образцах, на 10 - 60 % - в бронзовых, а материал, расположенный под полостями, также упрочняется, при этом прямоугольная форма полости по сравнению с треугольной и цилиндрической, обеспечивает повышение степени упрочнения образцов из: бронзы на 8 %, титана и стали на 4 %, алюминия 21 %;

- установлены минимально необходимые размеры образцов (длина × ширина × высота) - 150×40×20 мм для получения адекватных результатов при экспериментальном исследовании параметров упрочнения ВДУ крупногабаритных деталей, для образцов меньших размеров предложены значения корректирующих коэффициентов.

6. Установлена взаимосвязь между режимами ВДУ, параметрами прочности, микро- и ультрамелкозернистыми размерными изменениями в структуре среднеуглеродистых сталей 35ХГСА, 40Х, 45.

7. Разработана комбинированная конечно-элементная модель ВДУ сварного шва, выявлены закономерности влияния числа, типа и размеров инструментов на повышение степени и глубины упрочнения, формирования остаточных напряжений сжатия в сварном шве и околошовной зоне термического влияния. Установлено, что:

- для повышения твердости до 50 % зоны термического влияния сварных швов толщиной до 5 мм необходимо использовать в качестве инструмента шары диаметром 18 мм и реализовывать многоконтактную схему ВДУ с коэффициентом перекрытия отпечатков $K=0,6$;

- для повышения прочности сварных швов толщиной до 10 мм без значительного снижения твердости (до 20 %) после сварки, целесообразно реализовывать одноконтактную схему ВДУ стержневым роликом диаметром 10 мм с $K = 0,3 - 0,6$;

- для получения в поверхностном слое сварного шва толщиной до 10 мм максимально возможных остаточных напряжений сжатия, необходимо применять одноконтактную схему ВДУ с $K = 0,3$ и использовать ролик диаметром 18 – 27 мм.

8. Разработана комбинированная конечно-элементная модель процесса аддитивного синтеза WAAM/3DMP, совмещенного с ВДУ, позволяющая обоснованно определять рациональные значения временных и температурных параметров ВДУ, управлять температурными полями в изделии за счет целенаправленного обеспечения заданной скорости теплоотвода, выбора теплоемкости и размеров установочного стола, длительности пауз и холостых технологических переходов с учетом формы синтезируемого изделия. Установлено, что увеличение объемов наплавленного материала, а также цилиндрическая форма оболочки по сравнению с коробчатой, способствует снижению максимальной температуры синтезируемого слоя.

9. Выполнены экспериментальные исследования влияния ВДУ на прочность, пластичность и ударную вязкость при влиянии температурного фактора - температуры ВДУ в диапазоне 20...500 °С, а также температуры

испытаний (эксплуатации деталей из сталей 12Х18Н10Т, 10ХСНД, 30ХГСА, 40Х), на механические свойства материала после ВДУ. Установлено, что:

- при обработке ВДУ при 20 °С образцов толщиной 7 мм из сталей 45, 40Х, 35ХГСА достигается увеличение предела прочности материала соответственно на 8, 13 и 5,8 %;

- предварительный нагрев образца до 200...400 °С перед ВДУ в зависимости от марки упрочняемого материала, способствует повышению степени упрочнения на 22...44 %, глубины упрочнения - на 33...71 %;

- для условий эксплуатации деталей в температурном интервале -60...+300 °С выявлены рациональные режимы ВДУ нагретого до 200...400 °С материала, которые по сравнению с ВДУ при + 20 °С, обеспечивают (в среднем) повышение пределов текучести и прочности на 35 - 45 % при снижении пластичности и ударной вязкости на 20 - 30 %.

10. Установлено, что вследствие интерференционного волнового характера ВДУ:

- глубокий поверхностный слой монолитного материала детали получает гетерогенное упрочнение в виде совокупности чередующихся более твердых и более вязко-пластичных областей, что способствует повышению эксплуатационных свойств, неравномерность которого предложено оценивать посредством параметров относительной опорной твердости и относительного количества локальных упрочненных участков на базовой длине;

- упрочняется не только контактная, но и опорная поверхности, в зависимости от материала изделия степень и глубина упрочнения контактной поверхности больше аналогичных параметров опорной поверхности, соответственно: в 1,4...5,1 / 1,3...5,7 раза (для стали 1,9...2,6). Наиболее сильно параметры упрочнения контактной и опорной поверхностей отличаются для бронз, менее всего – для алюминиевых сплавов;

- на характер упрочнения при ВДУ влияет направление волокон исходной макроструктуры детали: при совпадении направления волокон с направлением деформационного воздействия образец упрочняется по всему сечению преимущественно вдоль волокон, но степень упрочнения материала меньше, по сравнению с деформационным воздействием поперек волокон (глубина упрочненного слоя со степенью упрочнения не менее 50 % составляет не менее 3 мм); выявлена уникальная способность ВДУ при определенных условиях обработки кардинально изменять технологическую наследственность путем дробления волокон исходной макроструктуры и дрейфа твердых структурных составляющих к контактной и опорной поверхностям.

11. Установлены технологические режимы ВДУ, позволяющие повысить сопротивление контактному выкрашиванию (ΔI) изделий: из стали 45 в 4...6 раз, из стали 40Х в 2...2,3 раз, из стали 35ХГСА в 2,1...2,8 раз. Как правило, ВДУ с коэффициент перекрытия отпечатков $K = 0,4$ обеспечивает наилучшие результаты, однако, с увеличением удельной энергии удара, диапазон эффективных значений ΔI смещается в сторону меньших значений K . Установлена взаимосвязь между ΔI и параметрами гетерогенности упрочнения. Даже при цементации и закалке после ВДУ имеет место благоприятная

технологическая наследственность, а технология комбинированного упрочнения ВДУ+ХТО (цементация) обеспечивает кратное увеличение Δl .

12. Установлено, что в условиях знакопеременных нагрузок, имеет место повышение прочности сварных швов после ВДУ сталей 10ХСНД; 09Г2С; 30ХГСА, соответственно, в 2,9; 2; 1,7 раза по сравнению со сварными образцами без упрочнения и в 3,5; 2,3; 2,4 раза, соответственно, по сравнению с материалами без сварки и упрочнения. ВДУ способствует кратному повышению отношения (t) допустимого числа циклов нагружения к числу циклов, при которых появилась первая трещина. Для образцов из сталей 10ХСНД; 09Г2С; 30ХГСА значение t после ВДУ, соответственно, 5; 4,5; 3,2. Для образцов со сварными швами без ВДУ - t , соответственно, 2,9; 1,6; 2,7. У материалов без сварки и упрочнения, значение t , соответственно, 2,3; 1,8; 2,4.

13. Установлена взаимосвязь между степенью упрочнения и коррозионной стойкостью обработанных ВДУ материалов. При небольшой степени упрочнения ($\Delta HV = 9,5$ %) коррозионная стойкость упрочненного материала относительно неупрочненного снижается на 35 %. Средняя степень упрочнения ($\Delta HV = 21$ %) не повлияла на коррозионную стойкость. Повышение степени упрочнения с 27 до 43 % способствует повышению коррозионной стойкости в 1,6 раза. В связи с более высокой степенью упрочнения при росте значения коэффициента перекрытия отпечатков, ВДУ с $K = 0,6$ по сравнению с $K = 0,3$ обеспечивает повышение коррозионной стойкости на 11,3 %.

14. Выявлен «универсальный» режим ВДУ, позволяющий повысить сразу несколько эксплуатационных свойств: сопротивление контактному выкрашиванию до 6 раз; коррозионную стойкость до 1,6 раза; прочность сварных швов в условиях знакопеременных нагрузок до 3,5 раз (при этом до 5 раз отсрочить время появления первой усталостной трещины в материале). Разработаны технологические рекомендации по обеспечению ВДУ требуемых показателей качества поверхностного слоя, механических и эксплуатационных свойств.

15. На промышленных предприятиях различных регионов Российской Федерации выполнена производственная апробация предлагаемых решений на базе технологии ВДУ, в том числе при ее комбинировании с технологическими процессами сварки и наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP). Суммарный ожидаемый экономический эффект более 7,4 млн руб.

16. Перспективы дальнейшего развития темы связаны с проведением более глубоких исследований влияния ВДУ на микроструктуру на уровне электронной микроскопии, расширением области применения разработанных методик на новые материалы и типы изделий, а также изучением влияния ВДУ на более широкий спектр эксплуатационных свойств.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

Справочники и книги

1. Повышение энергетической эффективности волнового деформационного упрочнения поверхностного слоя деталей моделированием напряженно-деформированного состояния элементов ударной системы и очага деформации / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин // Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / под ред. С. А. Зайдеса. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2022. – С. 30–50.

2. Повышение контактной выносливости гетерогенным волновым деформационным упрочнением / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов, Д. Е. Тарасов // Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / под ред. С. А. Зайдеса. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2022. – С. 438–460.

3. Устройства для деформационного упрочнения деталей машин комбинированным статико-импульсным воздействием / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов, Д. Е. Тарасов // Прогрессивные узлы и агрегаты технологических машин / под ред. А. В. Киричека. – Москва : Спектр, 2012. – С. 232–265.

4. Исследование контактного выкрашивания поверхностей деталей машин / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов, Д. Е. Тарасов // Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий / под ред. А. В. Киричека. – Москва : Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 294–332.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

5. Баринов, С. В. Масштабный эффект волнового деформационного упрочнения / С. В. Баринов // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 9. – С. 21–26. – DOI: 10.30987/2782-5957-2024-9-21-26. **(K-2)**

6. Баринов, С. В. Исследование возможностей повышения комплекса эксплуатационных свойств волновым деформационным упрочнением / С. В. Баринов // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 11. – С. 32–40. – DOI: 10.30987/2223-4608-2024-32-40. **(K-2; RSCI)**

7. Баринов, С. В. Исследование влияния волн деформации на прочность сварных швов в условиях знакопеременных нагрузок / С. В. Баринов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2024. – № 12. – С. 531–538 – DOI 10.36652/1813-1336-2024-20-12-531-538. **(K-1; RSCI)**

8. Киричек, А. В. Оценка влияния пластической деформации на коррозионную стойкость сталей / А. В. Киричек, С. В. Баринов, Н. А. Куканова // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103, № 10. – С. 853–858. – DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-10-853-858. **(K-1; RSCI)**

9. Перспективы применения волнового деформационного упрочнения сварных швов корпусов ядерных реакторов / М. Е. Жидков, А. В. Киричек, В. А. Лебедев [и др.] // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 11. – С. 24–30. – DOI: 10.30987/2782-5957-2024-11-24-30. **(K-2)**

10. Киричек, А.В. Исследование влияния волнового деформационного упрочнения на коррозионную стойкость материала / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.А. Зайцев, Н.А. Куканова // Вестник машиностроения. - 2024. - Т. 103, № 12. - С. 1003-1007. - DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-12-1003-1007. **(K-1; RSCI)**

11. Киричек, А.В. Подходы к моделированию волнового деформационного упрочнения / А.В. Киричек, С.В. Баринов, К.Ю. Андросов, А.В. Греченева // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2024. - № S4. - С. 89-95. - DOI: 10.52261/02346206_2024_4с_89. **(K-1; RSCI)**

12. Киричек, А.В. Разработка и верификация моделей материалов при моделировании процессов волнового деформационного упрочнения и аддитивного синтеза (3DMP) / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2024. - Т. 91, № 6. - С. 611-618. - DOI: 10.17816/0321-4443-637300. **(K-1; RSCI)**

13. Киричек, А.В. Расчет температурных полей на основе конечно-элементной модели процесса аддитивного синтеза изделия / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Греченева // Прикладная информатика. - 2024. - Т. 19, № 6(114). - С. 113-128. - DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128. **(K-1; RSCI)**

14. Киричек, А.В. Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий / А.В. Киричек, О.Н. Федонин, А.В. Хандожко [и др.] // Научные технологии в машиностроении. - 2022. - № 8(134). - С. 31-38. - DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-31-38. **(K-2)**

15. Киричек, А.В. Влияние параметров бойка и волновода, внешних форм и внутренних полостей образцов из различных материалов на результаты волнового деформационного упрочнения (моделирование) / А.В. Киричек, С.В. Баринов, Л.Г. Никитина [и др.] // Транспортное машиностроение. - 2022. - № 3. - С. 22-30. - DOI: 10.30987/2782-5957-2022-3-22-30. **(К-2)**
16. Киричек, А.В. Влияние параметров ударной системы, размеров и материала обрабатываемой детали на эффективность волнового деформационного упрочнения (моделирование) / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.А. Зайцев [и др.] // Транспортное машиностроение. - 2022. - № 1-2. - С. 40-52. - DOI: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-40-52. **(К-2)**
17. Киричек, А.В. Влияние материала и размеров изделия на параметры упрочнения волной деформации / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2021. - № 2(99). - С. 21-27. - DOI: 10.30987/1999-8775-2021-2-21-27. **(К-2)**
18. Киричек, А.В. Технологические возможности управления эффективной глубиной наклепа поверхностного слоя волновым деформационным упрочнением / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, С.В. Баринов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2021. - Т. 17, № 2(194). - С. 73-76. - DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-02-73-76. **(К-2; RSCI)**
19. Киричек, А.В. Модели материалов при исследовании волнового деформационного упрочнения методом конечных элементов / А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.А. Силантьев [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2021. - № 1(98). - С. 28-33. - DOI: 10.30987/1999-8775-2021-1-28-33. **(К-2)**
20. Киричек, А.В. Опытное подтверждение интерференционного механизма ударно-волнового деформационного структурирования материалов / А.В. Киричек, А.П. Кузьменко, М.М. Тан, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. - 2020. - Т. 10, № 2. - С. 98-120. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119300> **(К-2)**
21. Киричек, А.В. Проблема учета реальных размеров изделий при волновом деформационном упрочнении / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2020. - № 1(86). - С. 4-10. - DOI: 10.30987/1999-8775-2020-1-4-10. **(К-2)**
22. Киричек, А.В. Влияние обрабатываемой среды на эффективность передачи энергии ударного импульса при волновом деформационном упрочнении / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2019. - № 11(84). - С. 13-18. - DOI: 10.30987/1999-8775-2019-11-13-18.
23. Киричек, А.В. Экспериментальный стенд для исследования процессов волнового деформационного упрочнения / А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.А. Силантьев [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2019. - № 12(85). - С. 50-57. - DOI: 10.30987/1999-8775-2019-12-50-57.
24. Киричек, А.В. Моделирование волнового деформационного нагружения алюминивно-магниевых сплавов / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2018. - № 11(72). - С. 73-80. - DOI: 10.30987/article_5be14a37776568.49924300.
25. Киричек, А.В. Микроструктурные изменения в стали 45, вызванные волновым деформационным упрочнением / А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.В. Давыдов [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 8(61). - С. 79-85. - DOI: 10.12737/article_5a3779ff9bec74.56692716.
26. Киричек, А.В. Волновое деформационное многоконтактное нагружение / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 7(60). - С. 18-26. - DOI: 10.12737/article_5a337fbc06cd34.89965584.

27. Киричек, А.В. Влияние волнового деформационного упрочнения на микротвердость сварного шва и сплошного материала / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. - 2017. - № 2(41). - С. 147-150.

28. Киричек, А.В. Повышение прочности сталей 45, 40Х и 35ХГСА упрочнением волной деформации / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 2(55). - С. 69-75. - DOI: 10.12737/article_59353e2965a8c6.82426503.

29. Киричек, А.В. Энергетические закономерности импульсного нагружения системами с промежуточным звеном / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин, А.А. Зайцев // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 1(54). - С. 83-90. - DOI: 10.12737/24896.

30. Киричек, А.В. Ударно-волновой механизм микро- и наноструктурных изменений при статико-импульсной обработке стали 45 / А.В. Киричек, А.П. Кузьменко, Д.Л. Соловьев [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2015. - № 6(63). - С. 8-16. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26008634> (К-2)

31. Киричек, А.В. Влияние параметров гетерогенной структуры на сопротивление контрастному выкрашиванию / А.В. Киричек, С.В. Баринов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 4(48). - С. 54. - DOI: 10.12737/17091.

32. Баринов, С.В. Формирование гетерогенной структуры деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / С.В. Баринов, А.В. Яшин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2014. - № 4(306). - С. 86-89. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21960738>

33. Киричек, А.В. Конечно-элементное моделирование создания и испытаний гетерогенно упрочненного поверхностного слоя / А.В. Киричек, С.В. Баринов, Д.Л. Соловьев [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2013. - № 2(298). - С. 87-94. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19405104>

34. Киричек, А.В. Разработка параметров для описания гетерогенно-упрочненной структуры / А.В. Киричек, А.В. Волобуев, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2011. - № 2(74). - С. 7-9. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15620573>

35. Киричек, А.В. Разработка параметров для описания гетерогенно упрочненной структуры / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2011. - № 1(285). - С. 63-65. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16336291>

36. Соловьев, Д.Л. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенно-наклепанной структуры / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, С.В. Баринов // Тяжелое машиностроение. - 2010. - № 7. - С. 3-7. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15104577>

37. Киричек, А.В. Экспериментальный комплекс для исследований контактно-усталостного изнашивания деталей машин / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2009. - № 3-2(275). - С. 7-13. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25774431>

38. Киричек, А.В. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 7(43). - С. 9-15. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11707181>

Научные работы в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus.

39. Kirichek, A.V. Relationship Between Processing Parameters, Product Dimensions, and Wave Strain Hardening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 2022. - Vol. 144, No 3. - P. 034501. - DOI: [10.1115/1.4052008](https://doi.org/10.1115/1.4052008). (Q-1)

40. Kirichek, A.V. Approaches to Modeling Wave Strain Hardening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, K.Yu. Androsov, A.V. Grecheneva // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2024. - Vol. 53, No S2. - P. S227-S232. - DOI: [10.1134/S1052618824701541](https://doi.org/10.1134/S1052618824701541). (Q-3)
41. Kirichek, A.V. Assessment of the Effects of Plastic Deformation on the Corrosion Resistance of Steels / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, N.A. Kukanova // Russian Engineering Research. - 2024. - Vol. 44, No 12. - P. 1747-1751. - DOI: [10.3103/S1068798X24703258](https://doi.org/10.3103/S1068798X24703258). (Q-3)
42. Kirichek, A.V. Study of the influence of the shape of internal cavities on the nature of wave strain hardening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, D.O. Umnov // Materials Science Forum. - 2021. - Vol. 1037. - P. 429-434. - DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.429](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.429). (Q-4)
43. Kirichek, A.V. Patterns of wave deformational multicontact half-subspace loading / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // Key Engineering Materials. - 2017. - Vol. 736. - P. 12-17. - DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.736.12](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.736.12). (Q-4)
44. Development and verification of material models in modeling of wave strain hardening and additive synthesis processes / A. Kirichek, S. Barinov, A. Yashin [et al.] // Tractors and Agricultural Machinery. - 2024. - DOI: 10.17816/0321-4443-637300. (Q-4)
45. Kirichek, A.V. Development of Parameters Describing Heterogeneous Hardened Structure / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 756. - P. 75-78. - DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.756.75](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.75).
46. Kirichek, A.V. Study of Methods Relating to Increase of Contact Pitting Resistance in 45, 40H, 35HGSA Steel due to Development of Heterogeneous Structure Involving Mechanical Hardening Technique / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 756. - P. 65-69. - DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.756.65](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.65).
47. Dimensional effects in micro- and nanostructural changes in grain and intragrain structure of steel 45 at static-pulse treatment / A.V. Kirichek, A.P. Kuzmenko, A.Y. Altukhov [et al.] // Journal of Nano and Electronic Physics. - 2015. - Vol. 7, No 4. - P. 04023. - DOI: 2077-6772/2015/7(4)04023(4).
48. Kirichek, A.V. The peculiarities of the influence of the finite sizes of a detail on the distribution of the surface layer micro-hardness / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // Journal of Nano and Electronic Physics. - 2015. - Vol. 7, No 4. - P. 04019. - DOI: 2077-6772/2015/7(4)04019(4).
49. Kirichek, A.V. Increasing durability by deformational hardening under the conditions of back-to-back endurance by creating heterogeneous patterns / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016. - Vol. 124. - P. 012158. - DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012158.
50. Kirichek, A.V. Structural heredity influence upon principles of strain wave hardening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2017. - Vol. 177. - P. 012144. - DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012144.
51. Kirichek, A.V. The investigation of the deformation wave hardening effect on the strength of the medium and low alloy steels / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin, S.E. Kolontsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2017. - Vol. 177. - Art. 012121. - DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012121.
52. Kirichek, A.V. Strengthening of surface layer of material by wave deformation multi-contact loading / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Aborkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - Vol. 327. - Art. 042011. - DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042011.
53. Kirichek, A.V. Problems of Analyzing Microstructure Images in Assessing the Impact of Technological Parameters of Combined Strain Wave Hardening on the Quality of the Surface Layer / A.V. Kirichek, D.L. Solovyev, A.V. Khandozhko, S.O. Fedonina // CEUR Workshop Proceedings. - 2019. - Vol. 2485. - P. 265-267. - URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2485/>.
54. Kirichek, A.V. Visualizing the process of forming a shock pulse in the deformation zone / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, M.N. Ryzhkova, A.V. Yashin // CEUR Workshop Proceedings. - 2019. - Vol. 2485. - P. 265-267. - URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2485/>.

55. Kirichek, A.V. Study of the influence of cross section sizes of the rod shock system on the efficiency of shock pulse energy transfer to the deformation center / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin, A.M. Konstantinov // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - Vol. 1479. - Art. 012067. - DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012067.

56. Kirichek, A. Finite element modeling and visualization of additive ring growing by 3DMP method / A. Kirichek, S. Fedonina, S. Barinov // CEUR Workshop Proceedings. - 2020. - Vol. 2744. - URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2744/short40.pdf>. - DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-40.

57. Kirichek, A. Visualization of the process of processing welds by a deformation wave / A. Kirichek, S. Barinov, A. Yashin // CEUR Workshop Proceedings. - 2020. - Vol. 2744. - URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2744/short39.pdf>. - DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-39.

58. Kirichek, A.V. Improving the mechanical and operational characteristics of aluminum alloys by multi-contact deformation treatment / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 971. - Art. 042053. - DOI: 10.1088/1757-899X/971/4/042053.

59. Kirichek, A.V. Evaluation of the effect of various types of tools on a weld joint during wave strain hardening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1064. - Art. 012002. - DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012002.

60. Kirichek, A. Image processing in contact endurance research / A. Kirichek, S. Barinov, A. Yashin // CEUR Workshop Proceedings. - 2021. - Vol. 3027. - P. 891-895. - URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3027/paper96.pdf>. - DOI: 10.51130/graphicon-2021-2-4-96.

61. Kirichek, A.V. Assessment of the mechanical properties of welded joints after wave strain hardening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, S.A. Silantyev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1029. - Art. 012011. - DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012011.

Патенты на изобретения.

62. Пат. 2357227 Российская Федерация, G01N3/00. Устройство для испытаний на контактную выносливость поверхностей деталей машин / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, С.В. Баринов, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, Д.С. Фомин; заявитель и патентообладатель Брянский государственный технический университет. - № 2008104592/28; заявл. 06.02.2008; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. - 8 с.

63. Пат. 2357228 Российская Федерация, G01N3/00. Способ испытаний на контактную выносливость / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, С.В. Баринов, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, Д.С. Фомин; заявитель и патентообладатель Брянский государственный технический университет. - № 2008105581/28; заявл. 13.02.2008; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. - 6 с.

64. Пат. 2357229 Российская Федерация, G01N3/00. Способ комплексных испытаний на контактную выносливость поверхностей деталей машин / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, С.В. Баринов, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, Д.С. Фомин; заявитель и патентообладатель Брянский государственный технический университет. - № 2008105582/28; заявл. 13.02.2008; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. - 7 с.

65. Пат. 2357230 Российская Федерация, G01N3/00. Устройство для испытаний на контактную выносливость / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, С.В. Баринов, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, Д.С. Фомин; заявитель и патентообладатель Брянский государственный технический университет. - № 2008105583/28; заявл. 13.02.2008; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. - 9 с.

66. Пат. 2364490 Российская Федерация, B24B 39/00. Способ статико-импульсного упрочнения плоских поверхностей / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Захаров, С.В. Баринов, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, Д.С. Фомин; заявитель и патентообладатель Брянский государственный технический университет. - № 2008126878/02; заявл. 01.07.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23. - 10 с.

67. Пат. 2364491 Российская Федерация, В24В 39/00. Устройство для статико-импульсного упрочнения плоских поверхностей / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Захаров, С.В. Баринов, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, Д.С. Фомин; заявитель и патентообладатель Брянский государственный технический университет. - № 2008126880/02; заявл. 01.07.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23. - 12 с.

68. Пат. 2366558 Российская Федерация, В24В 39/00. Способ статико-импульсного упрочнения плоских поверхностей с использованием роторного генератора механических импульсов / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Захаров, С.В. Баринов, Б.И. Афанасьев, А.И. Тиняков, Д.С. Фомин; заявитель и патентообладатель Брянский государственный технический университет. - № 2008129222/02; заявл. 16.07.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25. - 15 с.

69. Пат. 2457098 Российская Федерация, В24В 39/02. Способ статико-импульсного упрочнения длинномерных отверстий / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, А.В. Васильев, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, С.В. Баринов, А.В. Волобуев; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. - № 2011104281/02; заявл. 07.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. - 8 с.

70. Пат. 2457099 Российская Федерация, В24В 39/02. Устройство для статико-импульсного упрочнения длинномерных отверстий / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, А.В. Васильев, Б.И. Афанасьев, Д.Е. Тарасов, С.В. Баринов, А.В. Волобуев; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. - № 2011104440/02; заявл. 07.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. - 10 с.

Подписано в печать 26.06.2025 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 2,09. Усл. изд. л. 2,09.
Тираж 130 экз. Заказ 77

Муромская городская типография, 602267, г. Муром, ул. Л.Толстого, 27