

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»

На права рукописи

БАРИНОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

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

2.5.6. Технология машиностроения

2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор А.В. Киричек

Брянск 2025

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Состояние вопроса, цель и задачи исследований.....	14
1.1 Крупногабаритные ресурсопределяющие детали и требования к ним.....	14
1.2. Технологическое обеспечение срока службы крупногабаритных ресурсопределяющих деталей.....	16
1.3. Технология волнового деформационного упрочнения.....	24
1.4. Направления совершенствования технологии ВДУ.....	29
1.5. Цель и задачи исследований.....	37
Выводы.....	39
Глава 2. Методика проведения исследований, измерительная и фиксирующая аппаратура.....	40
2.1. Общая методика исследований.....	40
2.2. Выбор системы инженерного анализа для моделирования процессов ВДУ.....	42
2.3. Оборудование для исследования механических и эксплуатационных свойств.....	45
2.4. Экспериментальное оборудование, стенды и установки для исследования процессов волнового деформационного упрочнения.....	49
2.5. Методика планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных.....	64
Выводы.....	67
Глава 3. Исследование эффективности волновых процессов, протекающих в ударной системе боек-волновод.....	68
3.1. Модель процесса ВДУ типа «черный» ящик.....	68
3.2. Особенности разработки конечно-элементной модели ударной системы ВДУ.....	69
3.3. Повышение энергетической эффективности волновых процессов, протекающих в ударной системе боек-волновод.....	81
3.4. Исследование влияния обрабатываемой среды на эффективность ВДУ....	92

3.5. Исследование влияния формы инструмента на характер упрочнения при единичном ударе для одноконтатных и многоконтатных схем ВДУ	96
Выводы.....	106
Глава 4. Исследование эффективности волновых процессов, протекающих в изделии с конечными размерами.....	107
4.1. Особенности разработки конечно-элементной модели ВДУ.....	107
4.2. Исследование влияния прямоугольных, треугольных, цилиндрических форм образцов на эффективность ВДУ.....	108
4.3. Особенности влияния материала и конечных размеров детали (масштабного фактора) на карты микротвердости.....	114
4.5. Исследование влияния наличия полостей различных размеров и формы в образцах, на эффективность ВДУ.....	122
4.6. Исследование влияния ВДУ на изменение технологической наследственности в обрабатываемом изделии, упрочнение лицевой и тыльной сторон образца.....	130
4.7. Исследование влияния волновых процессов на микроструктуру и прочность	141
Выводы.....	157
Глава 5. Разработка моделей комбинированных технологий ВДУ сварного шва и наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ. Исследование влияния температурного фактора.....	161
5.1. Особенности разработки конечно-элементных моделей комбинированных технологий сварки, наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ.....	161
5.2. Результаты исследования комбинированной КЭМ технологии сварки с ВДУ.....	176
5.3. Результаты исследования комбинированной КЭМ технологии наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ.....	182
5.4. Исследование влияния температурного фактора - температуры материала при ВДУ и температуры испытаний на механические свойства.....	216
Выводы.....	223

Глава 6. Экспериментальные исследования влияния ВДУ на эксплуатационные свойства. Общие технологические рекомендации.....	226
6.1. Исследование возможностей ВДУ по созданию гетерогенной структуры в обрабатываемом изделии.....	226
6.2. Исследование влияния ВДУ на сопротивление контактному выкрашиванию. Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию.....	248
6.3. Исследования влияния ВДУ на прочность сварных швов и зоны термического влияния в условиях знакопеременных нагрузок.....	255
6.4. Исследование влияния ВДУ на коррозионную стойкость.....	261
6.5. Общие технологические рекомендации.....	273
6.6. Производственная апробация.....	276
Выводы.....	284
Заключение.....	286
Библиографический список.....	292
Приложение А.....	320

Введение

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. Покрытия 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, Соловьев, Афонин, Силантьев, Тарасов, Яшин, Федонина 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 одномоментно 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).

Практическая ценность работы заключается:

1. в разработке технологических рекомендаций по технологическим и конструктивно-технологическим параметрам ВДУ, направленным на расширение области применения и технологических возможностей ВДУ;
2. в определении «универсальных» режимов ВДУ, способных одновременно повысить несколько эксплуатационных свойств: сопротивление контактному выкрашиванию, коррозионную стойкость, прочность сварных швов в условиях знакопеременных нагрузок у ряда материалов;
3. в разработке технологических рекомендаций по предварительному нагреву материала перед ВДУ и обеспечению механических свойств при эксплуатации упрочненных изделий в условиях отрицательных (-60°C) и повышенных температур ($+300^{\circ}\text{C}$);
4. в разработке технологических рекомендаций по применению ВДУ в составе комбинированных технологий в сочетании со сваркой и аддитивным синтезом;
5. в разработке конструкции стендов и методов испытаний на сопротивление контактному выкрашиванию деталей машин, экспериментального стенда для ВДУ.

На защиту выносятся:

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.

Достоверность 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 (MEACS 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 (г. Ростов-на-Дону), Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово), а также в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Крупногабаритные ресурсопределяющие детали и требования к ним

Крупногабаритные детали являются неотъемлемой частью современной промышленности. Нет единого определения и критериев, по которым детали можно считать крупногабаритными и, как правило, они свои для каждой отрасли промышленности. Крупногабаритные изделия находят широкое применение во многих отраслях промышленности: атомной, космической, военной, при добыче и обогащении руд, разработке месторождений угля, нефти производстве стали, чугуна, электроэнергии, проката и др. Примеры крупногабаритных деталей из разных отраслей промышленности представлены на рисунке 1.

Вопросами технологии изготовления крупногабаритных деталей, её совершенствования в разное время занимались: А.В. Афонин, А.В. Алифанов, В.М. Браславский, А.П. Бунец, В.М. Горелов, А.И. Исаева, С.Ю. Красноштанов, В.Г. Коринюк, Д.А. Лебедева, И.В. Маракулин, И.А. Песин, В.А. Попов, С.И. Самойлов, Н.С. Севрюгина, П.А. Цирков и др. [51, 53, 67, 125, 129, 152, 159, 166, 191, 196, 205].

При обработке крупногабаритных деталей часто требуются иные технические и технологические решения, не свойственные деталям мелких и средних размеров. Крупные размеры деталей, их высокая служебная ответственность, предъявляют высокие требования к их долговечности и параметрам качества, её обеспечивающих.

Крупногабаритные ресурсопределяющие детали нагружены не поверхностно, как кинематические пары, они работают в условиях силового нагружения под значительными нагрузками, поэтому несущий слой таких деталей должен иметь упрочнение. Толщина упрочненного слоя должна быть глубже, чем расположение наиболее нагруженной точки, а это при таких габаритных размерах детали она может достигать 5-10 мм [156].

Большинство крупногабаритных деталей являются элементами ответственных изделий, являющимися основными силовыми частями

конструкций, единичные отказы которых приводят к аварийной или катастрофической ситуации. Такие детали определяют срок службы изделия в целом и, как правило, имеют высокую стоимость. Даже небольшое увеличение ресурса таких деталей сопровождается значительным экономическим эффектом. Повышение качества и срока службы деталей машин достигается различными, в том числе технологическими средствами.

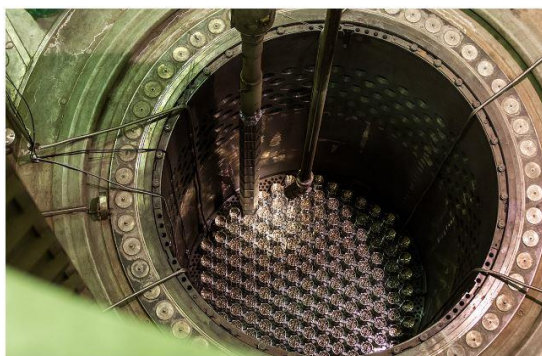
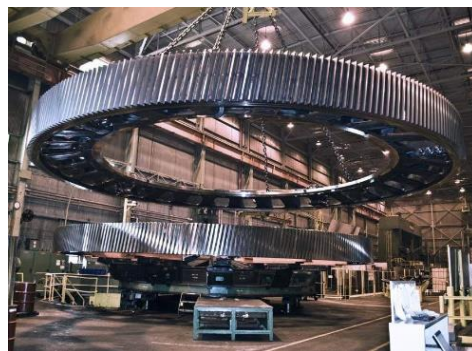


Рисунок 1 - Примеры крупногабаритных деталей

1.2 Технологическое обеспечение срока службы крупногабаритных ресурсопределяющих деталей

Технологическое обеспечение срока службы крупногабаритных ресурсопределяющих деталей может достигаться за счет повышения параметров качества в поверхностном слое, обеспечивающих, в том числе, формирование упрочнения в поверхностном слое на глубине более 5 мм.

В настоящее время известно достаточно большое число способов обеспечения параметров качества поверхностного слоя, отличающихся физическим принципом воздействия на обрабатываемую поверхность (рисунок 1.2). Укрупненно эти воздействия можно разделить на: изменением шероховатости, нанесением покрытия, поверхностным легированием, термическим воздействием, деформационным воздействием [62, 101, 103]. Внутри каждого вида представлены технологии, имеющие свою преимущественную область использования, определенную возможностями обеспечения параметров качества поверхностного слоя. Для обоснования применения данных способов к возможности формирования упрочненного несущего слоя на глубине более 5 мм у крупногабаритных ресурсопределяющих изделий необходимо проанализировать их технологические возможности.

Для крупногабаритных ответственных деталей снижению концентрации напряжений, повышению контактной жесткости, износостойкости и усталостной прочности способствует уменьшение шероховатости поверхности, создание регулярной микрогеометрии и макроструктуры. Однако, обеспечение минимальной шероховатости поверхности недостаточно для повышения долговечности таких деталей, так как точка напряжения находится не на поверхности контакта, а в глубине, что способствует возникновению усталостной трещины под слоем, в сплошном материале (АВК).

Нанесением упрочняющих покрытий возможно получение микротвердости поверхности до 10000 МПа, причем независимо от исходной твердости металла упрочняемой детали. Также установлено, что при всех способах нанесения покрытий формируются растягивающие остаточные напряжения до 1000-1150

МПа в модифицированном слое и создается концентрация напряжений ввиду присутствия резкой границы между покрытием и основным металлом. Толщина покрытий обычно не превышает 0,003...0,5 и иногда достигает 2 мм [62, 120].

Покрытия успешно применяются для ремонта – восстановления геометрии изношенных поверхностей крупногабаритных деталей. Так, в работах [128, 195] за счет использования низкотемпературной нитроцементации электролитических покрытий на основе железа удалось кратно повысить поверхностную твердость и износостойкость ремонтируемого участка крупногабаритных изделий. Однако применение данной технологии возможно для участков, с глубиной износа не превышающей 0,3 мм. В работе [124] применялось газотермическое напыление для восстановления участков крупногабаритных валов судового и энергетического оборудования, с максимальной глубиной ремонтируемых дефектов.

При эксплуатации в условиях усталости и контактной выносливости часто наблюдается разрушение упрочняющих покрытий отслаиванием. Также для формирования покрытий, как правило, в большинстве случаев необходимо сложное энергоемкое оборудование и применение дорогостоящих расходных материалов. Перечисленные выше недостатки, делают применение покрытий для упрочнения поверхностного слоя крупногабаритных деталей нецелесообразным [62, 71].

Химико-термическую обработку (ХТО) часто относят к диффузионным методам нанесения покрытий. Достаточно популярными на предприятиях, для повышения комплекса свойств, используются такие разновидности ХТО, как цементация, азотирование и нитроцементация. Микротвердость поверхностного слоя углеродистой стали, после ХТО не уступает, а в некоторых случаях превышает, микротвердость термообработанной легированной стали [62, 191]. Достижимая глубина упрочнения составляет 1,8-2 мм и из-за длительности протекания обработки 9-12 часов, процесс характеризуется высокой энергоемкостью.

Проведению цементации крупногабаритных деталей посвящено достаточно большое количество статей и патентов [133, 143, 144].

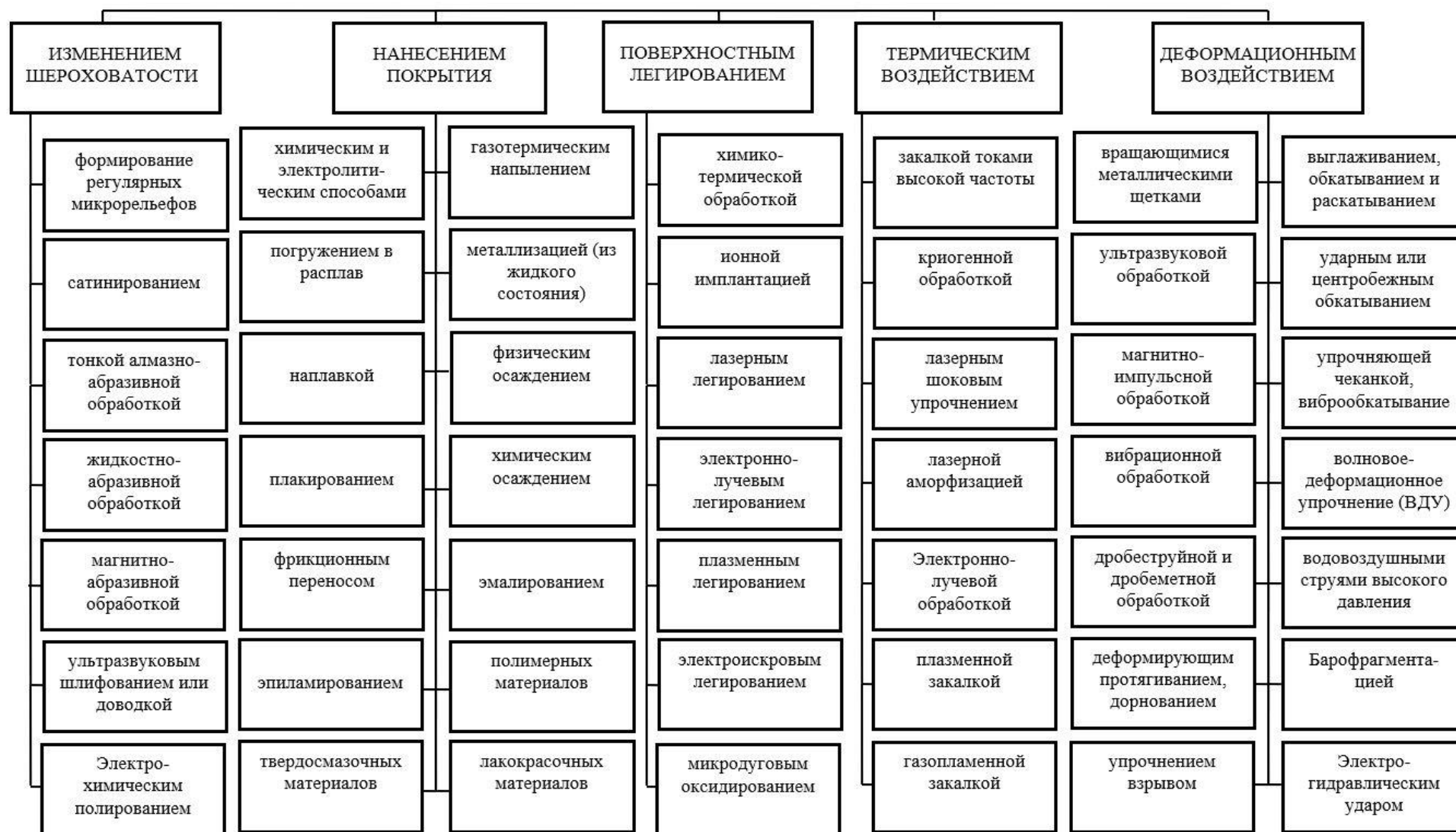


Рисунок 1.2 - Способы повышения качества поверхностного слоя [101, 103]

Большинство исследований сводится к размещению крупногабаритных деталей в шахтной печи, где в зависимости от обрабатываемого материала и условий эксплуатации обеспечивается рабочая среда и температурные условия, а исследователи стремятся к увеличению глубины упрочнения при максимально возможном снижении времени протекания процесса. Несмотря на крайне редкое наличие шахтных печей у средних и малых предприятий, исходя из обеспечения небольшой глубины упрочнения, применение ХТО для создания глубокого упрочнения в поверхностном слое крупногабаритных деталей нецелесообразно.

Применение термической обработки для обеспечения служебных свойств в процессе изготовления крупногабаритных изделий просвещено много исследований [65, 145-148, 168].

Так, в работе [65], описываются этапы разработки технологии термической обработки сварных соединений крупногабаритных нефтехимических реакторов, работающих в условиях высоких давлений и температур. В результате исследований даны рекомендации по режимам термической обработки, обеспечивающие служебные свойства в изделии с толщиной свариваемой стенки от 108 до 290 мм и внутренним диаметром от 2400 до 5510 мм [65].

В патенте 2219251 предлагается способ термической обработки крупногабаритных стальных изделий с условным сечением 150-700 мм. за счет обеспечения нагрева до температур аустенизации и регулируемом поэтапном охлаждении что приводит к повышению ряда механических свойств обрабатываемого изделия [146]. В патенте 633927 рассматривается способ термической обработки крупногабаритных изделий и сварных узлов авиационной техники из сплавов на основе титана. За счет нагрева, выдержки и охлаждения в герметичной камере, заполненной после вакуумирования инертным газом удалось достичь требуемых параметров качества. Приводятся режимы ТО для отжига после сварки шасси из титанового сплава BT22 в герметичном контейнере объемом 2 м³ [148].

На основании анализа возможностей технологий ТО по обработке крупногабаритных изделий установлено, что для её реализации требуется крупногабаритные, подчистую уникальные печи нагрева, и в большинстве случаев,

с возможностью обеспечения герметичности и работы в среде инертных газов. Сверхкрупногабаритные печи, как правило, изготавливаются штучно под конкретный тип изделий (например, для ТО элементов ядерного реактора) и имеют большую стоимость изготовления и эксплуатации. Применение ТВЧ ограничивается: размерами обрабатываемых деталей, возможностью получения обезуглероживания поверхностного слоя, наличия резкого перехода между упрочненной и неупрочненной поверхностями. Также при ТО такого класса изделий сталкиваются со сложностью управления процессом охлаждения и обеспечения равномерной по всей поверхности скорости протекания структурных превращений. На основании вышеперечисленных недостатков и практически отсутствия возможности получения после термической обработки комплекса противоречивых свойств: прочности, пластичности, ударной вязкости делает сложно реализуемым применение ТО для повышения твердости в крупногабаритных деталях.

Способы поверхностного пластического деформирования (ППД) достаточно хорошо себя зарекомендовали для повышения ряда эксплуатационных и механических свойств. ППД в отличие от рассмотренных ранее технологий обладает рядом преимуществ, таких как: обеспечения глубины упрочнения до 15 мм, возможность образования плавного перехода от упрочненной области к неупрочненной, формирования при упрочнении остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, более низкой энергоемкостью, возможностью одновременного обеспечения взаимоисключающих свойств таких как: высокая твердость, пластичность и ударная вязкость, простота комбинирования с другими технологиями и др [116].

Исследования повышения параметров качества поверхностного слоя поверхностным пластическим деформированием в разное время проводили: А.Ю. Албагачиев, И.Р. Асланян, А.П. Бабичев, М.А. Балтер, В.Ф. Безъязычный, В.М. Браславский, А.И. Болдырев, С.А. Букатый, В.И. Бутенко, В.Ю. Блюменштейн, В.П. Гилета, Д.С. Голованов, А.О. Горленко, М.С. Дрозд, С.А. Зайдес, А.Н. Исаев, А.В. Киричек, С.Н. Коденцев, А.М. Козлов, В.П. Кольцов, В.А. Лебедев, М.М.

Матлин, Л.Г. Одинцов, Н.В. Олейник, Д.Д. Папшев, Д.И. Петрешин, В.В. Петросов, В.М. Приходько, Э.В. Рыжов, Ю.И. Сидякин, В.М. Смелянский, В.П. Смоленцев, Д.Л. Соловьев, А.Г. Сулов, Г.А. Сухочев, М.А. Тамаркин, А.В. Тотай, Э.Э. Тищенко, В.П. Федоров, В.А. Хандожко, П.А. Чепа, Д.Л. Юдин, В.М. Ярославцев и др. [55, 56, 64, 66, 76, 78, 79, 87, 134, 136, 137, 153, 162-164, 170, 176, 177, 185-187, 189, 190, 203, 206].

Согласно воздействию, на обрабатываемую поверхность способы ППД можно разделить на статические и ударные (динамические) [74]. Возможности некоторых способов ППД по обеспечению глубины и степени упрочнения, остаточных напряжений представлены на рисунке 1.3.

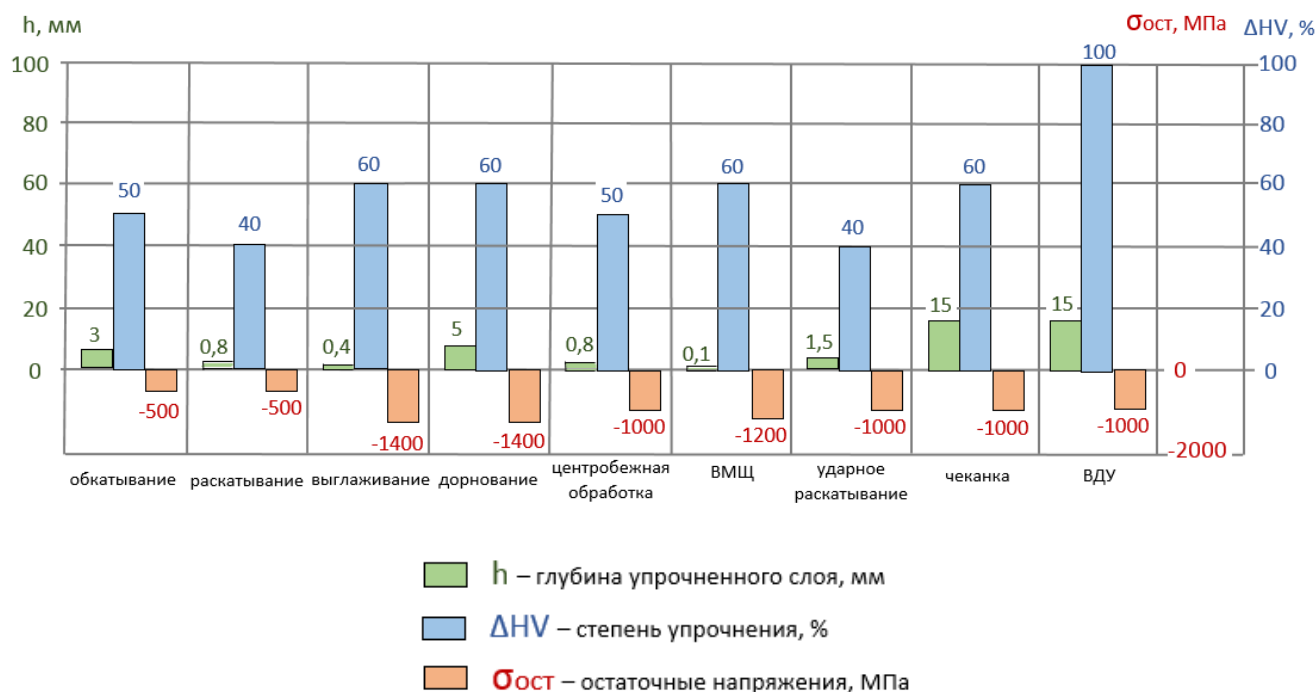


Рисунок 1.3 - Характеристика способов поверхностного пластического деформирования [103]

К статическим способам относятся: обкатывание, раскатывание, выглаживание и др. При алмазном выглаживании из небольших размеров деформирующего индентора с одной стороны позволяет упрочнять тонкостенные изделия, а с другой стороны из-за высокой твердости индентора обрабатывать термообработанные поверхности. После обработки алмазным выглаживанием

формируется степень упрочнения до 60%, глубина деформируемого слоя составляет до 0,4 мм, создаются сжимающие остаточные напряжения до -1400 МПа [101, 103].

В работе [67] с помощью накатывания производилось упрочнение крупных деталей роликом, таких как: трубы буровых колон длиной 6 м и Ø 500 мм, валов длиной 8 метров и Ø 130 мм, направляющие станин токарных станков длиной до 25 метров и др. В зависимости от режимов накатывания, числа проходов, параметров инструмента, обрабатываемого материала в несколько раз снижалась шероховатость, в некоторых случаях достигая эффекта полирования удавалось достичь глубины упрочнения до 3 мм и формирования сжимающих остаточных напряжений до -500 МПа.

К преимуществам статических методов ППД можно отнести: уменьшение исходной шероховатости до 6 раз, низкий уровень шума при обработке, стабильность протекания процесса. К недостаткам можно отнести: возможное возникновение деформаций при обработке тонкостенных заготовок, отсутствие возможности обеспечения глубокого упрочнения, для увеличения глубины упрочнения требуется обеспечение значительных усилий на инструменте что в свою очередь требует большой жесткости в используемом оборудовании и оснастке, что влечет за собой увеличение их габаритных размеров [59].

К ударным (динамическим) способам ППД относятся: ударное раскатывание, дробеструйная обработка, чеканка, ультразвуковая обработка и др. Использование виброударного упрочнения использовалось в работе [158] для обработки крупногабаритной стыковой нервюры крыла Ил-96 длиной до 5650 мм, высотой до 256 мм шириной до 325 мм и толщиной стенок 7-15 мм. В результате исследований установлено повышение параметров качества и снижения деформации изделия от воздействия инструментальной среды [158].

В работе [130] использовалось виброударное упрочнение с упругим креплением детали в близкорезонансном режиме, которое позволило в поверхностном слое крупногабаритных деталей добиться снижения шероховатости до 17%, роста формирования остаточных напряжений до 10%, наклёпа до 12% [130].

В работе [51] разрабатывалась технология изготовления крупногабаритных корпусных тонкостенных деталей летательных аппаратов за счет использования комбинированной деформирующей раскатки с локальным нагревом обрабатываемой поверхности. В результате повышения параметров качества удалось снизить шероховатость R_a до 2,5-1,25 до 1,63-0,16 мкм и добиться снижения массы изделия на 10-12 кг [51].

В патенте №1349977 описывается способ упрочнения дробью крупногабаритных деталей Т – образной формы. За счет упрочнения за два установка по двум осям, регулирования времени обработки и скорости потока дроби в струе сжатого воздуха или жидкости выполняется наклёп обрабатываемой поверхности и обеспечивается равномерность упрочнения всей поверхности крупногабаритной детали [149].

Из-за возможности обеспечения больших энергий удара такие динамические способы ППД, как центробежная обработка, ударное раскатывание, чеканка используются для упрочнения крупногабаритных деталей. Ударное раскатывание и центробежная обработка могут создать упрочненный слой на глубине до 0,8-1,5 мм с максимальной степенью упрочнения до 50% и сжимающими остаточными напряжениями до -1000МПа. Среди рассмотренных способов ППД чеканка при обработке, например, сталей аустенитного класса может сформировать упрочнение 15 мм и более [101, 103, 137, 171].

Таким образом, обработка ППД крупногабаритных деталей может найти ограниченное применение, так как преимущественно они не создают требуемую степень и глубину упрочнения, обладают низким КПД. Чеканка, например, способна обеспечить данные параметры упрочнения, но как известно, по сравнению с ударными системами с промежуточным звеном, при равных режимах упрочнения и габаритах устройств является менее энергетически эффективным процессом [103].

1.3 Технология волнового деформационного упрочнения

Известно, что в результате единичного удара в очаге деформации формируется импульс, форма и длительность которого зависят от типа ударной системы. При ударе непосредственно шаром (как при дробеструйной обработке), импульс имеет большую амплитуду при небольшой длительности (рисунок 1.4). Его КПД, т.е. доля энергии удара, затрачиваемая на пластическую деформацию - составляет всего 12%. При ударе протяженным телом - бойком, КПД возрастает до 26%. В случае удара через промежуточное звено, в очаг деформации поступает пролонгированный импульс, состоящий из головной и хвостовой (отраженной) частей. Большая длительность импульса и существенно большая энергия, сообщаемая в очаг деформации, позволяет достичь КПД 38% и более, до 65% [103, 153, 181].

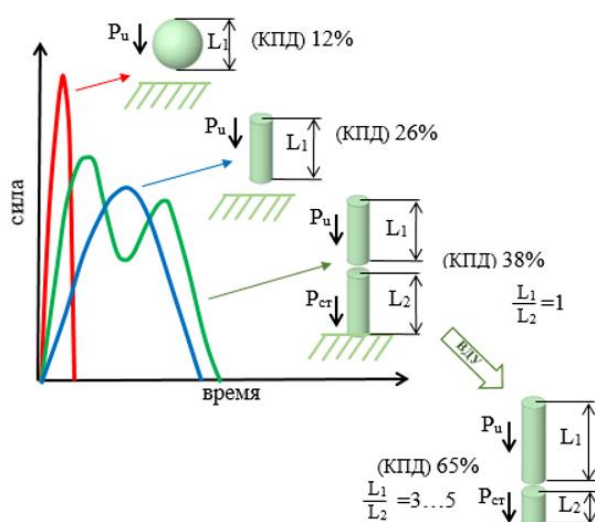


Рисунок 1.4 - Значения КПД ударных импульсов, в зависимости от типа ударной системы [103, 153, 181]

Изучением процессов, происходящих в результате соударения тел, деления ударных импульсов занимались А.Ю. Албагачиев, Е.В. Александров, О.Д. Алимов, Г.С. Батуев, В.Н. Виноградов, В.Э. Еремьянц, А.В. Киричек, А.Ф. Кичигин, А.Г. Лазуткин, В.К. Манжосов, Я.Г. Пановко, Д.Л. Соловьев, Г.М. Сорокин, Л.С. Ушаков и др. [45-50, 54, 68, 73, 82, 114, 115, 132, 138, 139, 182, 183, 199].

Известна классификация способов обработки по принципу подвода энергии ударного импульса в очаг деформации (рисунок 1.5). Она дает представления о видах и эффективности ударных систем. При удлиненном бойке (случаи *B, D, E, F, G*) зависимости классической механики не работают. Вступают в силу законы волновой теории удара [101, 103, 181].

Удар через промежуточное звено – волновод – является отличительной особенностью волнового деформационного упрочнения (ВДУ). Способ упрочнения материала волной деформации имеет достаточно большое количество патентов, а запатентован профессорами Киричком А.В., Соловьевым Д.Л., Лазуткиным А.Г. он впервые в 1997 году, как способ статико-импульсной обработки (СИО) [86, 103, 142, 150].

Особенность метода заключается в нанесение бойком удара по предварительно статически ($P_{ст}$) поджатому к очагу деформации – волноводу (рисунок 1.6), необходимого для более полного использования энергии при упругопластическом деформировании.

При ВДУ акустическая волна деформации поступает в обрабатываемый материал в виде потока импульсов, отличающихся наличием не только головной, но и хвостовой части. Это позволяет в 10 раз увеличить длительность импульса, в несколько раз увеличить коэффициент полезного действия энергии удара. Волна деформации, проходя участки обрабатываемого изделия с разной акустической жесткостью, частично отражается, а на границах изделия отражается полностью, формируя обратную волну. В результате интерференции совокупности разнонаправленных прямых и обратных многократно отраженных волн деформации одномоментно в каждой точке изделия возникают волновые состояния, определяющие степень упрочнения материала [86, 117, 156].

Процесс нагружения материала волной деформации отличается расширенным набором управляющих технологических факторов: энергия ударов (A), амплитуда и длительность ударных импульсов, частота ударов (f), их скважность, размеры очага деформации (δ) и т.д. (рисунок 1.6).

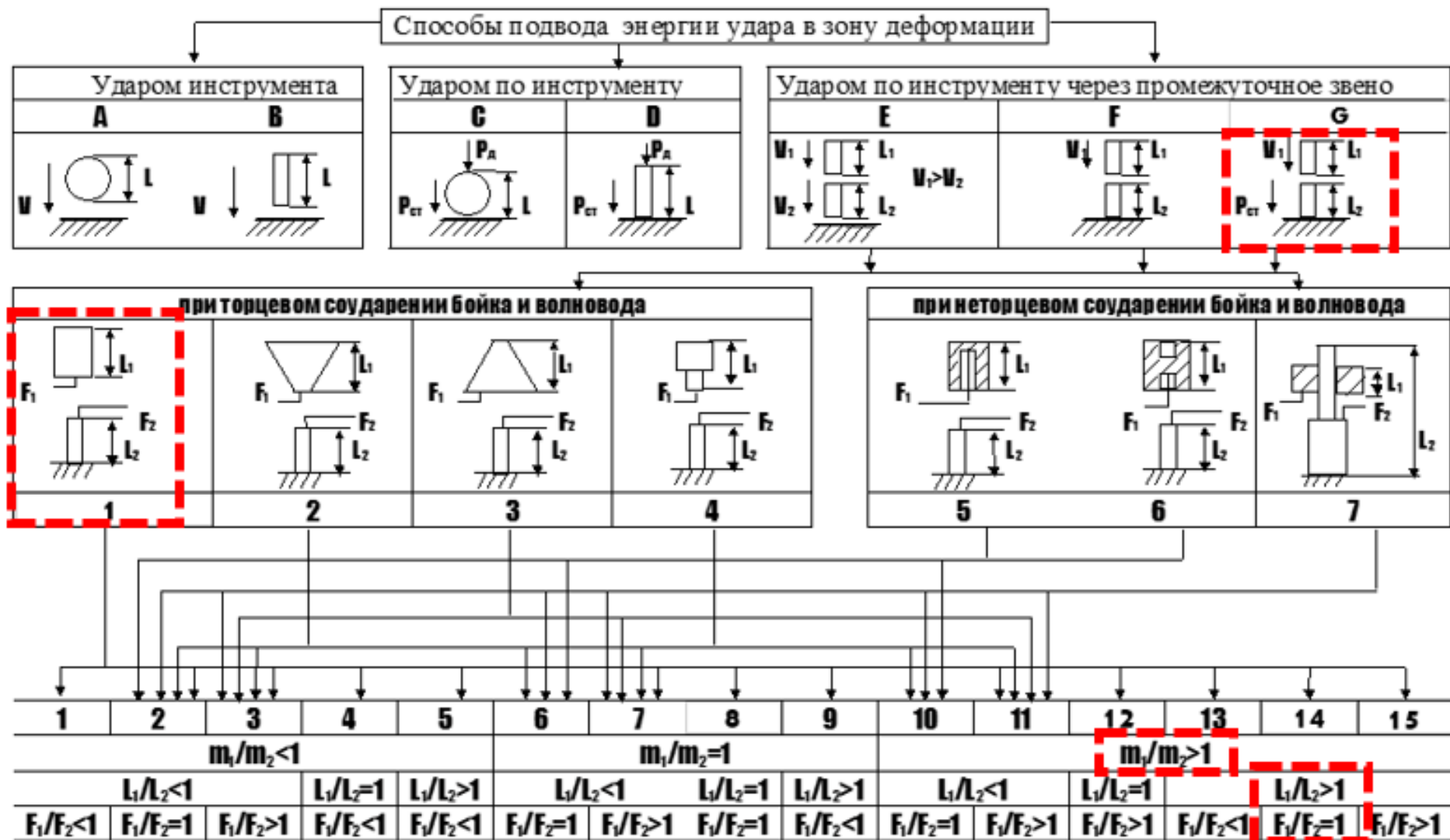
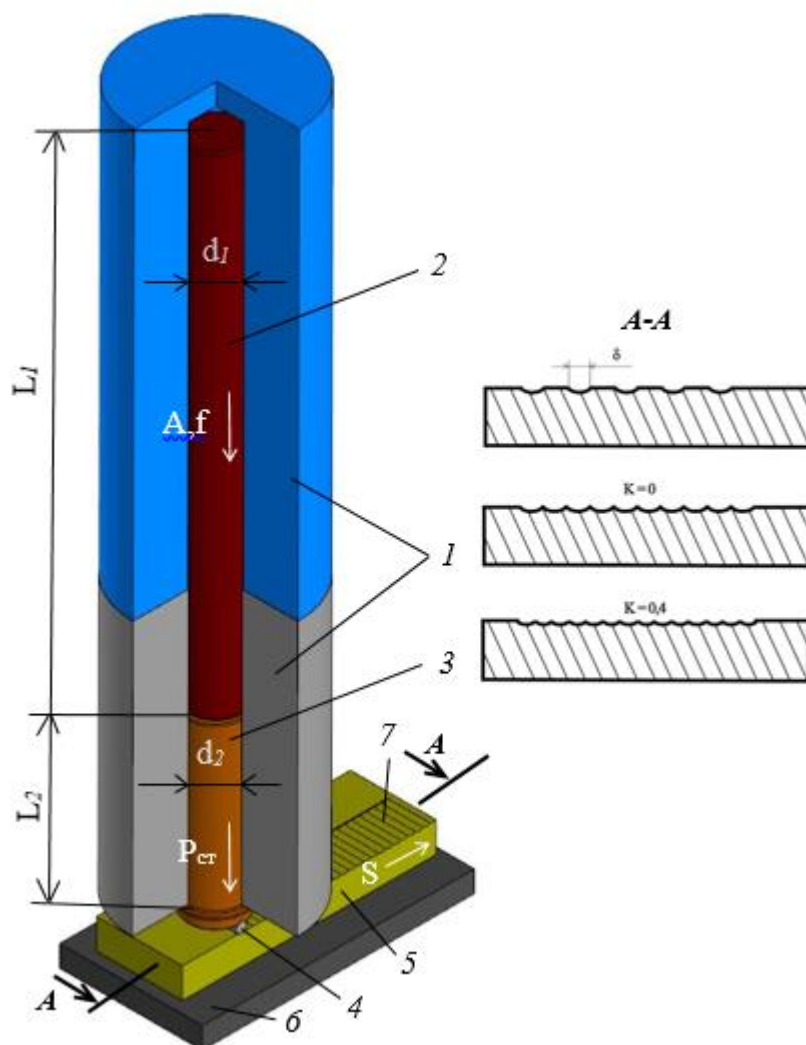


Рисунок 1.5 - Классификация динамических способов обработки [101, 103]

Это дает широкие возможности управления параметрами импульсов, расширяет возможности деформационной обработки, позволяет создавать слой с заданной равномерностью упрочнения, глубиной [109].



1 – корпус генератора импульсов; 2 – боёк; 3) – волновод; 4 – инструмент; 5 – деталь; 6 – стол станка; 7 – упрочненная область

Рисунок 1.6 - Схема волнового деформационного упрочнения [59, 109]

Упрочненный слой формируется в результате многократных импульсных воздействий, очаги которых имеют относительное смещение (S). Так, при упрочнении крупногабаритного ресурсопределяющего изделия - сердечника крестовин стрелочного перевода, изготовленного из стали 110Г13Л удалось сформировать упрочненный слой глубиной до 15 мм, повысить микротвердость с 260 до 640 HV, и сформировать сжимающие остаточные напряжения -1000 МПа [59, 109, 175, 181].

ВДУ является технологией получения гетерогенных материалов со сплошной основой, армированной регулярными макроскопическими областями с модифицированным структурно-фазовым состоянием. Вследствие ударно-волнового характера процесса упрочнения технология ВДУ позволяет регулировать равномерность упрочнения, создавая гетерогенно упрочненную структуру, сочетающую одновременно высокую твердость и вязкость. Регулирование равномерности при ВДУ достигается за счет перекрытия пластических отпечатков, полученных в результате действия на материал ударных импульсов, которое оценивается через коэффициент перекрытия [103, 201]:

$$K = 1 - \frac{s}{\delta \cdot f \cdot 60}, \quad (1.1)$$

где δ – размер отпечатка, мм; s – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; f – частота ударов, Гц.

Коэффициент перекрытия пластических отпечатков K наряду с энергией удара A относится к внутренним факторам, интегрально характеризующим процесс. Если $K = 0$, то край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, то отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место [69, 86, 181].

Известно, что определяющее влияние на энергетическую эффективность процесса ВДУ оказывают как соотношения геометрических параметров, так и собственно геометрические параметры элементов ударной системы – длин (L_1, L_2) и площадей поперечных сечений бойка и волновода. Так как чаще всего боек и волновод – цилиндрические стальные стержни, удобно рассматривать не площади поперечных сечений, а диаметры бойка и волновода (d_1, d_2). Ранее проведенные серии экспериментов, выявили рациональные геометрические соотношения ударной системы, способствующие наибольшей передаче энергии ударного импульса в очаг деформации: $d_1/d_2 = 1..3$, $L_1/L_2 = 3..5$, $L_1/d_1 > 3$, где $L_1; d_1$ и $L_2; d_2$ – соответственно, длина и диаметр бойка и волновода [103]. Однако данные

исследования из-за большой трудоёмкости проводились в достаточно узком диапазоне.

Для ускорения процесса исследований возможностей ВДУ создана аналитическая модель, описывающая процесс формирования импульса деформации и его преобразования на границах участков с различными акустическими свойствами, на основании которой получена методика расчета волновых состояний элементов ударной системы и параметров импульса в очаге деформации. На её основе создана программа для ЭВМ. Однако, данная аналитическая модель процесса ВДУ довольно громоздкая, сложная для расчета и содержит ряд ограничений, которые согласно требованиям современной промышленности, необходимо учитывать при моделировании [83, 174]. Так, физико-механические свойства обрабатываемого материала учитываются полуклассическими, без учета кривых упрочнения; принято допущение, что обрабатываемое изделие является полупространством; упрочнение ведется только одним инструментом; формируемую в среде нагружения в результате расчета твердость (напряжения, деформации) можно определить только в одной точке, под отпечатком от удара инструмента, а не по эквидистанте поверхности материала и вглубь [86, 117].

Таким образом, из-за нерешенности вопросов повышения эффективности ударных процессов при ВДУ, появления новых подходов к исследованиям высокоскоростных подходов, развитию возможностей современного программного обеспечения возникает необходимость развития и совершенствования потенциала технологии ВДУ и применения её для упрочнения крупногабаритных ресурсопределяющих деталей.

1.4 Направления совершенствования технологии ВДУ

Различными аспектами реализации ВДУ, в том числе его применения в сочетании с ТО, ХТО, электродуговой сваркой и наплавкой, аддитивным синтезом, занимались: А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Н. Афонин, С.А. Силантьев, Д.Е.

Тарасов, А.В. Волобуев, А.В. Яшин, С.О. Федонина и др. [54, 62, 71, 101, 175, 181, 191, 201, 210].

На схеме показаны имеющиеся отношение к ВДУ конструктивно-технологические параметры, выделенные разным цветом: синим - исследованные ранее; зеленым – исследованные в результате моделирования; красным – не исследованные (рисунок 1.7).

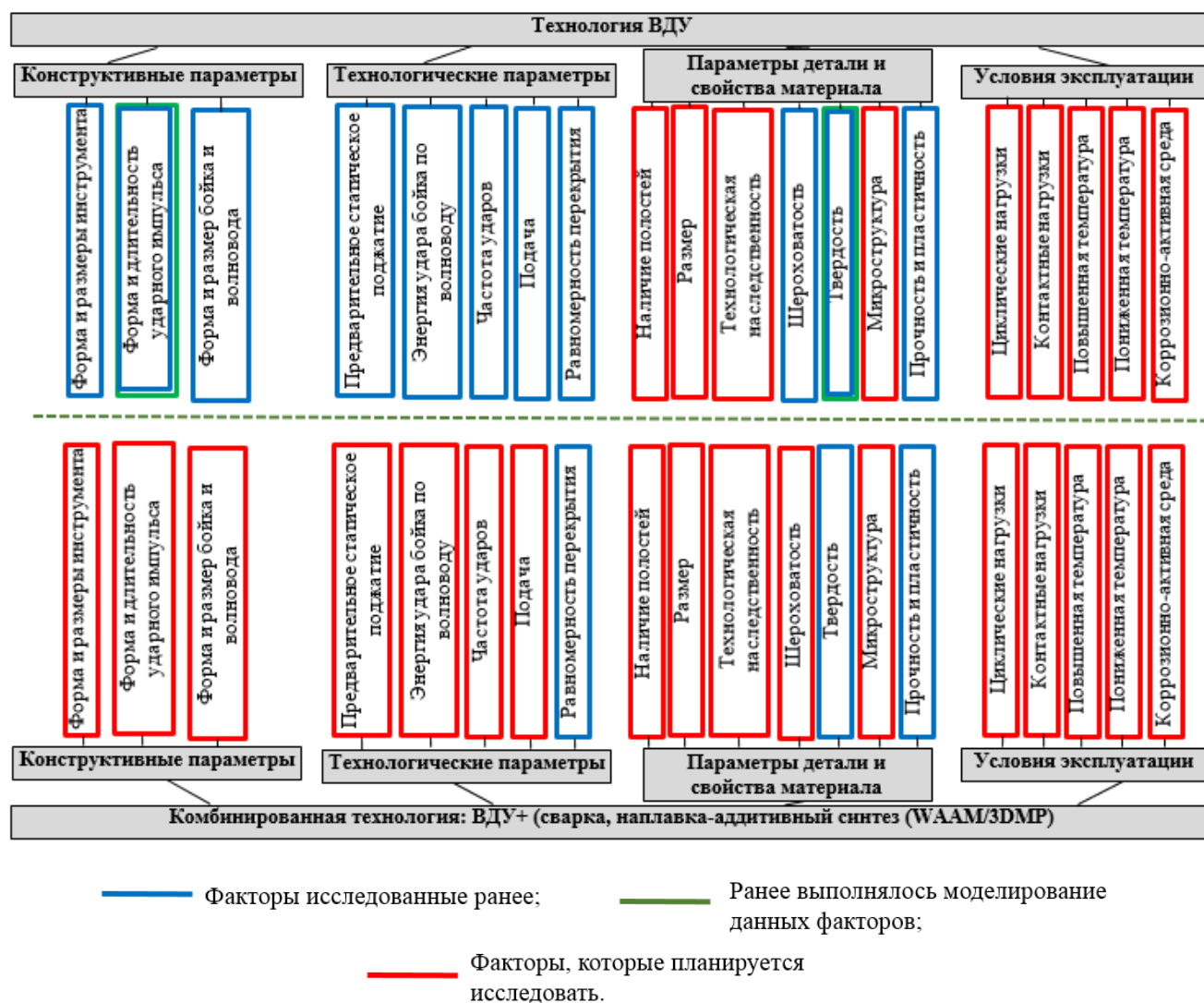


Рисунок 1.7 - Конструктивно-технологические параметры ВДУ

Ранее исследованные факторы ВДУ выполнялись в следующих работах. Одной из первых работ посвященных исследованию технологии ВДУ статико-импульсным упрочнением в 1998 году стало диссертационное исследование Д.Л. Соловьева «Обеспечение качества деталей машин упрочняющей статико-импульсной обработкой». В работе описана суть технологии ВДУ. Разработан

экспериментальный стенд, позволяющий оценить влияние технологических факторов статико-импульсной обработки на характер упрочнения деталей. Определены рациональные геометрические параметры ударной системы, исследовано влияние технологических факторов на параметры качества упрочненной поверхности [184]. Однако данные параметры определены в достаточно узком диапазоне соотношений длин и площадей поперечных сечений бойка и волновода, также не учитывалось влияние физико-механических свойств нагружаемой среды.

В 1999 г. А.В. Киричек в диссертационной работе «Обеспечение качества несоосных винтовых механизмов деформационным упрочнением их сопрягаемых деталей», установил, что амплитуда, длительность, энергия являются значимыми параметрами ударного импульса при ВДУ. Определил взаимосвязь между длительностью ударного импульса и увеличением твердости. Разработал математическую модель, позволяющую на основании требуемой величины микротвердости и имеющихся технологических возможностей генератора механических импульсов подобрать соответствующую удельную энергию удара и параметры деформирующего инструмента [101]. Созданная в работе данная регрессионная модель имела достаточно большую погрешность, могла быть использована для достаточно узкого диапазона значений обеспечивающих параметры качества в результате ВДУ. В модели учитывались волновые процессы, протекающие только в ударной системе. Хотя есть предположение, что волновые процессы могут протекать и в инструменте и в обрабатываемом изделии.

С.А. Силантьев в 2003 году в диссертационной работе «Повышение эффективности статико-импульсной обработки управлением технологическими режимами и параметрами генератора импульсов» разработал методику управления технологическими режимами СИО и параметрами генератора импульсов, позволяющую рассчитывать их из условия обеспечения требуемой глубины, степени и равномерности упрочнения поверхностного слоя [175]. Это позволило создать первый полноразмерный стенд реализующий технологию ВДУ и дано понятие равномерности (гетерогенности) упрочнения. Теоретически и

экспериментально установлено, что глубина, степень и равномерность упрочнения поверхностного слоя при ВДУ СИО определяется соотношением энергии и частоты импульсов с геометрическими параметрами деформирующего инструмента и технологическими режимами обработки, а обобщенной характеристикой их связи является коэффициент перекрытия единичных отпечатков K [175]. Однако проведенные исследования равномерности упрочнения – распределения твердости после ВДУ с пятью различными значениями коэффициента перекрытия и одной энергией удара проведены только на стали 45. А две из трех представленные в работе эпюры распределения микротвердости, в результате гетерогенного упрочнения ВДУ, не информативны, так как не отражают четкое распределение микротвердости после упрочнения. В работе лабораторно не доказана эффективность применения гетерогенного ВДУ.

В 2005 году в рамках докторской диссертации «Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием» Д.Л. Соловьев разработал основы управления процессом статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Вывел аналитические зависимости, связывающие изменение контактной силы в очаге деформации по времени со скоростью, формой и размерами элементов ударной системы, и кривизной инструмента и нагружаемой поверхности, свойствами обрабатываемого материала [181]. Установил вид и характер взаимосвязей между конструктивными (линейными и диаметрными размерами бойковой части и кранового распределителя генератора импульсов), конструктивно-технологическими (линейными и диаметрными размерами, а также акустическими свойствами элементов ударной системы, формой и размерами инструмента) и технологическими (энергией и частотой ударов, статической составляющей нагрузки, подачей) параметрами статико-импульсной обработки [116, 181]. Данная работа значительно расширила представления о процессе ВДУ, однако автор ограничился исследованием волновых процессов протекающих только в ударной системе, без учета волновых состояний, формируемых в очаге деформации. Полученные аналитические зависимости имели большое число допущений: не

учитывалось влияние более широкого набора физико-механических свойств и размеров обрабатываемого материала, геометрических размеров всех элементов ударной системы, возможность применения выявленных зависимостей при комбинировании ВДУ с другими технологиями.

В 2009 году С.В. Баринов в диссертационной работе «Повышение сопротивления контактному выкрашиванию гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой» определил связь между параметрами гетерогенной структуры материала, характеризующими размер, количество и процентное соотношение твердых и мягких составляющих, с одной стороны и сопротивлением контактному выкрашиванию – с другой. Установил технологическую возможность создания гетерогенно-упрочненной структуры с различными параметрами гетерогенности в процессе статико-импульсной обработки. Разработал конечно-элементную модель процесса статико-импульсного формирования гетерогенной структуры материала в программе Deform 3D [62]. Полученные в работе результаты расширили представления в возможностях гетерогенного ВДУ и эксплуатационной эффективности формируемого распределения твердо вязких участков в обработанном материале. Однако данные исследования проводились только на образцах из стали 45, что ограничивало применение гетерогенного ВДУ для обработки других марок материалов. А разработанная конечно-элементная модель не позволяла моделировать формирование ударного импульса в ударной системе, а использовала в расчетах параметры ударного импульса, ранее полученные экспериментально. Полученная модель не предусматривала комбинирование ВДУ с другими технологиями в силу сложности реализации данных идей в используемой версии программы Deform 3D.

В 2010 году, А.Н. Афонин в рамках докторской диссертации «Повышение эффективности накатывания резьб» разработал комплекс математических моделей, позволяющих установить характер связей между полями напряжений и деформаций и конструкторско-технологическими параметрами процесса, накатывания резьб со статическим и статико-импульсным нагружением деформирующего инструмента. Данная работа повысила эффективность и

расширила области применения резьбонакатывания для получения ответственных тяжело нагруженных резьб на заготовках из труднообрабатываемых материалов. Однако созданный комплекс математических моделей описывающий данный процесс применим только для технологии резьбонакатывания статико-импульсным нагружением деформирующего инструмента [54]. Полученные модели невозможно использовать для описания других возможностей ВДУ.

В 2012 году А.В. Волобуев в диссертационной работе «Определение рациональной режимной области статико-импульсной обработки посредством моделирования процесса», установил рациональные режимные области статико-импульсной обработки посредством моделирования процесса и разработал системы обоснованного выбора параметров обработки в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя [71]. Однако разработанный информационно-аналитический комплекс, отражающий взаимосвязи между технологическими и конструкторско-технологическими параметрами СИО с одной стороны, и показателями качества обрабатываемого поверхностного слоя с другой стороны представляет собой набор регрессионных моделей, объединенных на одной платформе [71]. Это позволяет комплексу эффективно выполнять поставленные задачи, но только в рамках принятых ограничений и ранее выполненных экспериментальных исследований, нашедших свое отражение в регрессионных моделях. Это сдерживает применение комплекса для исследования новых возможностей ВДУ и условий его комбинирования с другими технологиями.

В 2013 в диссертационной работе Д.Е. Тарасова «Повышение контактной выносливости комбинированным упрочнением статико-импульсной обработкой и цементацией» впервые предпринята попытка разработки новой эффективной технологии комбинированного упрочнения волной деформации с последующей цементацией, позволяющая сформировать сложно структурированный несущий слой, содержащий твердую градиентно и равномерно упрочненную поверхность, опирающуюся на гетерогенно упрочненный подслой [191]. Это позволило установить вид связи между эксплуатационным показателем сопротивления контактому изнашиванию, комплексным технологическим параметром статико-

импульсного упрочнения волной деформации, длительностью цементации [191]. Эффективность разработанной технологии подтверждена преимущественно экспериментально, а предложенные регрессионные модели пригодны лишь для определения получаемых параметров качества для достаточно узкого диапазона обрабатываемых материалов и режимов ВДУ.

В 2013 В.В. Морин в диссертационном исследовании «Повышение эффективности деформирующе-режущего дорнования статико-импульсным нагружением и эпиламиранием инструмента» установил высокую эффективность разработанной технологии обработки отверстий по схеме деформирующе-режущего дорнования с косоугольным резанием и статико-импульсным нагружением эпиламированного инструмента. Это позволило получить увеличенную до 3 мм глубину упрочнения, повысить микротвердость упрочненного поверхностного слоя до 8700 МПа, обеспечить шероховатость обработанной поверхности R_a - до 1,6 мкм, без потери точности обработки. В данной работе впервые использовалась технология ВДУ для обработки отверстий, а большая эффективность её применения обеспечивалась за счет использования конечно-элементной модели процесса в программе Deform 3D [135]. Однако модель имела высокую погрешность (до 20%), при выполнении теоретических расчетов.

В 2020 году А.В. Яшин в диссертационной работе «Технологическое обеспечение качества каркасных деталей из алюминиево-магниевого сплава многоконтактным волновым деформационным упрочнением», достиг повышения качества поверхностного слоя и сопротивления усталости сложнопрофильных плоских каркасных деталей из алюминиево-магниевого сплава технологическим обеспечением многоконтактного волнового деформационного упрочнения [210]. Для достижения данных результатов автор работы разработал конечно-элементную модель многоконтактного волнового деформационного упрочнения, позволяющую в зависимости от конструктивно-технологических параметров многоконтактной инструментальной оснастки определить параметры импульса в очаге деформации и параметры качества градиентно упрочненного поверхностного

слоя детали. В работе удалось установить закономерности влияния количества, формы и расположения инструментов в инструментальной оснастке на форму, энергию и коэффициент передачи энергии ударного импульса в очаг деформации, глубину и степень упрочнения поверхностного слоя детали [210]. Однако использование базы LS-DYNA для создания комбинированных (гибридных) технологий с ВДУ, в том числе в высокотемпературных средах практически невозможно, так как версия программы, используемая на момент выполнения работы, преимущественно предназначена для моделирования быстротечных процессов ($10^{-5} \dots 10^{-8}$ с).

В 2021 год С.О. Федонина в диссертационной работе «Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термдеформационным упрочнением» впервые разработала комбинированную технологию волнового термдеформационного упрочнения (ВТДУ) синтезируемой из проволоки поверхности детали, установила связь технологических факторов и стратегии реализации ВТДУ с микроструктурой, твердостью и прочностью упрочненного материала [201]. В работе разработана технологическая стратегия реализации ВТДУ во взаимосвязи с выявленными при анализе созданной МКЭ динамической модели температурных полей, возникающих при синтезе детали из проволоки 3DMP-методом, закономерностями нагрева и охлаждения отдельных синтезируемых слоев и детали в целом [201]. Однако разработанная в программе Ansys конечно-элементная динамическая модель температурных полей, возникающих при синтезе детали из проволоки 3DMP-методом имеет ряд несовершенств. Так, данная модель предназначена только для моделирования технологии аддитивного синтеза методом 3DMP и не предусматривает последующего использования технологии ВДУ. В виду отсутствия автоматизации, разбивка модели детали на выплавляемые в единицу времени элементы производится вручную. Это приводит: к высокой трудоемкости процесса; возможности допущения ошибки (из-за громадного числа поверхностей) при выборе той или иной наплавляемой поверхности, что сводит на нет все ранее выполненные работы. Необходимость изменения энергетических режимов метода

3DMP приводит к полному ручному перестроению модели, а это десятки тысяч элементов.

Широкое производственное применение комбинированных технологий на основе ВДУ требует более глубокого исследования комбинированных процессов. В связи с необходимостью освоения северных регионов страны, эксплуатации ресурсопределяющих изделий в условиях не только нормальных, но и пониженных температур, особое значение имеет обеспечение высоких механических свойств упрочненных материалов при низких и повышенных температурах.

Совершенствование ВДУ осложнено большим количеством управляемых технологических факторов. Экспериментально исследовать их влияние трудоемко, долго, дорого. Теоретическая сложность самого процесса на сегодня не позволяет его описать без серьезных допущений, сопровождающихся потерей точности прогноза. Существующие модели ВДУ – узконаправлены и имеют широкий набор ограничений. Поэтому задача по разработке конечно элементной модели, как универсальной цифровой платформы, как для моделирования непосредственно процессов ВДУ, так и их комбинирования с другими технологиями является актуальной.

Более глубокое исследование влияния ВДУ на: макроструктурную технологическую наследственность; закономерности комбинированных процессов сварки и наплавки с ВДУ; 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 реальных изделий, расширить область применения ВДУ.

1.5 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.

ВЫВОДЫ ПО 1 ГЛАВЕ

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.

2. Установлено, что в силу своих больших габаритов и испытываемой нагрузки, крупногабаритные ресурсопределяющие детали нуждаются в формировании в своем поверхностном слое упрочненной области толщиной более 5 мм, обеспечивающей перекрытие места залегания опасной точки.

3. Анализ способов обеспечения параметров качества показал, что возможности традиционных способов упрочнения недостаточны, глубины их упрочнения, как правило, достигают 2-3 мм и только динамические деформационные способы упрочнения способны достичь требуемой глубины упрочнения.

3. Установлена перспективность применения ВДУ для упрочнения крупногабаритных ресурсопределяющих деталей, так как ВДУ из-за наличия большого числа управляемых технологических параметров, позволяет создавать гетерогенно упрочненные области в поверхностном слое на глубине до 15 мм и формировать сжимающие остаточные напряжения.

4. Установлена целесообразность применения технологии волнового деформационного упрочнения в составе комбинированных технологий сварки и наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP).

5. Выявлены направления совершенствования технологии волнового деформационного упрочнения, необходимые для выявления новых зависимостей и закономерностей ВДУ изделий, что расширит область применения ВДУ.

.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И ФИКСИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА

2.1 Общая методика исследований

Повышение эффективности технологии волнового деформационного упрочнения требует разработки комплекса взаимосвязанных математических моделей, характеризующих геометрические и силовые характеристики процессов, происходящих в очаге деформации. Структурная схема исследований, необходимых для выполнения поставленных задач и достижения цели, представлена на рисунок 2.1.

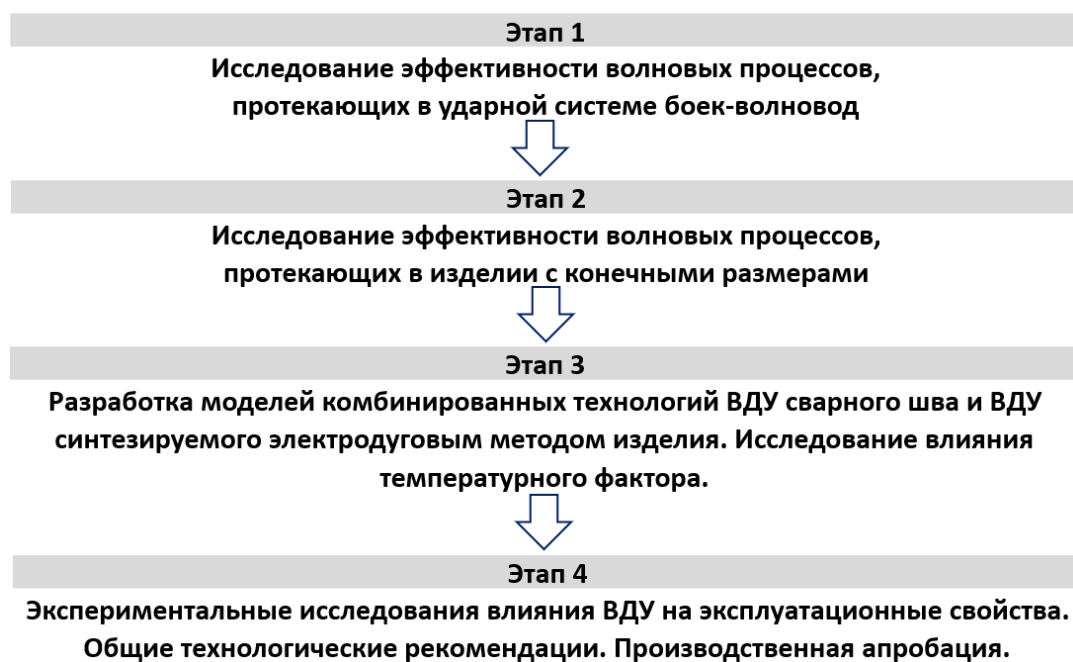


Рисунок 2.1 Структурная схема исследований

Разработка научно обоснованных рекомендаций по направлениям совершенствования технологии ВДУ требует проведения комплекса исследований. В связи с этим совершенствование технологии ВДУ проводилось в несколько этапов.

На первом этапе исследовалась возможность повышения эффективности волновых процессов, протекающих в ударной системе боек-волновод, а обрабатываемая деталь представляет собой полупространство (без учета волновых процессов в обрабатываемом материале). Для этого разрабатывается конечно элементная модель ударной системы ВДУ, на которой проводилось исследование влияния размеров поперечных сечений стержневой ударной системы и влияния геометрических размеров бойка на эффективность передачи энергии ударного импульса в очаг деформации [69]. Исследуется влияние инструмента на эффективность ВДУ при использовании одноконтантной и многоконтантных ударных систем. Определяется степень влияния типа обрабатываемого материала на эффективность волнового деформационного упрочнения [109].

На втором этапе исследуются процессы, протекающие при ВДУ изделий, но уже с учетом влияния конечных размеров обрабатываемого изделия на эффективность его упрочнения. Для этого проводились теоретические и экспериментальные исследования влияния размеров обрабатываемого изделия на эффективность ВДУ. Устанавливалось влияние наличия форм и полостей в образце элементарной формы на эффективность ВДУ. Исследовалось влияние материала и размеров изделия на результаты упрочнения на одновременное упрочнение волной деформации лицевой и тыльной сторон образца. Оценивалось влияние ВДУ на изменение технологической наследственности в обрабатываемом изделии.

На третьем этапе разрабатывались подходы к моделированию ВДУ, как самостоятельного процесса, так и в составе комбинированных технологий. Разрабатывались модели комбинирования ВДУ с технологическим процессом сварки и наплавки-аддитивного синтеза. Данные комбинированные модели позволили установить взаимосвязи между конструкторскими и технологическими параметрами процессов с формируемыми параметрами качества. С целью расширения технологических возможностей ВДУ и получения необходимой информации для моделирования комбинированных технологий сварки и аддитивного синтеза с применением ВДУ, экспериментально исследовалось влияние температурного фактора - температуры упрочняемого материала в

диапазоне 20...500°C. Выполнено исследование технологических возможностей термдеформационного процесса в плане обеспечения высоких механических и эксплуатационных свойств изделий, работающих при низких и повышенных температурах. Исследовалось влияние температуры эксплуатации изделий в диапазоне минус 60...+ 300°C на механические свойства нескольких видов сталей после их ВДУ при различных температурах [156].

На четвертом этапе выполнялись экспериментальные исследования влияния ВДУ на эксплуатационные свойства: сопротивление контактному выкрашиванию, циклическую прочность сварных швов, коррозионную стойкость [58]. Сформулированы общие технологические рекомендации. Выполнена производственная апробация предлагаемых решений с применением технологии ВДУ, в том числе в составе комбинированных технологий.

На основе структурной схемы разработана общая методика исследований, определены условия проведения экспериментов и математический аппарат для обработки экспериментальных данных.

В результате выполненных исследований разработаны математические модели ВДУ. Построение математических моделей выполнялось с использованием программных продуктов: Ansys, Exel, Statistika, Mathcad.

Основные результаты работы прошли промышленную апробацию в реальных условиях машиностроительных предприятий. На основе проведенных исследований разработаны общие технологические рекомендации.

2.2 Выбор системы инженерного анализа для моделирования процессов ВДУ

В современном мире цифровые технологии рассматриваются как средство описания полного цикла жизни изделия – от проектирования и изготовления, до эксплуатации и утилизации. Наукоемким отраслям промышленности поставлена грандиозная задача еще до запуска изделия и составляющих ее деталей в производство, создать, изготовить и испытать в условиях эксплуатации математические модели - цифровые двойники процессов и изделий. Наименее проработанными с позиции моделирования являются технологические процессы

изготовления деталей. Проблемы их моделирования во многом связаны не только с большим количеством технологических факторов, но и с изменением формы и размеров детали в процессе обработки, непрерывно и динамически меняющимся напряженно-деформированным состоянием изделия, необходимостью учета тепловых процессов [18]. Для решения такого рода задач широко применяется метод конечных элементов (МКЭ), который основан на моделировании физических полей, описываемых системами дифференциальных уравнений. На основе метода конечных элементов работают системы современного инженерного анализа (CAE - системы). В настоящее время существует значительное число различных CAE-систем, как универсальных (ANSYS, MSC.Nastran, ABAQUS и т.д.), так и специализированных (Qform, MSC.SuperForm, MSC.SuperForge, Deform и т.д.) [62, 163].

Однако, особую сложность представляет решение проблемы передачи информации об изделии при переходе от одной операции к другой. Так как для моделирования разнообразных операций обработки, как правило, разработаны и предлагаются уникальные программные продукты, на этапе межоперационного перехода неизбежна потеря части информации. Проблема стоит особенно остро для передачи информации между технологическими процессами, отличающимися по физическому характеру воздействий на материал исходной заготовки [18].

Одним из мировых лидеров в данной области является CAE-система ANSYS. Данная система состоит из различных модулей и широко применяется по всему миру для решения разнообразных задач во многих отраслях. ANSYS дает возможность моделировать значительные объемные пластические деформации и обладает современным, интуитивно понятным графическим интерфейсом [62, 103].

Программный модуль ANSYS / LS-DYNA использует явную постановку решения задач и удобен для моделирования кратковременных высокоскоростных процессов контактного взаимодействия нескольких тел, таких как процессы поверхностного пластического деформирования (ППД). Примеры использования модуля ANSYS/LS-DYNA для моделирования упрочняющей обработки статическими и динамическими методами ППД, в частности созданы процессы обработки роликом, алмазного выглаживания, дробеструйной обработки, приведены

в работах [185, 186]. Основными выходными данными были остаточные напряжения. Расхождение опытных и теоретических результатов данных методов ППД не превысило 5%. В работе [55] была исследована модель процесса ППД сложнопрофильным инструментом. Установлена высокая сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных по распределению микротвердости. Установлены закономерности формирования напряжений и деформаций в очаге деформации в зависимости от радиуса упрочняющего инструмента [210].

Для перехода на качественно новый уровень решения научных и производственных задач по совершенствованию уже известных технологий и созданию новых комбинированных необходимо и крайне актуально создание верифицированной единой конечно-элементной модели. Для моделирования этого гибридного процесса достаточно сложно, но необходимо подобрать либо узко специализированные программные продукты и решить проблему передачи информации из одной программы в другую, либо воспользоваться более универсальным программным продуктом, позволяющим моделировать принципиально разные технологические процессы аддитивного синтеза и деформационного упрочнения.

При создании комбинированных моделей, подразумевающих решение тепловых задач, например, в процессе сварки или аддитивного синтеза, тоже встречается ряд проблем. Для моделирования таких процессов методом конечных элементов на рынке существует множество программных продуктов.

Так, для моделирования аддитивного синтеза используется программное обеспечение Additive Manufacturing ESI Group. Оно позволяет выполнять на макроуровне (1-10 мм) оценку точности изготовления (по короблениям), остаточных технологических напряжений и твердости. Однако, этот программный продукт узко специализирован, а процесс аддитивного синтеза изделий из порошка существенно отличается от синтеза изделий из проволоки, что делает применение ПО Additive Manufacturing ESI Group для решения поставленных задач нецелесообразным.

Вследствие новизны самой технологии 3DMP-синтеза и отсутствия большого количества доступного для исследований оборудования, отработка технологии изготовления каждой новой детали требует проведения НИР. Новая технология хотя и создана на базе теории и практики сварки, тем не менее, имеет принципиальные отличительные особенности. При реализации процессов сварки, в отличие от WAAM, нет необходимости решать задачи формообразования, при разработке эквидистанты движения фидстока заботиться о точном соблюдении заданной траектории и скорости перемещения по ней. Так как синтезируемые изделия преимущественно габаритные, необходим расчет нестационарных температурных полей, величины коробления (усадки), сказывающейся на точности формы и размеров изделия. Программное обеспечение, универсальные модели процесса отсутствуют не только в нашей стране, но и за рубежом.

Создание так необходимых комбинированных моделей процесса, позволяющих предсказать результаты и рациональные режимы синтеза, невозможно без экспериментальной верификации, доступа к действующему оборудованию. Анализ возможностей современных программных комплексов, которые могли бы использоваться при разработке моделей аддитивного процесса 3DMP-синтеза показал, что лидерами в достоверном конечно-элементном моделировании процесса сварки являются программы Sysweld и ANSYS, однако Sysweld не только в 3,5 раза дороже ANSYS, но и является узкоспециализированным программным продуктом.

2.3 Оборудование для исследования механических и эксплуатационных свойств

При проведении экспериментальных исследований возможностей совершенствования технологии ВДУ, необходимо проводить измерения следующих величин: параметров качества поверхностного слоя (микротвердости, прочности, ударной вязкости, пластичности, глубины упрочнения), эксплуатационных характеристик (сопротивления контактному выкрашиванию,

прочности в условиях знакопеременных нагрузок, коррозионной стойкости), как при комнатной температуре, так и при повышенных и пониженных её значениях.

Для определения микротвердости по шкале Виккерса использовался автоматический твердомер Qness Q10 A+ (рисунок 2.2).

Ударную вязкость в различном температурном диапазоне (ГОСТ 9454-78) определяли с помощью копра PSW750 и криогенной камеры – термостата Landa proline gr890 (рисунок 2.3.).

Прочностные характеристики определяли на универсальной электромеханической машине с компьютерным управлением Time WDW-100E, а используемый её модуль Timeyd-120 higt low temperature chamber для нагрева (до $+350^{\circ}\text{C}$) и охлаждения (до -120°C) представлены на рисунке 2.4.



Рисунок 2.2 - Твердомер Qness Q10 A

Для оценки прочностных свойств материалов, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, использовалась серво-гидравлическая испытательная машина Torsion 10 кНм (рисунок 2.5). Она 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 [59].



а)



б)

Рисунок 2.3 - Копер PSW750 (а) и термостат Landa proline rp890 (б)



а)



б)

Рисунок 2.4 - Модуль Timeyd-120 high low temperature chamber для нагрева (до +350°C) (а) и охлаждения (до -120°C) (б) образцов универсальной электромеханической машины с компьютерным управлением Time WDW-100E, предназначенной для исследования прочностных характеристик

Оценивали число циклов нагружения до разрушения. Испытания выполнялись при постоянном крутящем моменте, рассчитанном исходя из размеров образца и предела прочности материала на кручение [59].

Исследования коррозионной стойкости (ГОСТ 28207-89, ГОСТ 9.908-85.) проводились на установке для проведения коррозионных испытаний в соляном тумане S1000 (рисунок 2.6). Потеря массы образцов после испытаний на коррозионную стойкость будет оцениваться на весах CE224-С.

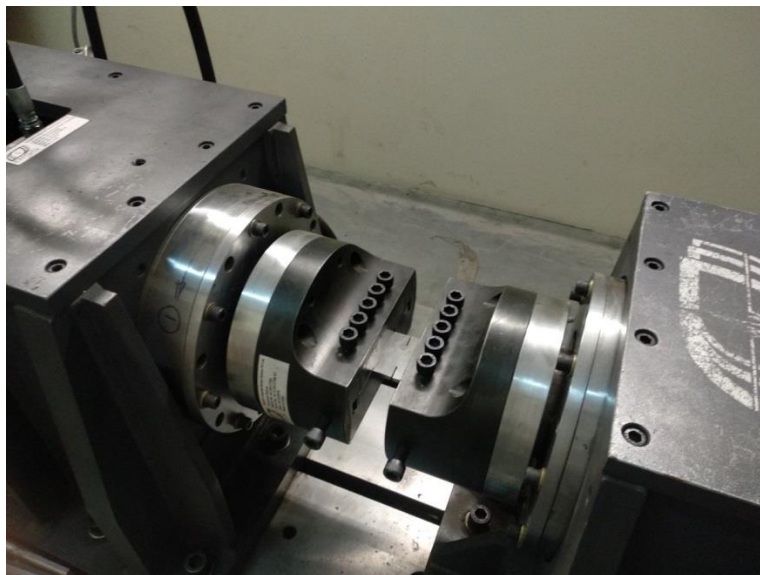


Рисунок 2.5 - Серво-гидравлическая испытательная машина Torsion 10



Рисунок 2.6 - Установка для проведения коррозионных испытаний в соляном тумане S1000 [85]

Для контроля температуры во время аддитивного синтеза использовался тепловизор Fluke TiX660 (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 - Тепловизор Fluke TiX660

2.4 Экспериментальное оборудование, стенды и установки для исследования процессов волнового деформационного упрочнения

Установка для ВДУ

Установка для волновой деформационной обработки (рисунок 2.8), состоит из генератора механических импульсов (ГМИ) 1 (рисунок 2.9) [130, 150, 175]. На передней части ГМИ 1 крепится инструмент 2, который поджимается к образцу 3 корпусом ГМИ 1 через резиновый демпфер 4. ГМИ 1 монтируется на плите 5, имеющей возможность вертикального перемещения по колоннам 6 которое осуществляется гидроцилиндром 7, закрепленным на траверсе 8 пальцем 9. При необходимости плита 5 может на колоннах 6 жестко фиксироваться накладками 10. Фиксация плиты 5 на колоннах 6 осуществлялась накладками 10 [62].

Точность расположения плиты 5 относительно колонн 6 обеспечивают направляющие.

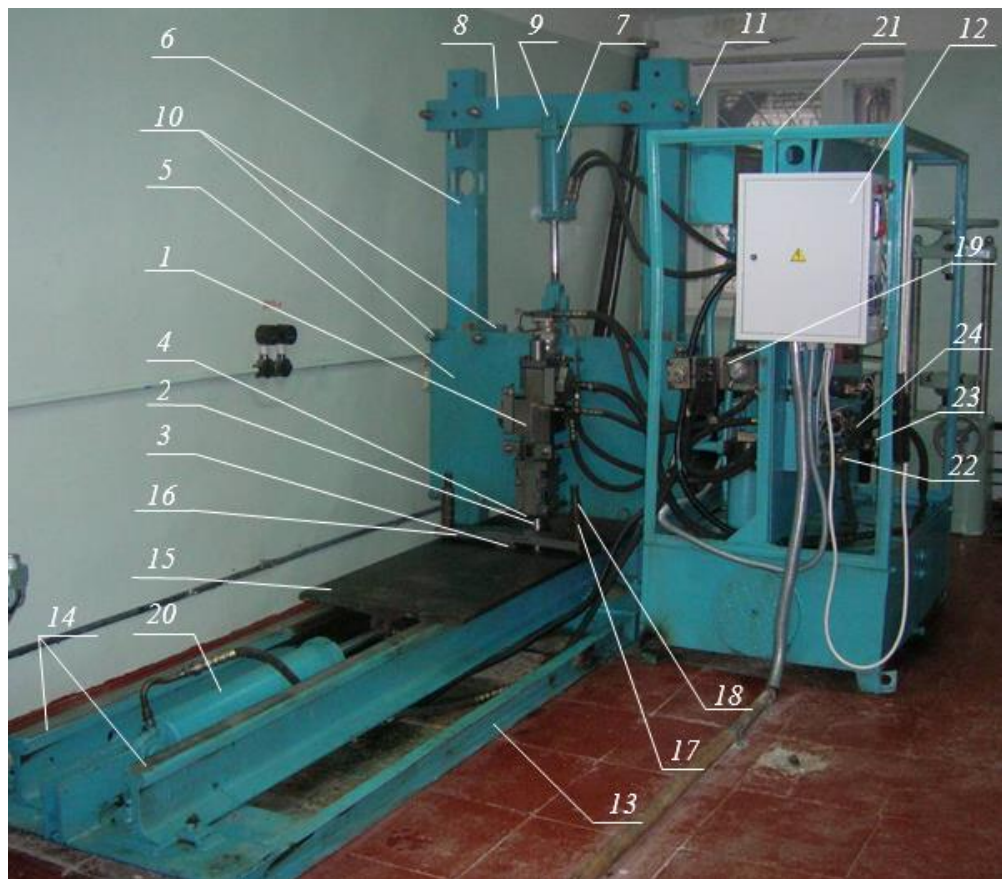


Рисунок 2.8 - Установка для ВДУ

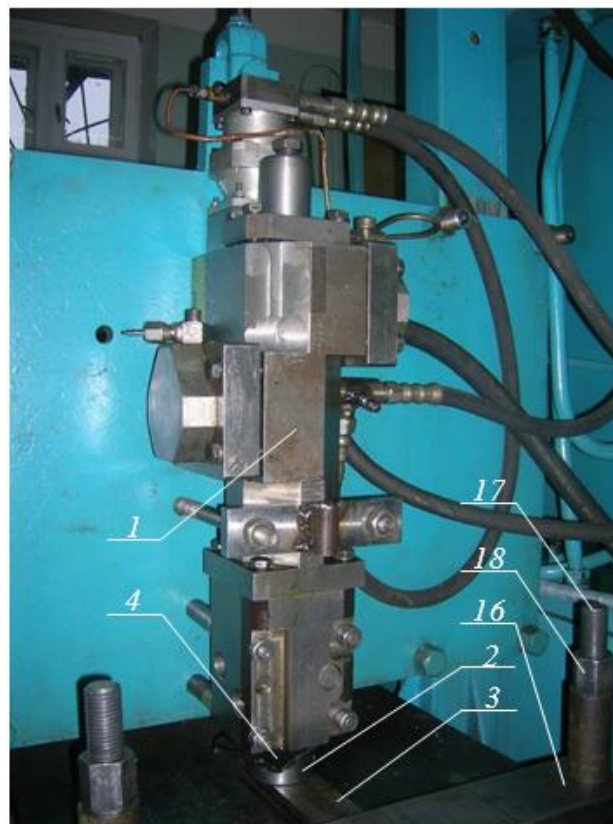


Рисунок 2.9 - Генератор механических импульсов для процесса ВДУ

Траверса 8 крепится накладками 11 к верхней части колонн 6 и имеет возможность перемещения по ним для настройки исходного положения плиты 5 с ГМИ 1 под высоту обрабатываемого образца 3. Колонны 6 монтируются на основании 13, к которому жестко крепятся направляющие 14 для рабочего стола 15. Крепление образца 3 на рабочем столе 15 осуществляется накладками 16 посредством шпилек 17 и гаек 18. Стол 15 имеет возможность продольного перемещения по направляющим 14. Перемещение стола 15 осуществляется при помощи гидроцилиндра 20, жестко базирующегося на основании 13 [62]. Привод гидроцилиндра 20 перемещающего стол 15, привод гидроцилиндра 7, осуществляющего статический поджим плиты 5 и привод генератора механических импульсов 1 получают питание от маслостанции 21 представляющую отдельный модуль с выносным пультом управления 12. Управление частотой f энергией ударов, скоростью перемещения S стола 15, вертикальным перемещением ГМИ вдоль колонн 6 осуществляется с помощью блока гидрораспределителей 22 и дросселей 19 расположенных на маслостанции 21.

Технологическими факторами статико-импульсной обработки (таблице 2.1) на данной установке являются энергия и частота ударов ГМИ, скорость перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности, сила предварительного статического поджатия инструмента к заготовке, форма и размеры инструмента, а также число проходов. Контроль процесса упрочнения осуществляется по давлению и расходу жидкости в напорных магистралях, подведенных к ГМИ, гидроцилиндрам 7 и 20 [62].

На рисунке 2.10 приведен пример одного из инструментов - стержневой ролик из стали Р18 диаметром $D_p=10$ мм, шириной $b=15$ мм, который фиксируется в волноводе гайкой.

Упрочнение при ВДУ позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру. При ВДУ пластическое деформирование упрочняемого материала осуществляется импульсной нагрузкой, которая является следствием возникновения при ударе в ударной системе волн деформации, и управляется

изменением геометрических параметров ударной системы. Статическая составляющая нагрузки практически не участвует в процессе упругопластического деформирования и предназначена для наиболее полного использования импульсной.

Таблица 2.1

№ п/п	Параметры	Величина
1	Максимальная энергия удара, Дж	300
2	Пределы регулирования частоты ударов, Гц	3-40
3	Давление рабочей жидкости в гидросистеме, МПа	16
4	Давление в сливной магистрали, МПа	0,5
5	Расход рабочей жидкости, л/мин	50
6	Масса ГМИ, кг	95
7	Габариты, мм	220x295x950
8	Размер рабочей поверхности стола, мм	5500x600
9	Наибольшее продольное перемещение стола, мм	2400
10	Вертикальное перемещение ГМИ, мм	500
11	Перемещение верхней траверсы, мм	500
12	Скорость перемещения стола относительно инструмента, мм/мин	0...2000
13	Максимальное усилие статического поджима, кН	40
14	Максимальные размеры обрабатываемой заготовки, мм	5500x550x500
15	Мощность двигателя гидронасоса маслостанции, кВт	18
16	Габаритные размеры, мм	4700x980x1980
17	Масса, кг	1700

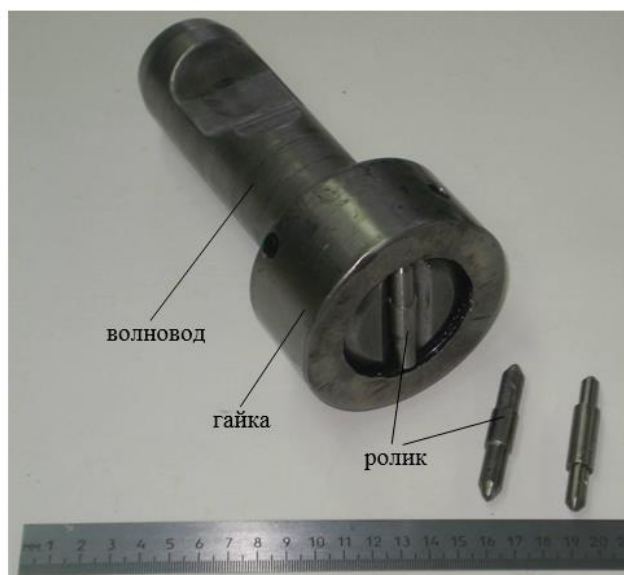


Рисунок 2.10 - Волновод и стержневые ролики для ВДУ

В результате импульсного воздействия, упрочненная поверхность формируется из пластических отпечатков, которые перекрываются между собой в определенном порядке. Степень перекрытия пластических отпечатков характеризуется коэффициентом перекрытия K . Если $K = 0$, то край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, то отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента ВДУ в одно и то же место [62].

Следы отпечатков ударов инструмента с разными величинами коэффициента перекрытия K представлены на рисунок 2.11 [94, 111-113].

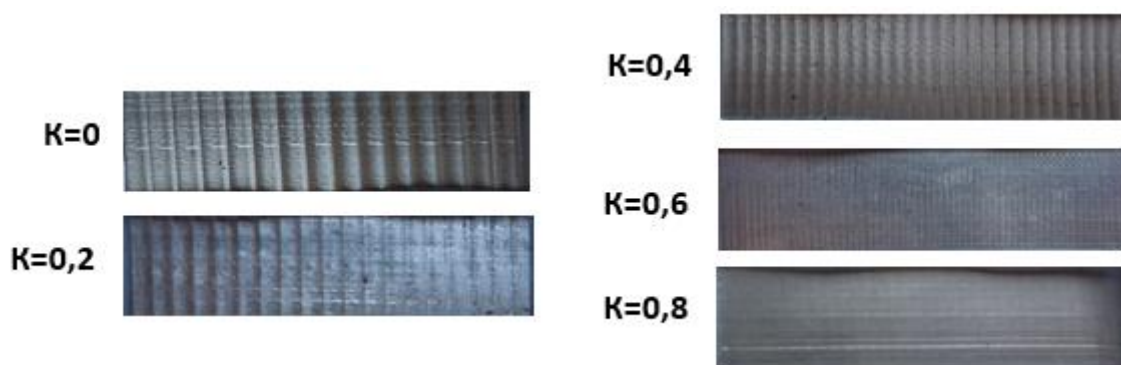


Рисунок 2.11 - Следы отпечатков ударов инструмента с разными величинами коэффициента перекрытия K

Устройства для исследования сопротивления контактному выкрашиванию

Разработано вертикальное исполнение устройства для испытаний на долговечность плоских поверхностей деталей машин при действии контактных циклических нагрузок содержащее обкатник 1 с деформируемыми телами 2, который выполнен в виде оправки, один торец которой представляет собой конический хвостовик 1^K для установки и крепления в шпинделе 3, например, вертикально-сверлильного станка или другого привода вращательного движения (рисунок 2.12) [55, 56]. На другом торце обкатника, выполненного в форме диска 1^D , жестко закреплен болтами 4 верхний держатель 5 в форме диска с испытываемыми образцами.

Кроме того, к диску 1^D подвижно закреплен сепаратор 6, выполненный, например, из текстолита, позволяющий разместить по круговым концентрическим траекториям на различном расстоянии R_1 , R_2 от центра деформирующие тела 2, например, в виде шаров.

Центрирование сепаратора 6 относительно держателя с образцами 5 осуществлено винтом 7, который соединяет их через отверстия, просверленные в образце и сепараторе. Зазор между сепаратором 6 и верхним держателем с образцами 5 обеспечивается шайбой 8. При сборке сила заворачивания винта 7 должна обеспечивать свободное вращение сепаратора 6 относительно держателя с образцами 5.

Особенностью конструкции предлагаемого устройства является то, что деформируемое тело 2 контактирует одновременно с двумя держателями с образцами: нижним 9 и верхним 5, воздействуя на них. Нижний держатель 9 жестко закреплен в зажимном приспособлении 10. Испытываемые образцы 11 закрепляются в нижнем и верхнем держателях и выполнены в виде прямоугольной или другой формы плитки.

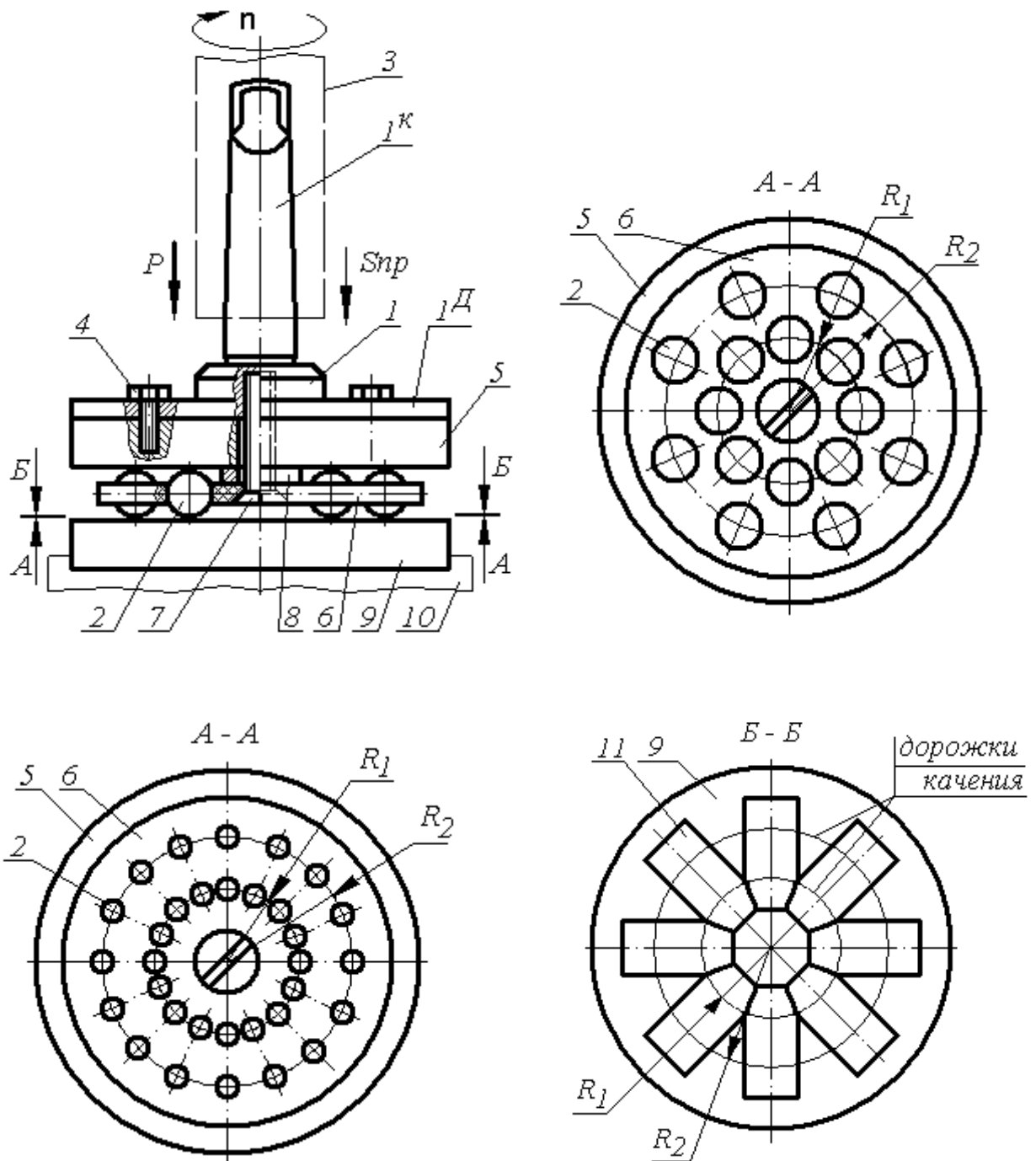


Рисунок 2.12 - Экспериментальный стенд для испытаний на действие контактных циклических нагрузок плоских образцов (вертикального исполнения)

Испытания осуществляются следующим образом. Через конус 1К обкатника 1 верхний держатель с образцами 5 за счет вертикального перемещения шпинделя 3, например, вертикально-сверлильного станка поджимается через деформируемые тела 2, установленные в сепараторе 6, к нижнему держателю с образцами. Сила

прижима P должна быть предварительно тарирована и пропорциональна силе нажатия на рукоятку продольного перемещения шпинделя станка, которая регулируется подвешиваемыми к ней грузами (не показаны). Включается вращение шпинделя с заданной частотой n , при этом деформируемые тела совершают круговое обкатывающее движение по поверхности верхних и нижних образцов.

Испытания могут проводиться как со смазкой, так и без смазки. Для этого в зону контакта осуществляется регулярный подвод индустриального масла известными способами.

Для оценки влияния размеров пятна контакта на процесс контактно-усталостного выкрашивания могут использоваться различные типы конструкций сепаратора 8, рассчитанных на использование в процессе испытаний деформируемые тела 2 различных диаметров. Поэтому при использовании деформируемых тел 2 небольшого диаметра количество дорожек будет больше. Например, при использовании деформируемых тел 2 диаметром 8,9 мм можно получить на пластине с образцами три дорожки качения, а при использовании деформируемых тел 2 диаметром 19 мм – две дорожки качения. Таким образом, на поверхности одного держателя с образцами можно получить пять дорожек качения и максимально использовать экспериментальную площадь образцов.

Испытания осуществляли на базе 10^6 циклов, при частоте вращения шпинделя 400 об/мин, время испытаний составляло 5,15 часа. После прохода $5 \cdot 10^5$ циклов нагружения испытания прерывали и производили осмотр дорожек качения с целью выявления критического износа. Затем данные осмотры проводили каждые $1 \cdot 10^5$ циклов нагружения до достижения базового числа циклов.

После прохода заданного числа циклов контактного нагружения, испытания завершали, образцы извлекали из держателей и подвергали лабораторным исследованиям [90, 131, 123, 140, 141, 165, 197, 198].

Описанная конструкция стенда для испытаний на действие контактных циклических нагрузок плоских образцов (вертикального исполнения) имеет следующую техническую характеристику:

Габаритные размеры, мм.....	280×170×170	
Масса, кг.....	8,5	
Количество образцов на одной пластине, шт.....	8	
Частота вращения обкатника, об/мин.....	до 400	
Диаметр шаров обкатника, мм.....	8,9	19
Количество шаров в обкатнике, шт.....	32	16
Количество шаров на одной дорожке качения, шт.....	8	8
Максимальный диаметр дорожки качения, мм.....	114,53	104,04
Минимальный диаметр дорожки качения, мм.....	78,88	67,63
Количество получаемых образцов за один эксперимент, шт.....	48	32

Методика испытаний на сопротивление контактному выкрашиванию

После ВДУ поверхность упрочненных образцов имеет следы от отпечатков в виде гребней (рисунок 2.11), чем меньше перекрытие, тем больше гребни. Для того чтобы убрать неровности и испытывать образцы на сопротивление контактному выкрашиванию в одинаковых условиях, поверхность образца шлифовалась, на режимах, обеспечивающих мягкое шлифование, без прижогов.

Образцы после испытаний на сопротивление контактному выкрашиванию очищались от масла и обезжиривались ацетоном. На очищенной поверхности наносились контуры границ дорожек упрочненных статико-импульсной обработкой. Дорожки катания шаров, разбивались на сектора, размеры которых не превышали поле захвата линзы большого инструментального микроскопа БМИ-1.

Образцы устанавливались на стол микроскопа БИМ-1 и фотографировались через его объектив при увеличении 1×50 по выделенным секторам (рисунок 2.13). С помощью микроскопа проводилось также измерение линейных размеров разбитых секторов образца с помощью встроенных микрометров с точностью 0,001 мм. В программе Компас, используя цифровые фотографии секторов и значения их линейных размеров, получали изображения секторов в масштабе 1:1. На полученных изображениях, обводились границы секторов и имеющиеся контактно-усталостные выкрашивания поверхности (рисунок 2.14). По обведенным контурам определялись их размеры, количество и площади [24, 25].

В результате была произведена оценка параметров сопротивления контактному выкрашиванию для каждого испытанного образца: площадь выкрашиваний и площадь дорожки качения.

Для качественной и количественной оценки эффективности упрочнения введены показатели, позволяющие сравнить размер и количество выкрашиваний упрочненной и не упрочненной областях:

За одну из основных характеристик, позволяющих оценить долговечность образцов после упрочнения, было принято сопротивление контактному выкрашиванию ΔI , позволяющее качественно и количественно сравнить величину выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной.

$$\Delta I = \frac{S_{\partial}}{S_{\partial 0}} \cdot \frac{\Sigma S_0}{\Sigma S} \quad (2.1)$$

где ΣS – суммарная площадь выкрашиваний на исследуемом участке, мм².; S_{∂} – площадь дорожки катания шаров на исследуемом участке, мм² (индекс "0" означает, что параметры характеризуют неупрочненную поверхность)

Сопротивление контактному выкрашиванию ΔI является комплексным параметром, учитывающим изменение в процессе испытаний размеров следов дорожек катания шаров, и площадь возникших на них выкрашиваний, что позволяет оценивать долговечность деталей машин, работающих в условиях контактной усталости [58, 62, 123, 131, 140, 141, 165, 197, 198].

Методика исследования микротвердости

После испытаний на сопротивление контактному выкрашиванию, для определения равномерности и глубины упрочненного слоя, производилось измерение микротвердости.

Для подготовки к измерениям микротвердости из пластины с образцами выпиливались фрагменты дорожек, упрочненных ВДУ в направлении подачи ролика. Резка образца осуществлялась на электромеханической пиле. Из вырезанных фрагментов упрочненных дорожек призматической формы изготавливались шлифы.

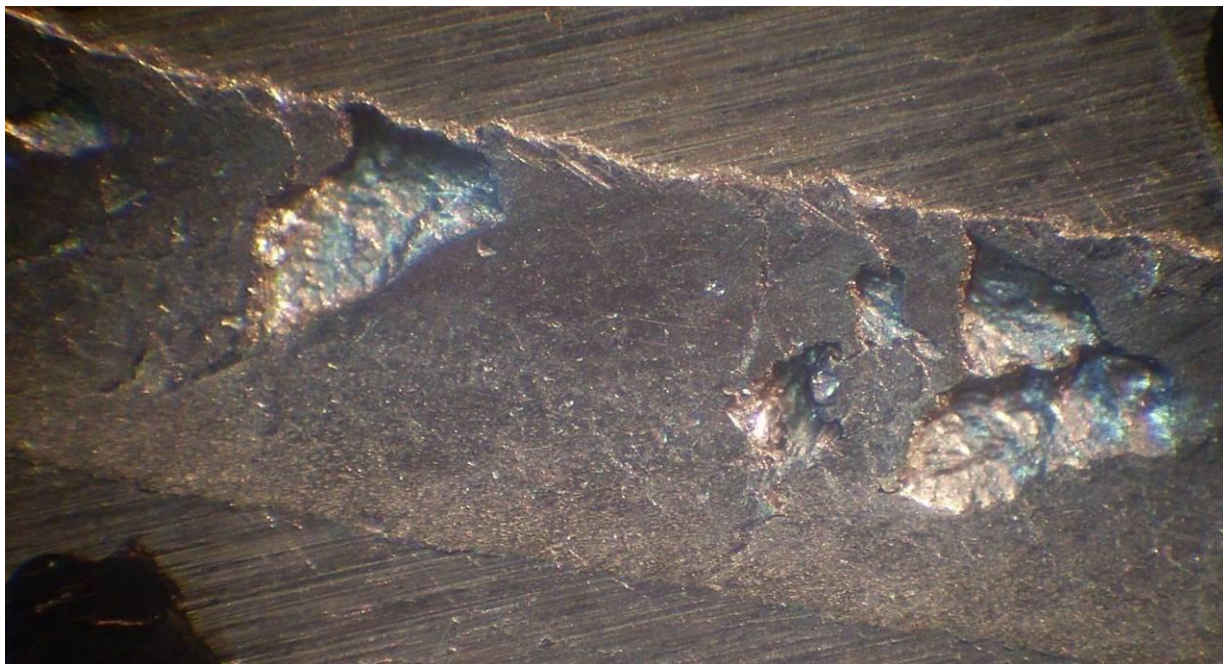


Рисунок 2.13 - Исследуемая поверхность образца при увеличении 1×50

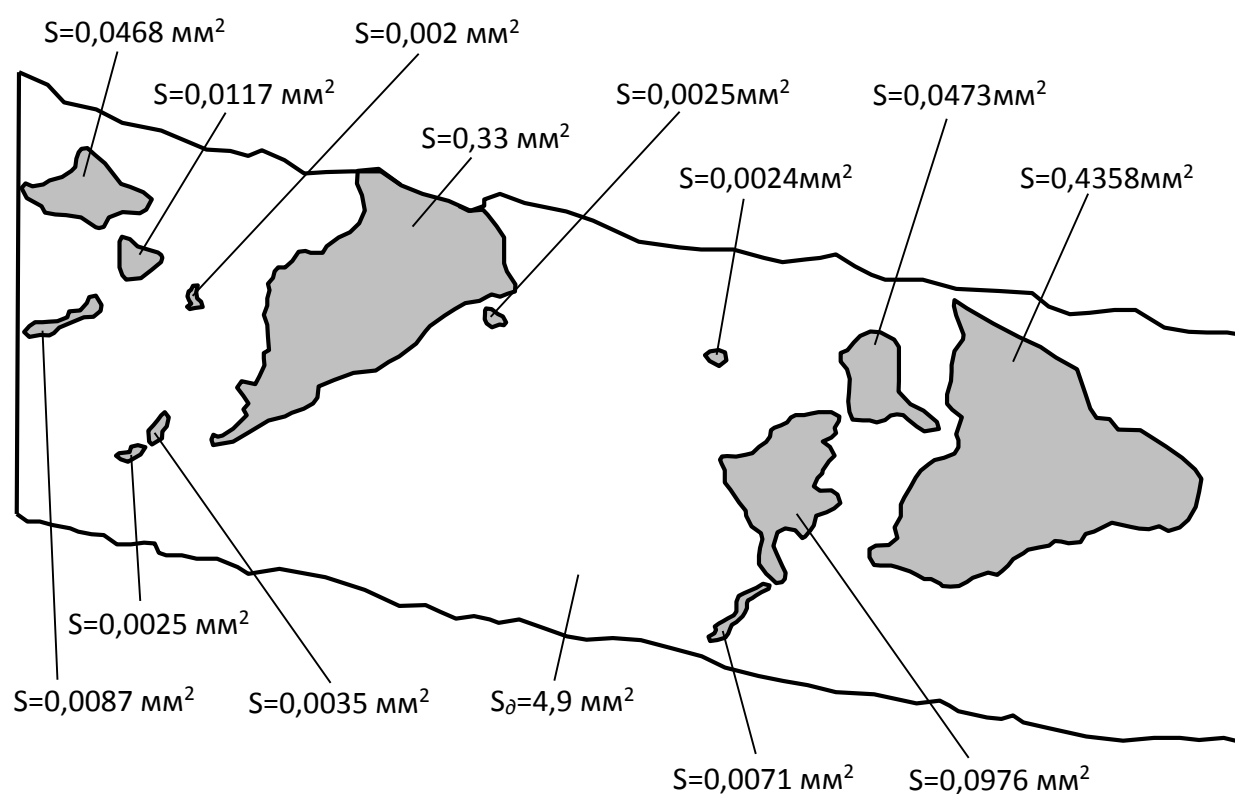


**Рисунок 2.14 - Контуры выкрашиваний для оценки их площади в программе
Компас**

Измерение микротвердости на вырезаны фрагментах упрочненных дорожек производилось по глубине упрочненного слоя и в направлении подачи ролика на расстоянии L . По выбранному шагу вглубь и вдоль упрочненной поверхности t_2 и t_1 проводили измерения карты микротвердости (рисунок 2.15) [62].

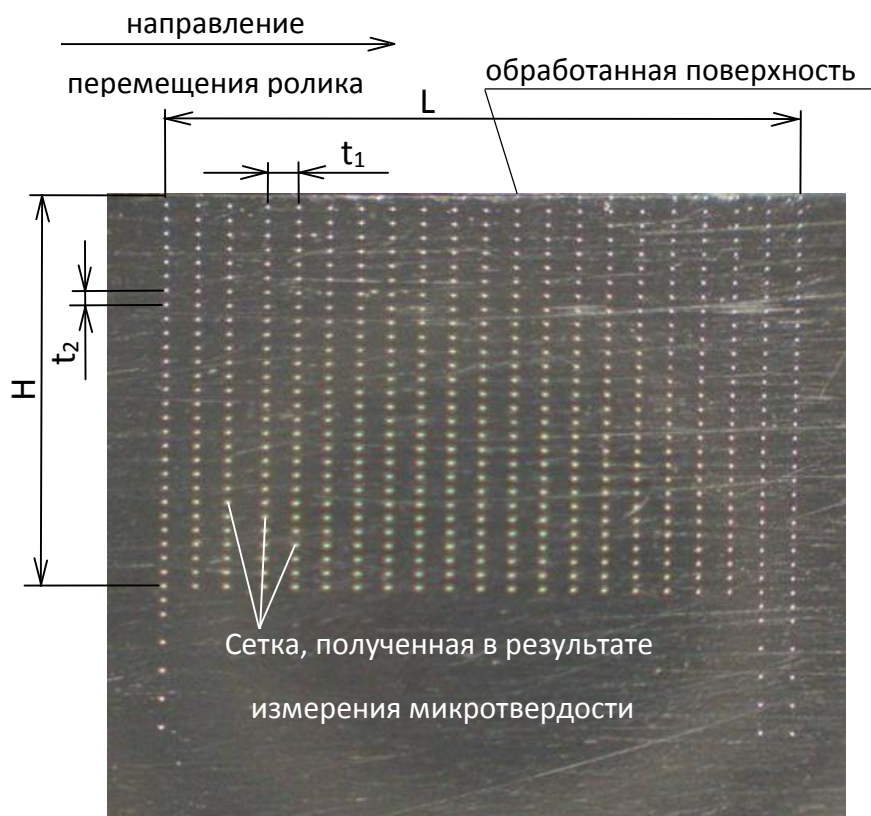


Рисунок 2.15 - Карта измерения микротвердости

Экспериментальный стенд для исследования процессов волнового деформационного упрочнения

Разработанное оборудование необходимо для выполнения экспериментальных исследований взаимосвязи между параметрами волны деформации, формой, размерами упрочняемых образцов и картой микротвердости упрочненного поверхностного слоя. Разработанная конструкция стенда состоит из портальной рамы 10, в которой по направляющим 15 происходит вертикальное перемещение плиты 8 с помощью гидроцилиндров 11 (рисунок 2.16) [209].

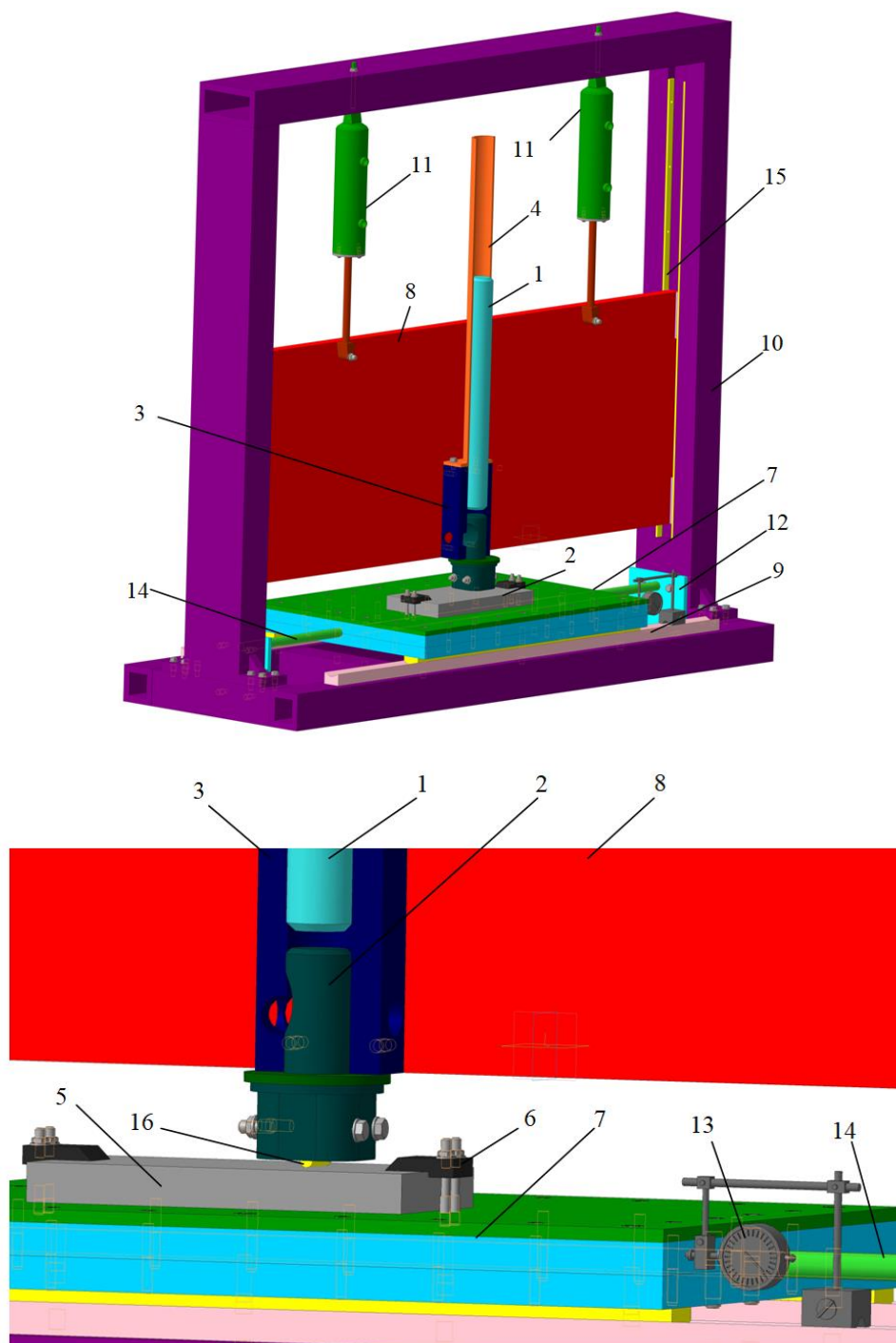


Рисунок 2.16 - Схема экспериментального стенда

Ударная система состоит из бойка 1 и волновода 2. Инструмент 16 закрепляется на нижнем торце волновода 2 и поджимается им к обрабатываемой поверхности 5. Использование трубчатой направляющей 4 позволяет избежать смещения и перекоса при падении бойка 1, обеспечить высокую повторяемость условий торцевого контакта бойка 1 с волноводом 2. Для монтажа направляющей 4 и волновода 2 к плите 8 предусмотрен корпус 3. Возможность смещения

обрабатываемой поверхности между ударами в поперечном направлении обеспечивается за счет перемещения стола 7 по поперечным направляющим 9. Перемещение стола осуществляется посредством ходового винта 14, который крепится к упору 12. Контроль величины смещения стола 7 в продольном направлении выполняется индикатором часового типа со щупом 13, установленным на стойке. В случае изменения диаметров бойка и волновода, в корпусе 3 и направляющей 4 предусмотрена установка поставочных втулок, компенсирующих изменение диаметральных размеров [209].

В случае работы стенда в режиме формирования единичных отпечатков от ударов инструмента 16, образец 5 крепится к столу 7 с помощью прихватов 6. При работе стенда в режиме регистрации ударного импульса вместо образца 5 устанавливается пьезоэлектрический датчик, который подключается к цифровому осциллографу АСК-3107L. Данный тип осциллографа имеет возможность подключения до четырех датчиков одновременно (например, в случае исследования особенностей многоконтактного нагружения при ВДУ) и обработки полученных данных на ЭВМ. При тарировке величины статического поджатия вместо нагружаемого образца 5 устанавливается датчик измерения силы, модели М50-5-С3 [209].

Диапазон изменения технологических факторов процесса ВДУ на экспериментальном стенде, представлен в таблице 2.2.

Испытания на стенде выполняются следующим образом. Нагружаемый образец 5 закрепляется на столе 7 с помощью прихватов 6. На волноводе 2, расположенном в корпусе 3, закрепляется инструмент 16 и с помощью плиты и гидроцилиндров 11, статически поджимается к нагружаемому образцу 5. Боек 1 с помощью троса (не показано), закрепленного на его торце, взводится на требуемую высоту, которая рассчитывается исходя из массы бойка и заданной энергии удара. После пуска боек 1, под действием собственного веса, наносит удар по торцу волновода 2, на котором жестко смонтирован инструмент 16. В результате, на исследуемой поверхности образца 5 формируется отпечаток деформирующей поверхности инструмента. Исходя из размера отпечатка, рассчитывается величина

подачи и требуемое расстояние между центрами отпечатков, обеспечивающее необходимую величину коэффициента перекрытия [209].

Таблица 2.2

№	Фактор	Размерность	Диапазон величин
1	Энергия удара	Дж	до 40
2	Длительность ударного импульса	Н	$10^{-5} \dots 10^{-4}$
3	Скорость удара	м/с	до 8
4	Величина предварительной статической нагрузки	кН	до 40
5	Длины: - бойка - волновода	мм мм	100-600 100-600
6	Диаметры: - бойка - волновода	мм мм	16-60 16-60

Затем, с помощью ходового винта 14, выполняется продольное смещение нагружаемого образца 5, на рассчитанную величину. Контроль величины перемещения обеспечивается с помощью индикатора 13. Далее вновь происходит статическое поджатие образца 5, волноводом 2 с инструментом 16 и наносится второй удар бойка 1 по нагружаемой поверхности 5. Таким образом, на обрабатываемом образце 5 формируется упрочненная дорожка, состоящая из отпечатков ударов инструмента, смещенных друг относительно друга на заданное расстояние. Количество наносимых ударов определяется планом эксперимента [209].

Установка для наплавки – аддитивного синтеза

Для синтеза заготовок для образцов используется установка, представленная на рисунке 2.17. Перемещение наплавочного стола, наплавочной горелки осуществляется с помощью ЧПУ приводов. В качестве источника синтеза в установке использовались несколько сварочных аппаратов.



Рисунок 2.17 - Установка для наплавки – аддитивного синтеза

2.5 Методика планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных

Для оптимизации процесса волнового деформационного упрочнения необходимо построить функциональную независимость выходных характеристик от факторов.

$$Y = F(\bar{X}), \quad (2.2)$$

где Y – оценка показателей качества;

$\bar{X}$ – вектор технологических факторов.

Основными показателями качества при ВДУ являются глубина и степень микротвердости, остаточные напряжения, шероховатость.

К основным технологическим факторам при ВДУ можно отнести: кинетическая энергия ударов, частота ударов, величина статической составляющей нагрузки, подача.

В связи со сложностью и многофакторностью процесса ВДУ получить аналитическое выражение зависимости их взаимосвязей не представляется возможным. Поэтому в работе было проведено конечно – элементное моделирование для получения данных расчетов, которые в дальнейшем обрабатывались с помощью регрессионного моделирования.

Построение математических моделей проводилось следующим образом:

1) Определялось среднее значение $\bar{Y}_i$ и дисперсия s_i^2 каждого опыта по формулам:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}, s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2, \quad (2.3)$$

где j и i – соответственно номер и число параллельных наблюдений в опыте (не менее трёх);

i – номер опыта

y_{ij} – значение параметра оптимизации в каждом опыте.

2. Рассчитывалось значение G- критерия Кохрена [54]:

$$G = \frac{s_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^m s_i^2}, \quad (2.4)$$

где m – число опытов;

$s_{i \max}$ – максимальная дисперсия в опытах.

и проверялась гипотеза однородности дисперсий сопоставлением расчетного G_3 с его табличным значением G_m [126, 154]. Если $G_3 < G_m$ гипотеза принималась.

3. Вычислялась дисперсия воспроизводимости эксперимента

$$s^2\{\bar{y}\} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^2 \quad (2.5)$$

4. Формулировалась матрица взаимодействий, и определялись коэффициенты регрессии методом наименьших квадратов

$$b_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \bar{Y}_i, \quad (2.6)$$

где j – номер фактора;

x_{ij} – значение i- фактора в j – опыте.

5. Проверялась зависимость коэффициентов, для чего:

а) находилась ошибка в определении j коэффициента регрессии

$$s\{b_j'\} = \sqrt{\frac{s^2\{\bar{y}\}}{nm}} \quad (2.7)$$

б) определялось значение критерия Стьюдента t для каждого из коэффициентов:

$$t_j = \frac{b_j}{s\{b_j\}} \quad (2.8)$$

в) сопоставлялись расчётные значения t_p – критерия с табличным t_m [126, 154]. Если $t_p > t_m$ коэффициент значим. Если это неравенство не выполняется, то соответствующий коэффициент приравнивается нулю.

6. Формировалось уравнение регрессии, и проверялась его адекватность по критерию Фишера:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{\bar{y}\}}, \quad (2.9)$$

где $s^2\{\bar{y}\}$ – дисперсия адекватности

$$s^2\{\bar{y}\} = n \sum_{i=1}^m \frac{(\bar{y}_i - y_i)^2}{m-l}, \quad (2.10)$$

где y_i – значение параметра оптимизации, найденное по уравнению регрессии;
 l – число значимых коэффициентов в уравнении.

Адекватность проверялась сравнением расчетного F_p и табличного F_m [126, 154] значений критерия Фишера. Если $F_p < F_m$ то гипотеза адекватности уравнения принимается [54].

ВЫВОДЫ ПО 2 ГЛАВЕ

1. Разработана общая методика и структурная схема, предусматривающая четыре этапа проведения исследований.
2. Выполненный анализ современного программного обеспечения, предназначенного для моделирования процессов пластической деформации, сварки и аддитивного синтеза с помощью метода конечных элементов позволил сделать вывод о целесообразности применения программного комплекса Ansys.
3. Выбраны измерительное оборудование и инструмент, обеспечивающий необходимую для проведения экспериментальных исследований точность измерений.
4. Разработаны конструкции экспериментальных стендов: для исследования ударных процессов в системе боек-волновод и оценки влияния обрабатываемого материала на эффективность упрочнения, оценки сопротивления контактному выкрашиванию образцов после ВДУ.
5. Определена методика статистической обработки экспериментальных данных и регрессионного моделирования.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В УДАРНОЙ СИСТЕМЕ БОЕК-ВОЛНОВОД

3.1 Модель процесса ВДУ типа «черный» ящик

Совершенствование ВДУ осложнено большим количеством управляемых технологических факторов, наглядное представление о которых дает модель ВДУ типа «черный ящик» (рисунок 3.1).

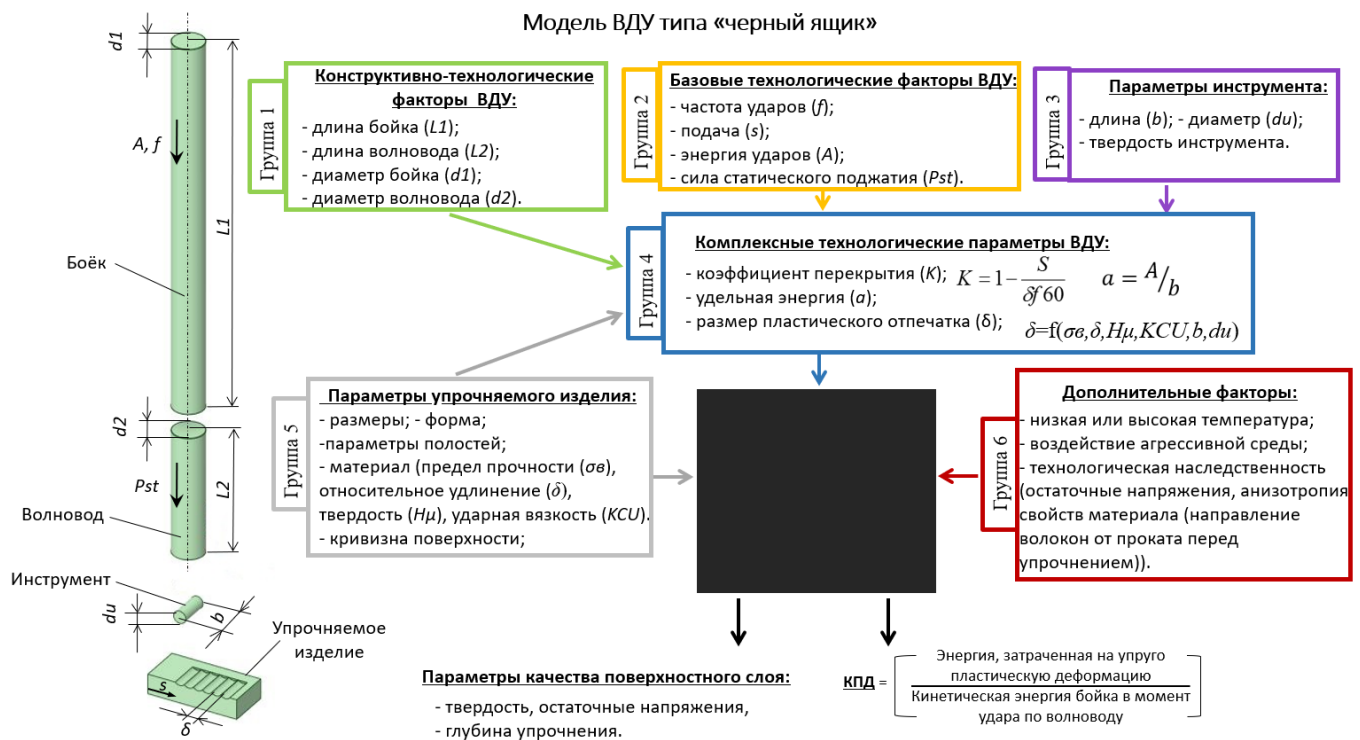


Рисунок 3.1- Модель ВДУ типа «черный ящик»

Входные параметры модели можно разделить на шесть групп. К первой группе относятся конструктивно-технологические факторы ВДУ: длина бойка (L_1); длина волновода (L_2); диаметр бойка (d_1); диаметр волновода (d_2). Ко второй - базовые технологические факторы: частота ударов (f); подача (s); энергия ударов (A); сила статического поджатия (P_{st}). К третьей - параметры инструмента: длина (b); диаметр (d_u); твердость инструмента. В четвертую группу входят комплексные технологические факторы ВДУ, зависящие от совокупности базовых

технологических факторов: коэффициент перекрытия (K); удельная энергия (a); размер пластического отпечатка (δ). К пятой группе относятся параметры упрочняемого изделия: размеры; форма; параметры полостей; материал (предел прочности (σ_b); относительное удлинение (δ); твердость (H_μ); ударная вязкость (KCU); кривизна поверхности. К шестой - дополнительные параметры: низкая или высокая температура; воздействие агрессивной среды; технологическая наследственность (остаточные напряжения, анизотропия свойств материала (направление волокон от проката перед упрочнением)).

Выходными являются: параметры качества поверхностного слоя (микротвердость, глубина упрочненного слоя) и КПД процесса ВДУ. Так как основной задачей ВДУ является получение глубокого упрочненного слоя и, при необходимости, выполняется последующая финишная обработка, шероховатость обработанной поверхности не рассматривается.

3.2 Особенности разработки конечно-элементной модели ударной системы ВДУ

Разработка конечно-элементной модели ударной системы ВДУ

Разработка конечно-элементной модели ударной системы ВДУ делится на четыре этапа (рисунок 3.2). На первом этапе, в модуле Engineering Data создаются модели материалов ударной системы и среды нагружения. Основой для этого являются значения физико-механических свойств реальных материалов, полученных в результате предварительных лабораторных исследований на соответствующем оборудовании. В разделе Symmetry Region указывается граница прохождения плоскости симметрии у модели. Разбивка созданной модели на конечные элементы - тетраэдры выполняется в разделе Mesh. Там выбирается тип сетки и задается ее размер. В разделе Contacts задается тип контакта Frictional между элементами модели и указывается величина коэффициента трения. С помощью инструмента Contact Tool генерируются контактные взаимодействия между элементами модели.

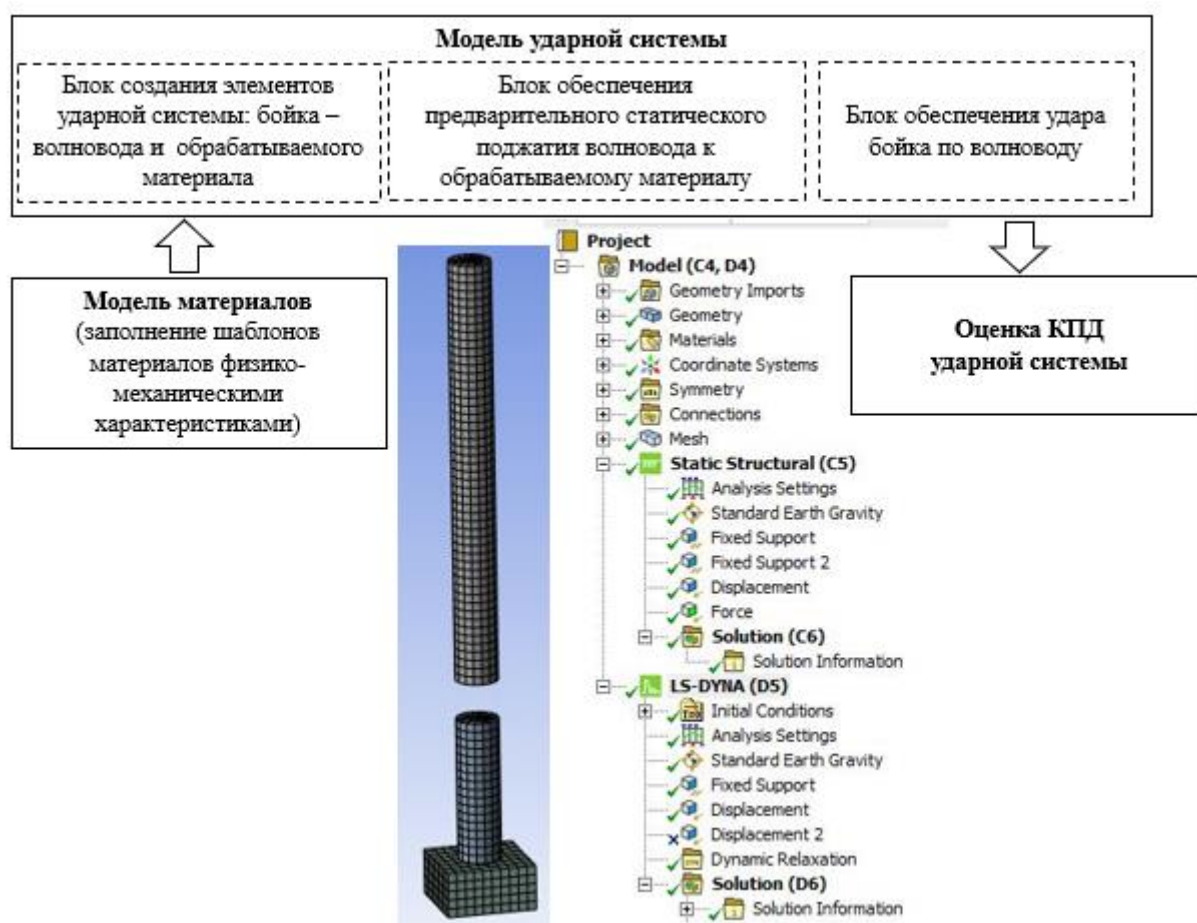


Рисунок 3.2 - Структурная схема модели ударной системы ВДУ [116]

На втором этапе в разделе Workbench программы Ansys, в графическом модуле создаются элементы модели: боек, волновод и среда нагружения. Боек и волновод представляют собой стержни с плоскими торцами, а среда нагружения имеет вид прямоугольника [86]. Затем выполняется их позиционирование друг относительно друга, согласно рисунку 3.2. Для значительного ускорения расчета с помощью элемента Split Body разрезается модель по оси симметрии и для расчета оставляется только половина модели.

На третьем этапе в модуле Static Structural задается предварительно статическое поджатие волноводом среды нагружения. В начале, чтобы ограничить смещение среды нагружения, при нагрузке, к ее нижнему торцу прикладывается граничное условие Fixed Support. Граничное условие Displacement вводит запрет на перемещение волновода по оси z , что позволяет избежать его смещения под нагрузкой от оси симметрии. Для учета действия гравитационных сил на элементы

модели, в расчет добавляется модуль Standard Earth Gravity. Для задания величины статической нагрузки, в разделе Force, волноводу присваивается значение силы его поджатия к среде нагружения в Ньютонах. Окончательная настройка данного этапа завершается в разделе Analysis Settings настройкой длительности протекания процесса статического нагружения.

Постоянная статическая сила P_{st} поджатия к инструменту, составляет около 10% от динамической составляющей силы удара бойка по волноводу [103]. Статическое поджатие исключает отскок инструмента от обрабатываемого материала и обеспечивает эффективное использование энергии ударного импульса.

Для фиксации параметров ударного импульса и определения изменения силы за определенный промежуток времени. На основании данного закона изменения силы во времени для единичного удара, в программе Excel формировался временной ряд из требуемого числа ударов с учетом их скважности (рисунок 3.3) [95].

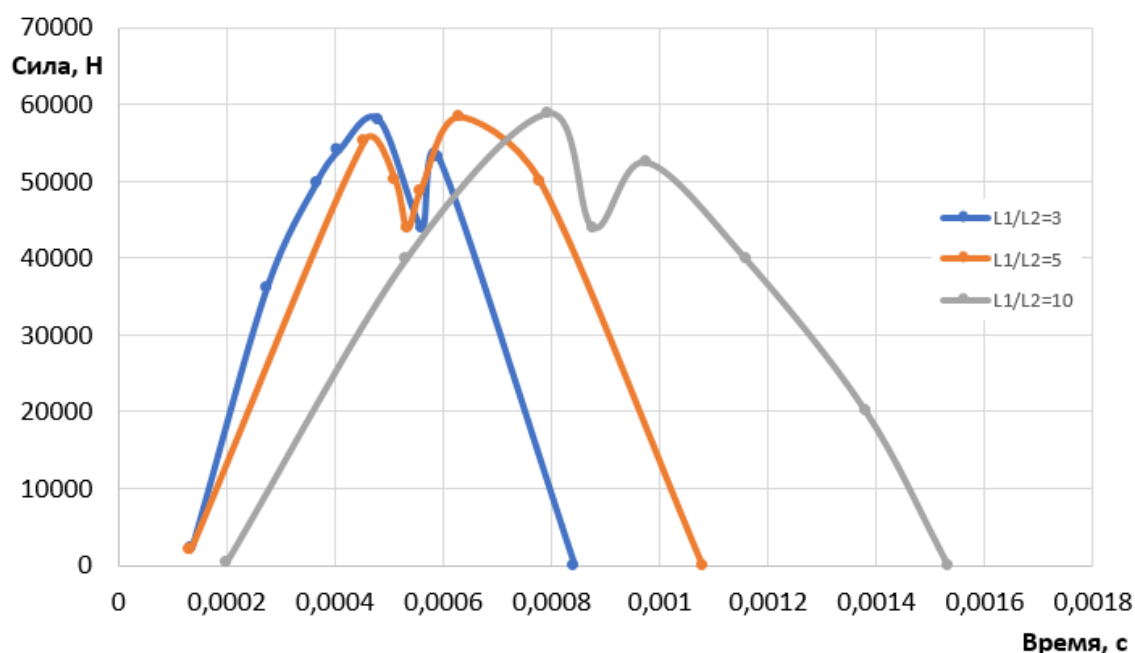


Рисунок 3.3 - Примеры ударных импульсов, сгенерированных в ударных системах с разным отношением длин бойков и волновода L_1/L_2 . Данные импульсы получены при ударе по образцам из титана ВТ 1-0 с единой энергией 30 Дж [109]

Оценка адекватности этой части модели проводилась сравнением полученных значений с данными аналитического расчета: длительностью ударного импульса и силой, которая сообщается в очаг деформации. Погрешность при определении длительности ударного импульса составила 2,6 %, а при оценке силы удара 3,7%.

На четвертом этапе происходит моделирование быстротечной ударной нагрузки в модуле LS-Dyne. Так же, как и в предыдущем этапе настройка модели начинается с присвоения граничных условий: Fixed Support – запрет на перемещение нижнего торца среды нагружения и Displacement – запрет на смещение бойка и волновода относительно оси симметрии. Действие гравитационных сил на элементы модели учитывается добавлением в расчет модуля Standard Earth Gravity. Добавление функции Dynamic Relaxation необходимо для учета в расчете действия предварительной статической нагрузки на среду нагружения, рассчитанной в модуле Static Structural. Действие ударной нагрузки бойка реализуется через скорость в разделе Velocity, что является правильнее с энергетической точки зрения, чем задание через параметр силы. В разделе Analysis Settings настраивается значение параметра End Time. Он включает в себя сумму времени статического нагружения, удара и снятия нагрузки после удара.

В модуле Solution, происходит обработка и визуализация результатов моделирования. В процессе моделирования оценивался КПД ударной системы. Созданная модель ударной системы ВДУ является универсальной платформой и может «дорабатываться» [116].

Разработка моделей материалов

Подавляющее большинство комплексов современного инженерного анализа (CAE), основанных на методе конечных элементов, содержат встроенные библиотеки шаблонов материалов (рисунок 3.4). Их применение допустимо на стадии изучения возможностей используемой CAE–программы, однако для выполнения достоверных расчетов, данные библиотеки материалов недостаточны. Имеют место серьезные ограничения по применению вследствие крайне

небольшого количества заданных физико-механических свойств в имеющихся шаблонах материалов, а также небольшой набор марок материалов в библиотеке. Известно, что реальные материалы, даже в рамках одной марки, могут иметь существенные различия в физико-механических свойствах из-за: плавающего химического состава материала разных плавов; особенностей лабораторного оборудования и условий определения физико-механических свойств; технологической наследственности, полученной на предшествующих операциях, скорости и условий деформации. Таким образом, для проведения серьезных исследований необходимо дополнять имеющиеся шаблоны материалов или создавать новые модели материалов.

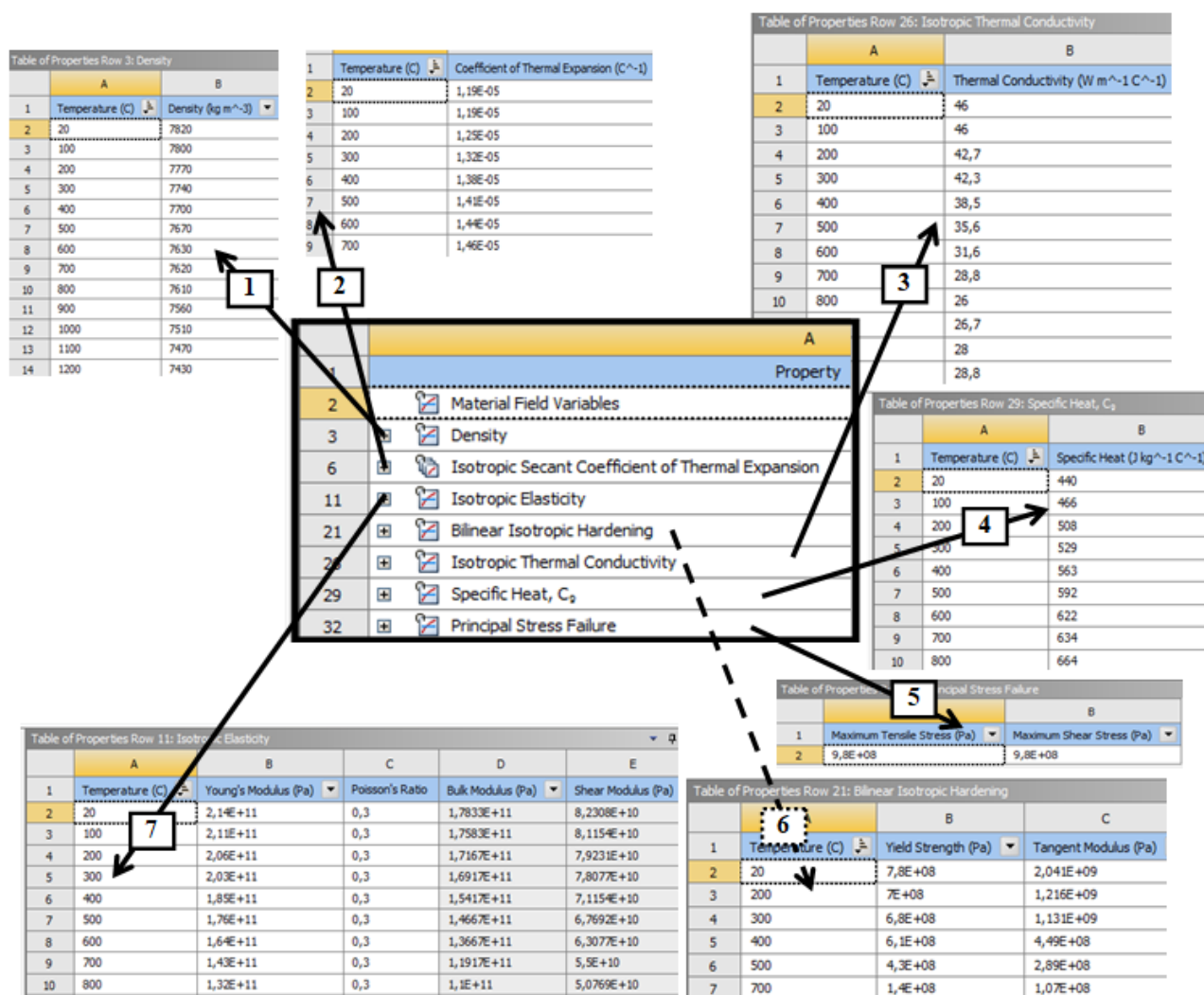
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	Tabular	
4	Scale	1	
5	Offset	0	kg m ⁻³
6	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
7	Coefficient of Thermal Expansion	Tabular	
8	Scale	1	
9	Offset	0	C ⁻¹
10	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	20	C
11	Isotropic Elasticity	Tabular	
21	Bilinear Isotropic Hardening		
22	Yield Strength	0	Pa
23	Tangent Modulus	0	Pa
24	Isotropic Thermal Conductivity	Tabular	
27	Specific Heat, C _p	Tabular	
30	Principal Stress Failure		
31	Maximum Tensile Stress	0	Pa
32	Maximum Shear Stress	0	Pa

Рисунок 3.4 - Шаблон модели материалов [116]

Создание каждой модели материала является уникальным процессом и подразумевает не только заполнение шаблона данными из справочной литературы, но и значениями, полученными в результате проведения соответствующих экспериментальных исследований для уточнения свойств, присущих непосредственно материалу, который планируется обрабатывать.

На рисунке 3.5 представлен заполненный шаблон материала, с набором свойств, необходимых для учета специфики планируемых исследований возможностей ВДУ. Из справочной литературы берутся следующие свойства: предел текучести, плотность, коэффициент термического расширения, модуль

Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, касательный модуль, пределы по нормальным и касательным напряжениям и др. [116].



1 - плотности от температуры; 2 - коэффициента термического расширения от температуры; 3 - коэффициента теплопроводности от температуры; 4 - удельной теплоёмкости от температуры; 5 - пределов по нормальным и касательным напряжениям; 6 - предела текучести, касательного модуля от температуры; 7 - модуля Юнга, коэффициента Пуассона, модуля сдвига от температуры

Рисунок 3.5 - Пример заполненного шаблона материала, где установлены и введены зависимости [116]

Данные свойства на рисунке 3.5 выделены сплошными линиями. Некоторые физико-механические свойства задаются в зависимости от температуры. Пунктирными линиями указаны свойства, которые задаются в шаблон по

результатам экспериментальных исследований материала. К ним относятся кривые прочности неупрочненного и упрочненного материалов с различной степенью упрочнения. В зависимости от поставленных задач исследования, данный шаблон может быть дополнен и другими свойствами. Корректно заполненный шаблон материала сохраняется в файл и используется во всех дальнейших расчетах.

В качестве примеров разработки сред нагружения (обрабатываемых материалов) для ВДУ взяты: сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95. Для образцов исследуемых материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95), на основании данных полученных на универсальной электромеханической машине с компьютерным управлением серии WDW-100E, строились кривые упрочнения. С помощью экспериментальных исследований определялись прочностные свойства неупрочненного и упрочненного ВДУ с различной степенью интенсивности и равномерности материала. Полученные кривые размещались в шаблоне, что позволило учитывать особенности поведения материала в очаге деформации при различных условиях волнового нагружения.

Оценка адекватности созданных моделей материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95) проводилась сравнением результатов моделирования с данными реального эксперимента, полученными при одинаковых режимах ВДУ. Сравнивались величины единичных отпечатков, полученных в результате ударов инструмента по обрабатываемой поверхности в целях ее упрочнения, сравнивались также карты микротвердости в поверхностном слое после ВДУ.

Так, в результате сравнения характерных размеров единичных отпечатков установлено, что погрешность модели для различных материалов составляет: стали 45 – 3%; БрАЖ 9-4 - 4,2%; ВТ 1-0 - 3,3%; Б-95 - 5%.

Для оценки адекватности модели материала, используемого при синтезе, кроме выше перечисленных подходов применялись термодеоформационные испытания. Верификация и оценка адекватности созданной модели материала при разной его температуре выполнялась на основании сравнения диаметров отпечатков после единичных ударов ударной системой боек-волновод.

В программе ANSYS производится конечно-элементное моделирование вдавливания шаров в плоскую поверхность призматического образца (рисунок 3.6). Моделировалось нанесение единичных ударов по шарам диаметрами 8,9; 19; 27 мм. В качестве среды нагружения использовался призматический образец размерами $30 \times 30 \times 15$ мм. Единичные удары наносились по стали 04X19H9 с энергией 70 Дж. Удары наносились по образцам, нагретых до температур: +20С; +250С и +500С.

В результате моделирования определялась ширина отпечатка удара инструмента. Так как при деформировании конечных элементов призматического образца нет четких границ сформированного отпечатка (из-за плавных «изгибов» конечных элементов по краям отпечатков), то погрешность измерений в горизонтальном направлении может превышать величины 1-2 длин грани конечного элемента. Поэтому с целью повышения точности измерений, с помощью функции Directional Deformation в центре отпечатка определялась его глубина с точностью до сотых долей миллиметра и затем, с помощью формулы, пересчитывалась в длину хорды, которая и является шириной отпечатка.

На рисунке 3.7 показана зависимость изменения глубины отпечатка от времени протекания расчета. На графике можно увидеть формирование максимальной глубины отпечатка после удара инструмента, и затем ее уменьшение под действием упругих составляющих деформируемого материала. В результате определяются размеры отпечатков в зависимости от температуры образца и сопоставляются с данными натурных экспериментов. Примеры отпечатков ударов инструмента, полученные в результате конечно-элементного моделирования инструментами разных размеров представлены на рисунке 3.8 [116].

Для сравнения результатов, полученных при моделировании, проведены экспериментальные исследования вдавливания шаров в плоскую поверхность призматических образцов при тех же условиях. Выращены призматические образцы из материала - сталь 04X19H9 и механически обработаны для получения плоской ровной поверхности для вдавливания шаров (рисунок 3.9, 3.10).

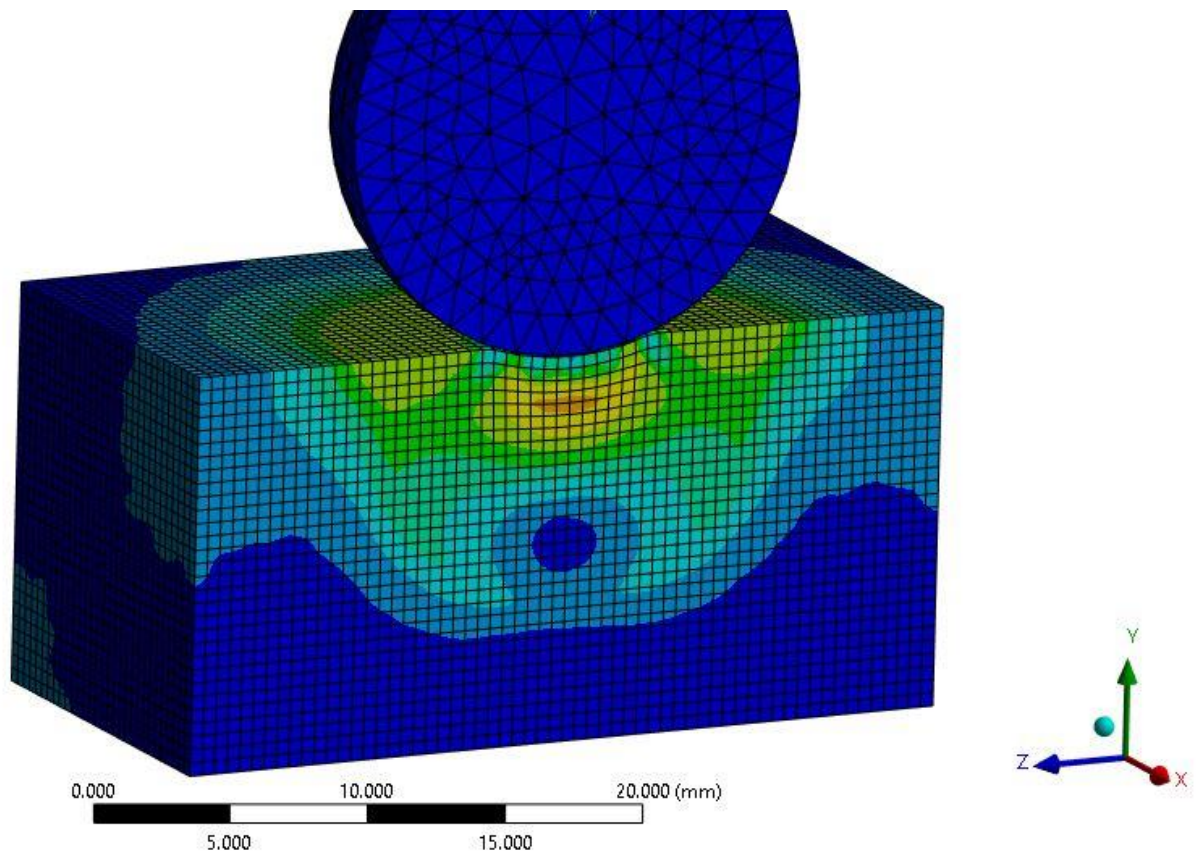
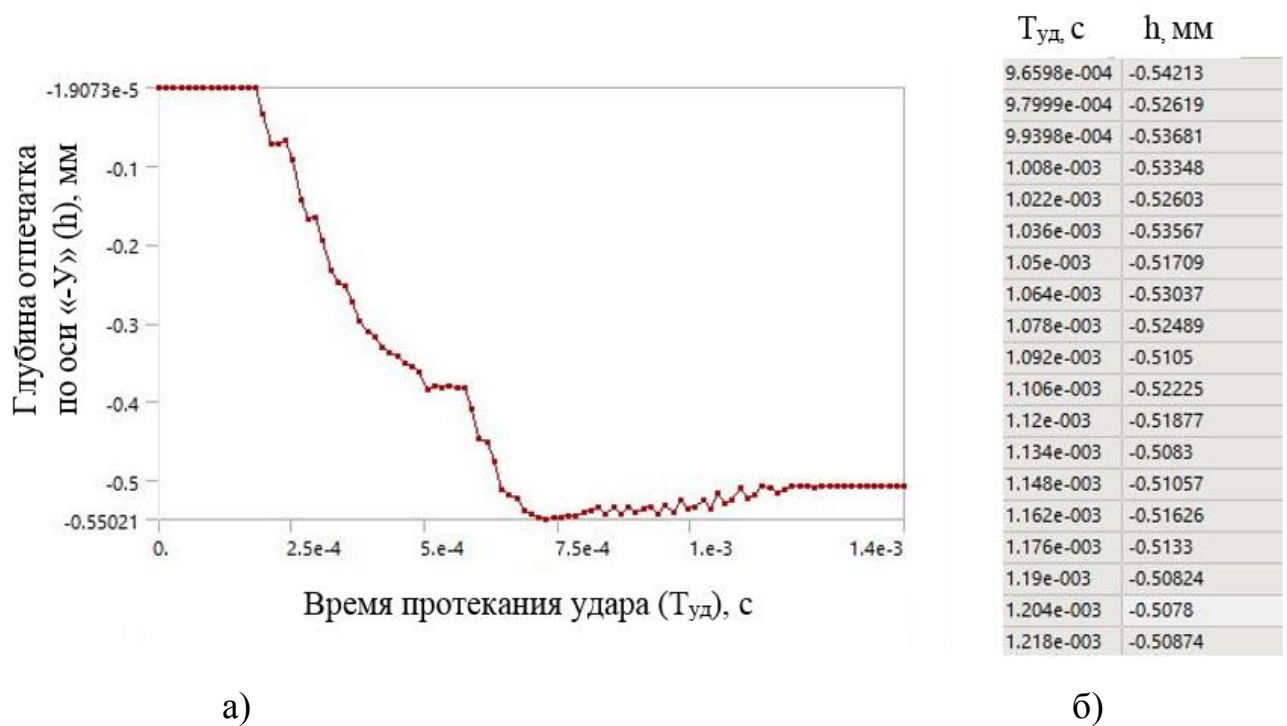


Рисунок 3.6 - Процесс разгрузки образца после удара шаром Ø19 мм



а - график; б - пример шкалы изменения $T_{уд}$ от h , показывающий действие упругих составляющих силы после удара

Рисунок 3.7 - Изменение глубины отпечатка в процессе нанесения удара, материал 04X19H9, шар Ø19 мм, +20°C

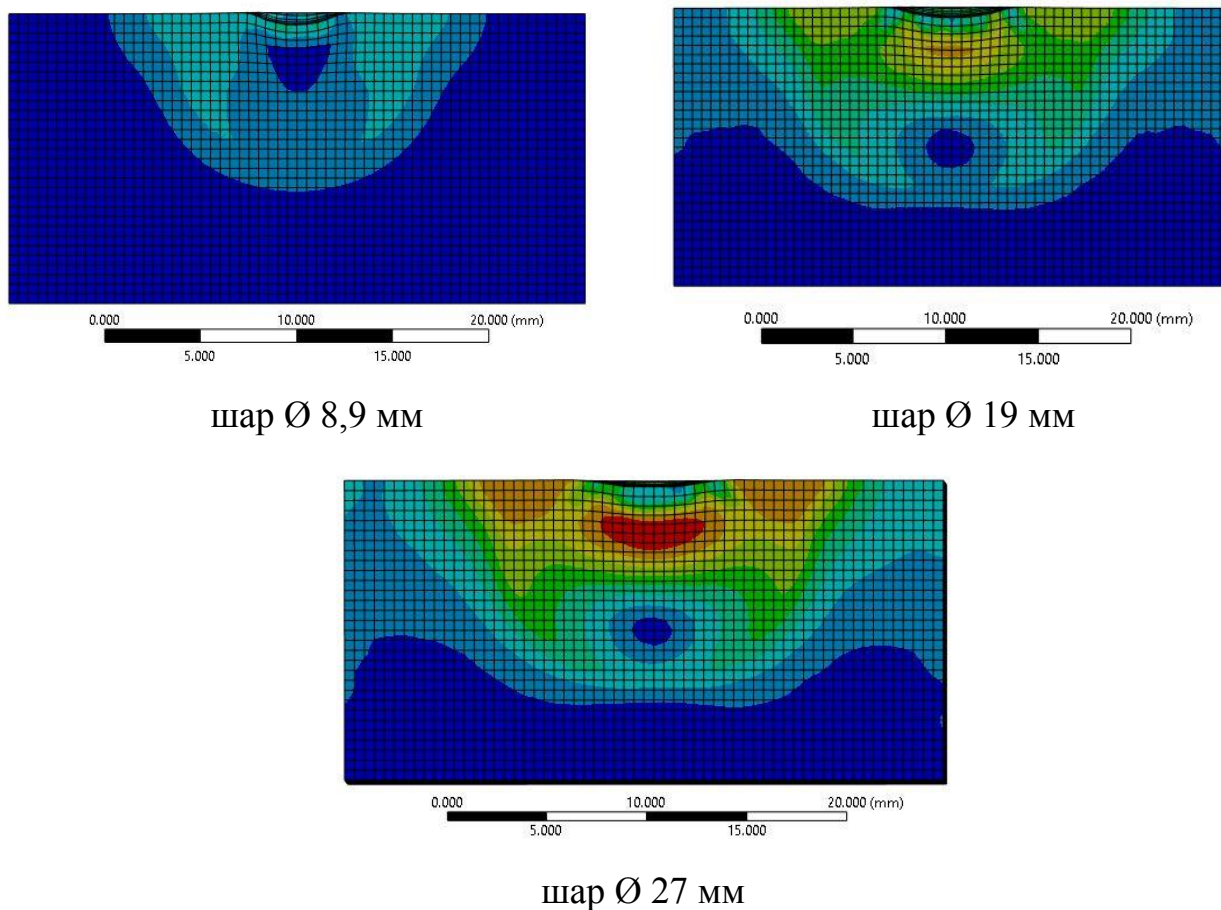


Рисунок 3.8 - Примеры отпечатков ударов шаров на призматическом образце, материал 04X19Н9, +250°C



Рисунок 3.9 - Синтезированный и механически обработанный образец из 04X19Н9 для испытаний на единичные удары

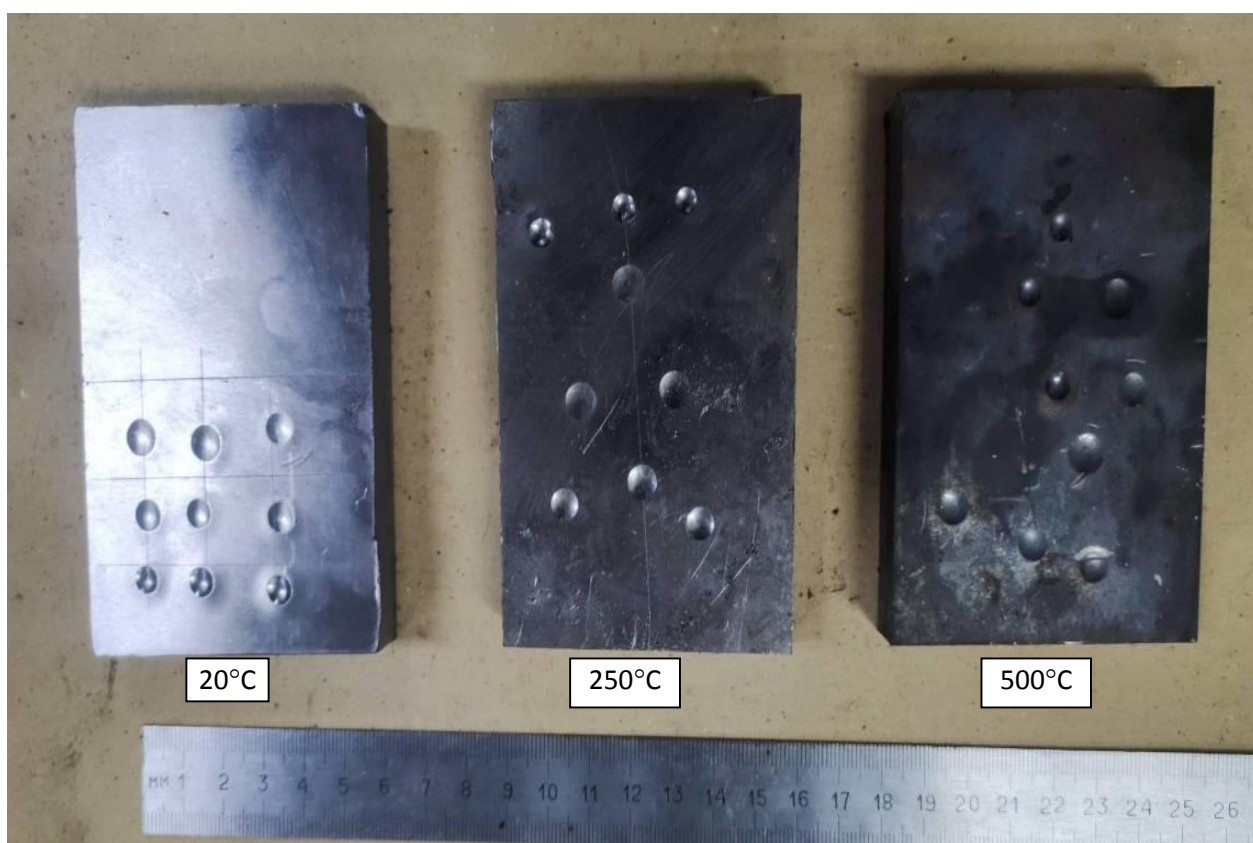


Рисунок 3.10 – Синтезированный и механически обработанный образец из 04X19N9 после испытаний на единичные удары

Сравнение результатов экспериментальных исследований и данных моделирования для разных материалов и температурных условий испытаний представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений диаметров отпечатков на образцах из 04X19N9, полученных при ударах 70 Дж

Температура, °C		20			250			500		
Диаметр шара, мм		8,9	19	27	8,9	19	27	8,9	19	27
№ отпечатка, мм	1	3,8	4,2	5,8	5,0	5,7	6,3	5,5	6,2	6,5
	2	4,0	4,1	5,9	4,7	5,5	6,0	5,4	5,8	6,7
	3	4,5	4,2	5,8	4,6	4,8	6,4	5,5	6,2	5,9
Среднее (эксперимент), мм		4,1	4,2	5,8	4,8	5,3	6,2	5,5	6,1	6,4
Моделирование, мм		4,5	4,5	6	4,5	5,5	6,5	5	5,5	6,5
Погрешность, %		9,7	7,1	3,5	6,2	3,8	4,9	9	9,8	1,6

Анализ данных показал, что в рассматриваемых диапазонах температур максимальная погрешность моделирования составила для стали 04Х19Н9 – 9,8%.

Для определения твердости материалов в результате разработана следующая методика. После моделирования процесса ВДУ, в упрочненном материале определялись величины возникающих деформаций Effective Strain, значения которых переводились в величины напряжений Effective Stress с помощью регрессионной модели кривой упрочнения, полученной экспериментально. Найденные величины напряжений переводились в значения микротвердости, согласно методике, изложенной в [75].

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных, полученных расчетом по модели для каждого исследуемого материала (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95) представлены на рисунке 3.11.

Таким образом, погрешность модели материала по величине микротвердости поверхностного слоя для исследуемых материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95) составляет, соответственно, 7,4; 4; 3,8; 2%. Погрешность модели по определению глубины упрочнения для исследуемых материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95) составляет, соответственно, 3; 6; 6; 2,5%, что позволяет рекомендовать их для использования при исследовании процесса волнового деформационного упрочнения методом конечных элементов [116].

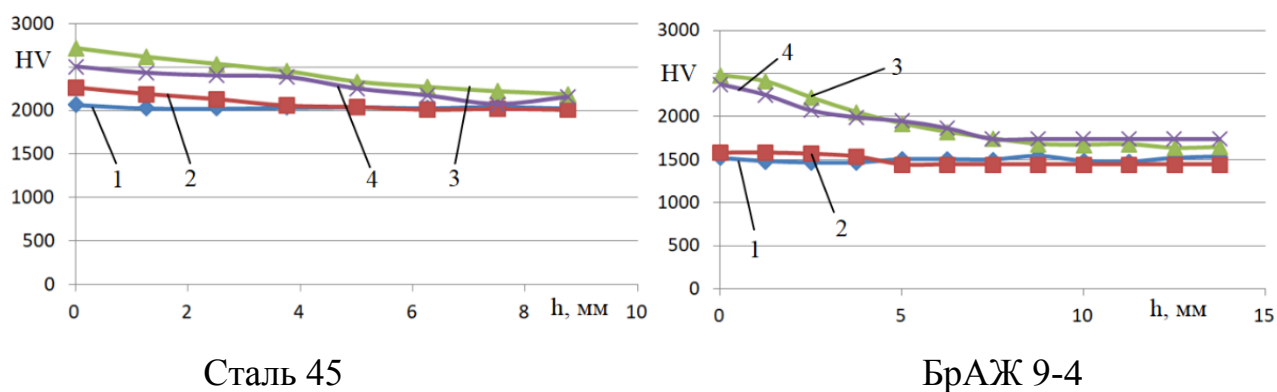
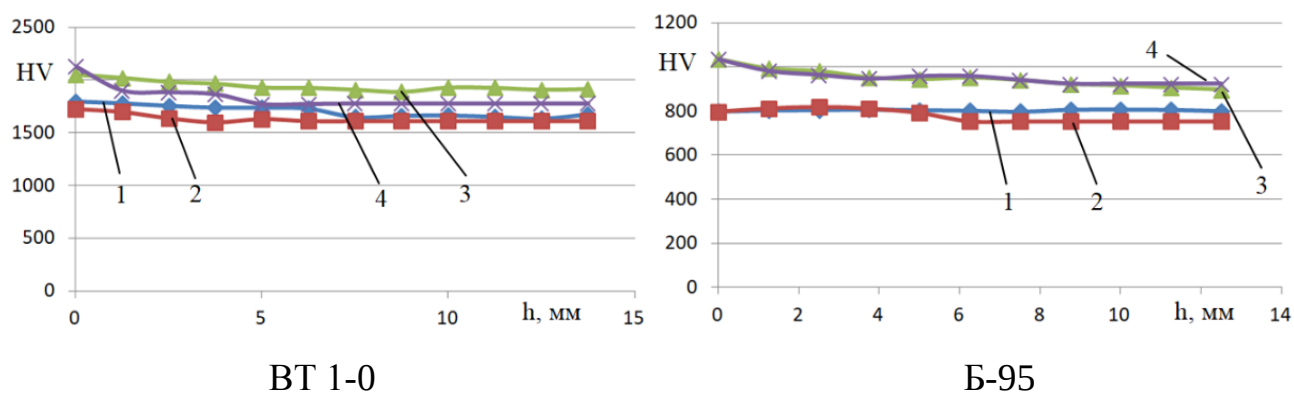


Рисунок 3.11 Начало



1, 2 – неупрочненный материал;

3, 4 - упрочненный с коэффициентом перекрытия отпечатков $K=0,6$

Рисунок 3.11 - Сравнение теоретических (2, 4) и экспериментальных (1, 3) зависимостей изменения микротвердости (HV, МПа) по глубине (h, мм) поверхностного слоя [116]

3.3. Повышение энергетической эффективности волновых процессов, протекающих в ударной системе боек-волновод

3.3.1. Исследование влияния размеров поперечных сечений стержневой ударной системы на эффективность передачи энергии ударного импульса в очаг деформации

Использование динамического воздействия на очаг деформации энергетически более выгодно, чем его статическое нагружение. Принцип динамического воздействия на обрабатываемую область заложен в современных способах деформационного упрочнения [103, 185, 186].

Проблема повышения доли передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации является актуальной для всех способов, в основе которых лежит удар [11, 103]. Повысить долю передаваемой энергии в очаг деформации возможно несколькими способами. Так, увеличение силы удара бойка с одной стороны может увеличить коэффициент полезного действия ударной системы, а с другой, привести либо к повышению прочностных требований к элементам ударной системы, либо к увеличению их размеров и как следствие стоимости. Другим методом, способствующим повышению доли передаваемой энергии в очаг деформации, является использование в ударной системе промежуточного звена – волновода.

Данное решение, за счет действия отраженных волн деформации, позволяет генерировать пролонгированный ударный импульс, состоящий не только из головной, но и хвостовой частей. Пролонгированный ударный импульс характеризуется наибольшей энергией.

Удар через промежуточное звено – волновод, заложен в принципе метода ВДУ. При ВДУ волна деформации после одного удара воздействует на очаг деформации не один раз, а несколько. Это обеспечивается за счет принудительного удерживания после удара бойка в контакте с волноводом, и статического поджатия волновода и инструмента к обрабатываемой поверхности. Такое пролонгированное воздействие волны деформации позволяет наиболее полно использовать энергию удара при упругопластическом деформировании. В процессе исследований возможностей способа ВДУ отмечено влияние геометрических размеров элементов ударной системы на эффективность передачи энергии в очаг деформации. Ранее проведенные серии экспериментов, в достаточно узком диапазоне, выявили рациональные геометрические соотношения ударной системы, способствующие наибольшей передаче энергии ударного импульса в очаг деформации: $d_1/d_2=1..3$, $L_1/L_2=3..5$, $L_1/d_1>3$, где $L_1;d_1$ и $L_2;d_2$ – соответственно, длина и диаметр бойка и волновода [181, 184].

В силу того, что способ ВДУ разработан достаточно недавно, большинство его особенностей до конца не раскрыты. Так, вопрос выбора размеров поперечного сечения у элементов ударной системы при ВДУ является актуальным. Это связано с поиском эффективного размера сечений элементов ударной системы при ВДУ, которые обеспечивали передачу максимально возможной доли энергии ударного импульса при минимально возможном весе и габаритах бойка и волновода.

Целью исследований является определение влияния размеров поперечных сечений стержневой ударной системы на эффективность передачи энергии ударного импульса в очаг деформации при волновом деформационном упрочнении.

Условия эксперимента и подготовка модели

При ударе бойка по волноводу возникает волна деформации, которая распространяется в ударной системе и воздействует на очаг деформации (рисунок 3.12). Известно, что размеры элементов ударной системы оказывают влияние на эффективность передачи энергии в очаг деформации [47, 48, 50, 103]. Далее будут исследоваться влияние геометрических размеров ударной системы на эффективность передачи энергии в очаг деформации при ВДУ в широком диапазоне рассматриваемых параметров ударных систем.

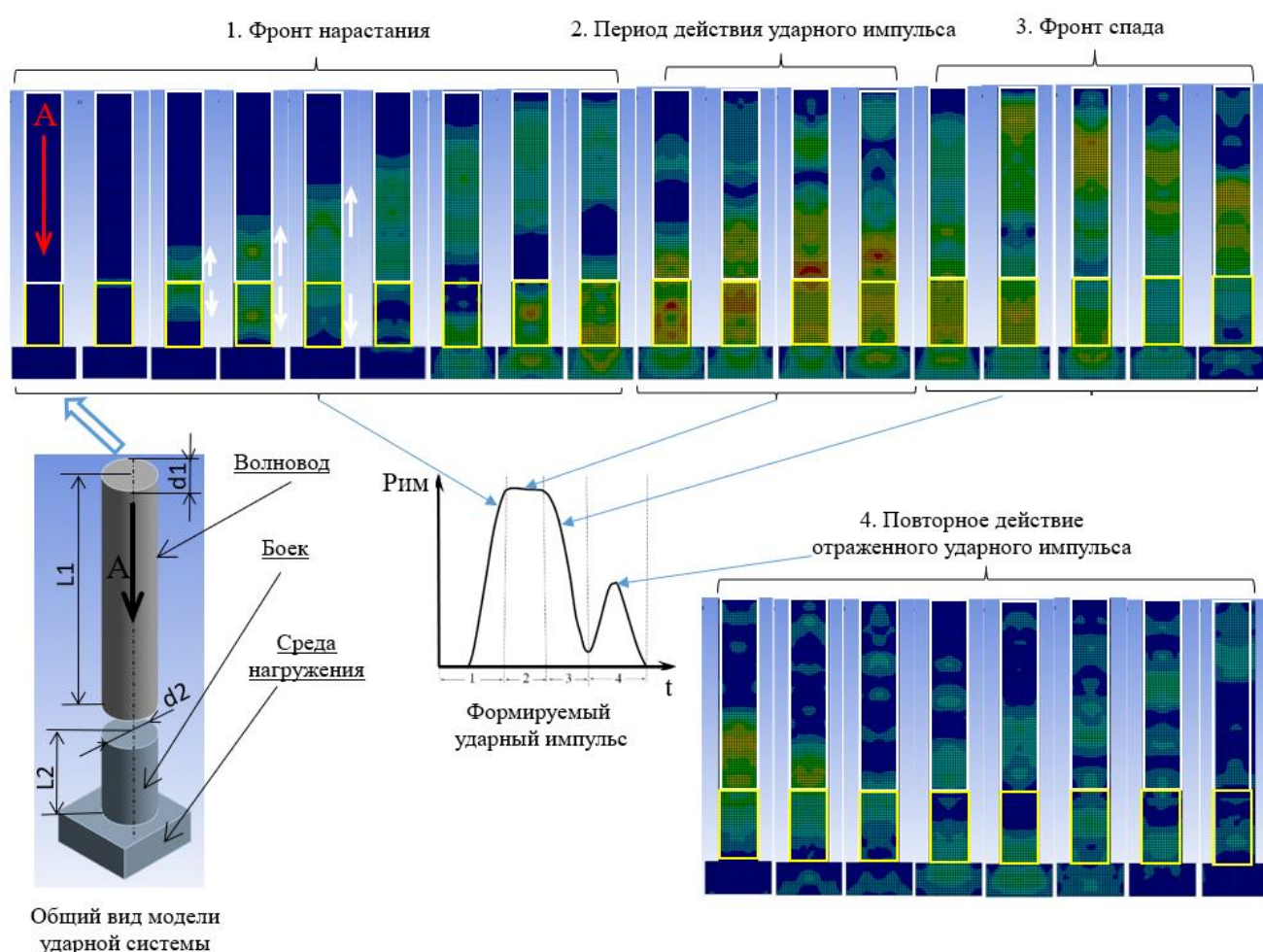


Рисунок 3.12 - Распространение волн упругой деформации после одного удара бойка по волноводу

Для проведения исследований использовался стержневой тип ударной системы. Боек плоским торцом наносил удар по плоскому торцу волновода,

статически поджато к среде нагружения. Диаметр бойка d_1 равен диаметру волновода d_2 . Для проведения исследований взяты ударные системы с диапазоном значений диаметров $d_1=d_2=16, 32, 48, 60, 90$ мм. Для комплексной оценки в исследовании так же необходимо учесть и влияние длин бойка L_1 и волновода L_2 , а также отношение длины бойка L_1 к его диаметру d_1 в диапазоне: $1 < L_1/L_2 < 10$; $1 < L_1/d_1 < 10$.

В случае натурного эксперимента, для запланированных исследований необходимо провести порядка 64 экспериментов и изготовить 128 элементов ударных систем, общей массой готовых изделий порядка 4 тонн (3960 кг). Поэтому в силу высокой трудоемкости, металлоемкости и длительности исследований, работу по поиску эффективных размеров поперечных сечений ударных систем необходимо проводить с использованием моделирования.

Для выявления параметров ударной системы, обеспечивающей наибольшую долю передачи энергии ударного импульса в очаг деформации, моделировались различные ударные системы с геометрическими параметрами в диапазонах $1 < L_1/L_2 < 10$; $1 < L_1/d_1 < 10$; $d_1=d_2=16, 32, 48, 60, 90$ мм. Элементам ударной системы: бойку и волноводу присвоены физико-механические свойства закаленной стали 9ХС, а среде нагружения – стали 40Х в состоянии поставки. По полученной в результате удара эпюре ударного импульса оценивалась доля энергии передаваемой в очаг деформации по методике, изложенной в работе [103]. Достоверность разработанной конечно-элементной модели оценивалась сравнением полученных значений форм, длительности, амплитуды и энергии ударных импульсов с данными, выявленными при тех же условиях на экспериментальном стенде. Результаты моделирования соответствуют данным эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Результаты моделирования

В результате моделирования установлено, что при отношении $L_1/L_2 = 1$, изменение диаметра бойка и волновода с 15 до 90 мм: при $L_1/d_1 = 1$ повысило долю передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации η (КПД) с 15 до 59%; при $L_1/d_1 = 5$, η выросла с 48 до 91%; при $L_1/d_1 = 10$ КПД ударной системы

увеличилось с 66 до 91% (рисунок 3.13). При отношении $L_1/d_1=10$, повышение КПД более чем на 87% наблюдалось у всех рассматриваемых сечений кроме Ø15 мм.

В случае, когда $L_1/L_2 = 3$, изменение диаметров элементов ударной системы с 15 до 90мм: при $L_1/d_1 = 1$ повысило долю передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации η с 21 до 59%; при $L_1/d_1 = 5$, η выросла с 39 до 80%; при $L_1/d_1 = 10$ η увеличилась с 58 до 89%.

При отношении $L_1/L_2 = 5$, изменение диаметра бойка и волновода с 15 до 90 мм, при $L_1/d_1 = 1$ повысило долю передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации η с 18 до 57%; при $L_1/d_1 = 5$, η выросла с 41 до 83%; при $L_1/d_1 = 10$ КПД ударной системы увеличилось с 56 до 88%.

В случае, когда $L_1/L_2=10$, изменение диаметров элементов ударной системы с 15 до 90 мм, при $L_1/d_1 = 1$ повысило долю передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации η с 12 до 56%; при $L_1/d_1 = 5$, η выросла с 38 до 87%; при $L_1/d_1 = 10$ η увеличилась с 61 до 90%.

Для определения границ диапазона роста η , в случае дальнейшего увеличения диаметров элементов ударной системы до Ø 120, 180, 270 мм, принято решение о проведение еще четырех экспериментов с одним из более эффективных отношений $L_1/d_1 = 10$; $L_1/L_2 = 1$. В результате установлено, что увеличение диаметра бойка и волновода до 120, 180, 270 мм значительно не изменило долю передаваемой энергии в очаг деформации, которая составила, соответственно, 93; 96; 96%, но при этом масса ударных систем составила 212, 718 и 2425 кг. Проведенные исследования показали нецелесообразным использовать ударные системы диаметром более 90 мм, так как уровень габаритных размеров растет быстрее, чем эффективность доли передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации.

Для оптимизации полученных значений, эффективности передачи энергии ударного импульса в очаг деформации, предлагается ввести следующие критерии:

1. Диапазон η более 80%.
2. Размер волновода не менее 100 мм. Это минимально возможный размер для закрепления, в дальнейшем, на волноводе инструмента.

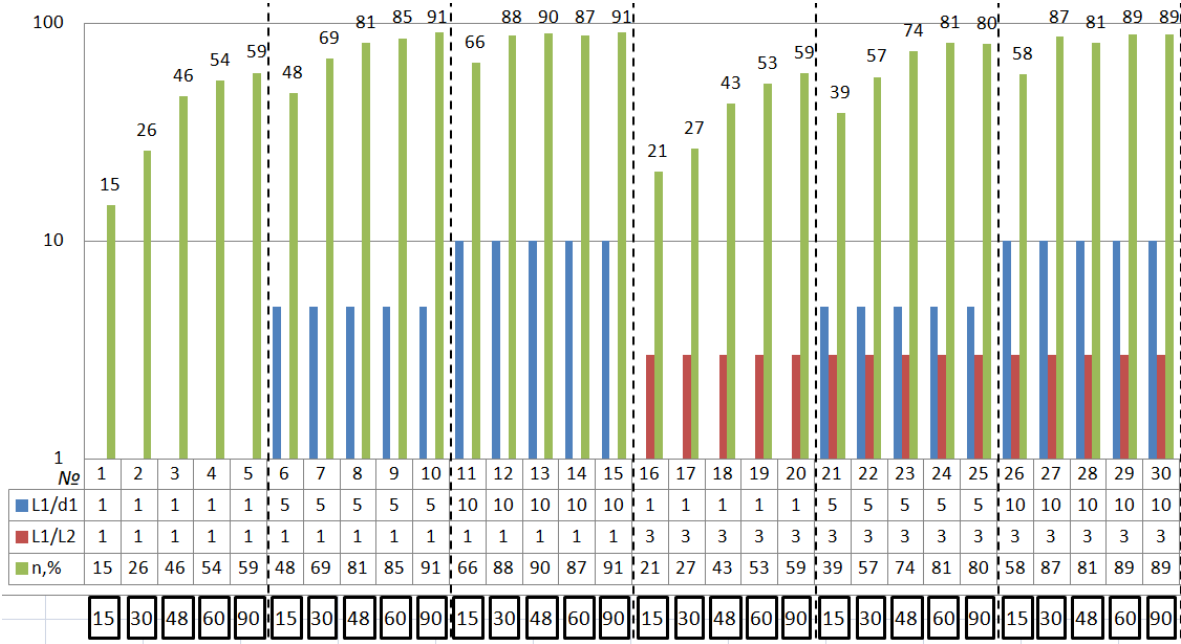


Рисунок 3.13 – Начало

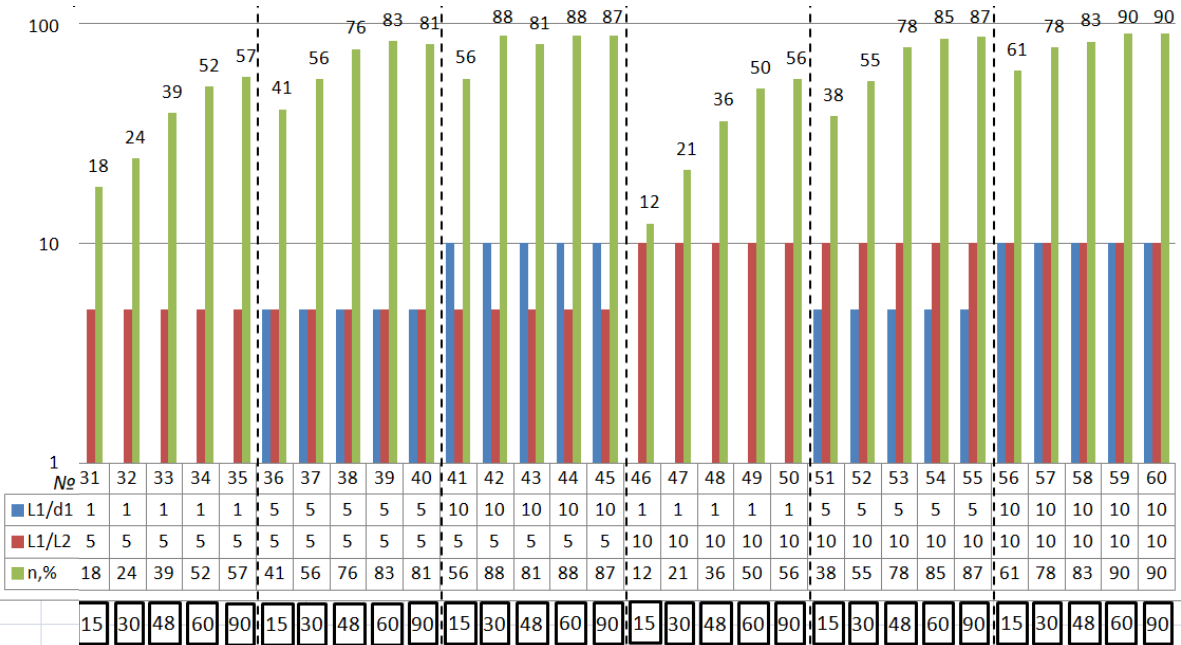


Рисунок 3.13 – Диаграмма зависимости доли передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации от размеров поперечных сечений стержневой ударной системы, где

15	30	48	60	90

 диаметры поперечного сечения бойка и волновода, соответственно, 15, 30, 48, 60, 90 мм

3. Суммарная длина бойка и волновода не должна превышать 1000 мм. Как правило, ударные системы более 700 мм вызывают сложности с размещением их в корпусе ударного устройства в связи с увеличением центра тяжести, требований по жесткости и весу. Все это обеспечивает дополнительные сложности при проектировании ударных устройств.

4. Суммарный вес бойка и волновода не должен превышать 15 кг.

Так, в результате проведенной оптимизации, установлены следующие компоновочные размеры ударных систем, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Соотношение геометрических параметров бойка и волновода

№ на рисунке 3.13	d1=d2, мм	L1/L 2	L1/d1	L1, мм	L2, мм	m, кг	η , %
12	30	1	10	300	300	3,3	88
27	30	3	10	300	100	2,2	87
8	48	1	5	240	240	6,8	81
13	48	1	10	480	480	13,6	90
28	48	3	10	480	160	9	81
9	60	1	5	300	300	13,3	85
24	60	3	5	300	100	8,8	81

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что:

- с увеличением диаметра бойка и волновода с 15 до 90 мм, доля передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации увеличилась на 38%.

- при соотношениях $1 < L_1/L_2 < 10$; $5 < L_1/d_1 < 10$ наблюдается рост доли передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации η более 80% у бойка и волновода диаметрами 30, 48, 60, 90 мм.

- нецелесообразно использовать ударные системы диаметром более 60мм, так как в рассматриваемых диапазонах отношений размеров элементов ударных

систем $1 < L_1/L_2 < 10$; $1 < L_1/d_1 < 10$ уровень технической сложности растет быстрее, чем энергетическая эффективность этой системы.

- согласно принятым критериям оптимизации параметров ударной системы (длина ее - не более 1000 мм; вес ее – не более 15 кг; длина волновода – не менее 100 мм; η более 80%), наиболее энергоэффективными считаются следующие габариты бойка и волновода: 1) $d_1=d_2=30\text{мм}$ $1 < L_1/L_2 < 3$; $L_1/d_1=10$; 2) $d_1=d_2=48\text{мм}$ $1 < L_1/L_2 < 3$; $5 < L_1/d_1 < 10$; 3) $d_1=d_2=60\text{мм}$ $1 < L_1/L_2 < 3$; $L_1/d_1=5$ [37, 86].

3.3.2 Исследование влияния геометрических размеров бойка на эффективность передачи энергии ударных импульсов, при волновом деформационном упрочнении

Условия эксперимента и подготовка модели

Конечно–элементная модель формирования ударного импульса состоит из ударной системы боек-волновод (цилиндрические стержни с плоскими торцами), и нагружаемой среды. Плоский торец волновода предварительно статически поджат $P_{ст}$ к среде нагружения. Материал бойка и волновода - закаленная сталь 9ХС. Материал среды нагружения - сталь 40Х в состоянии поставки. В модели боек наносит единичный соосный удар P_i по волноводу с энергией 35 Дж. Диаметры бойка d_1 и волновода d_2 для достижения целей эксперимента не изменялись, приняты равными 60 мм. Эффективность процесса оценивалась по величине коэффициента передачи энергии η , который равен отношению энергии импульса в очаге деформации к энергии удара бойка по волноводу. Оценивается влияние геометрических размеров бойка и волновода на передачу энергии ударного импульса в очаг деформации, предполагается, что инструментом является торец волновода.

Согласно ранее проведенным исследованиям, на эффективность передачи энергии в стержневой ударной системе значимое влияние оказывают геометрические параметры бойка и волновода. На основании этого, моделируются ударные системы с отношением длин бойка L_1 и волновода L_2 в диапазоне $0,1 < L_1/L_2 < 10$.

Ранее не уделено достаточно внимания исследованию влияния отношения размеров длин бойка L_1 и его диаметра d_1 на величину переданной энергии ударного импульса в очаг деформации при ВДУ. Для этого созданы модели ударных систем, позволяющие установить влияние соотношений размеров длин бойка L_1 и его диаметра d_1 на величину переданной энергии ударного импульса в очаг деформации, в диапазоне $0,1 < L_1/d_1 < 10$. В связи с изменением массы бойка (чтобы выдержать заданные отношения L_1/L_2 ; L_1/d_1) для обеспечения постоянства энергии удара ($P_1=35$ Дж) меняется и скорость удара.

Адекватность полученной модели формирования ударного импульса при ВДУ оценена по результатам сравнения с экспериментальными данными, полученными на стенде-макете ударной системы. Сила, длительность и энергия ударного импульса в очаге деформации, полученные из конечно-элементной модели, соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Результаты моделирования

Исследование влияния отношения длины бойка L_1 к его диаметру d_1 на эффективность передаваемой ударной системой энергии ударных импульсов в очаг деформации

Графическая интерпретация результатов выполненных исследований представлена на рисунке 3.14.

Наименьшая доля энергии передаваемой в очаг деформации 4-9% установлена при отношении $L_1/d_1 = 0,1$. При увеличении отношения L_1/d_1 до 0,5, доля передаваемой энергии возросла до 21-24%. Худший рост η до 11-18% установлен у ударных систем $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 0,3$. При росте отношения $L_1/d_1 = 1$, наибольшее значение доли передаваемой энергии в очаг деформации 43-45% отмечено у ударных систем с $3 \leq L_1/L_2 \leq 10$. Ударные системы $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 1$ показали меньшее увеличение η до 25-33%. Увеличение L_1/d_1 до 5 привело к росту доли передаваемой энергии до 65-71%, что больше, чем при $L_1/d_1 = 1$ на 51 – 57%. Повышение отношения L_1/d_1 до 10 показало максимально возможное повышение доли передаваемой энергии в очаг деформации до 80-83%, у ударных систем, где

$0,5 \leq L_1/L_2 \leq 10$, что больше, чем при $L_1/d_1 = 5$ на 17–23%. Однако при $L_1/d_1 = 10$, у ударных систем $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 0,3$, отмечено снижение η в 4,6 и 1,12 раза, соответственно.

Для оценки возможностей увеличения доли передаваемой энергии в очаг деформации за счет увеличения отношения L_1/d_1 , диапазон значений L_1/d_1 увеличен до 20-30, для ударных систем с $L_1/d_1 = 10$. В результате, полученные значения η не изменились и составили 82-83%. Возможность передачи доли энергии, близкой к единице, в стержневых ударных системах с плоскими торцами отмечена В.Э. Еремьянцом в его трудах [10, 11]. Полученные результаты моделирования полностью согласуются с теоретическими представлениями о формировании волн деформации в ударных системах.

Исследование влияния отношения длин бойка L_1 и волновода L_2 на эффективность передаваемой ударной системой энергии ударных импульсов в очаг деформации

Анализ влияния отношений длин бойка L_1 и волновода L_2 на эффективность передачи энергии ударного импульса в очаг деформации позволил установить, что при отношении $L_1/d_1 = 0,1$ изменение $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 1$ сопровождается повышением η с 4 до 9%. При $L_1/d_1 = 0,5$ наибольший рост η с 11 до 22% наблюдался при $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 0,5$. С увеличением $0,7 \leq L_1/L_2 \leq 10$ доля передаваемой энергии в очаг деформации не изменилась и составила 21-24%. При $L_1/d_1 = 1$ увеличение L_1/L_2 с 0,3 до 0,5 повысило η с 25 до 33%. Дальнейшее увеличение η достигнуто при увеличении L_1/L_2 от 1 до 3 и составило, соответственно, 33 и 45%. При $L_1/d_1 = 5$ увеличение L_1/L_2 с 0,3 до 0,5 привело к повышению η с 56 до 65%. Дальнейшее увеличение доли передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации с 65 до 71% достигнуто при изменении L_1/L_2 с 3 до 10. При $L_1/d_1 = 10$, изменение L_1/L_2 с 0,1 до 0,3 сопровождается повышением η с 12 до 50%. Увеличение L_1/L_2 с 0,3 до 0,5 сопровождается ростом η с 50 до 74%. Дальнейший рост L_1/L_2 с 1 до 10 приводит к повышению η с 74 до 83%.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что:

- в стержневых ударных системах с плоскими торцами, в диапазоне отношений $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 10$; $0,1 \leq L_1/d_1 \leq 10$ с $d_1=d_2=60$ мм, наибольшая доля энергии ударного импульса, переданная в очаг деформации, составляет 83%. Данное максимальное значение получено при $L_1/d_1=10$; $L_1/L_2=10$.

- увеличение отношения L_1/d_1 до 20...30 не приводит к дальнейшему повышению доли энергии ударного импульса, поступающего в очаг деформации. Кроме того, использование L_1/d_1 более 10 в большинстве случаев нетехнологично и нецелесообразно.

- увеличение отношения длины бойка L_1 к его диаметру d_1 с $0,1 \leq L_1/d_1 \leq 10$ позволяет, в среднем, увеличить долю энергии ударного импульса, сообщаемую в очаг деформации, в 15,6 раза. Увеличение отношения длин бойка L_1 и волновода L_2 с $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 10$ позволяет, в среднем, увеличить долю энергии ударного импульса, сообщаемую в очаг деформации, лишь в 2,8 раза [28, 117].

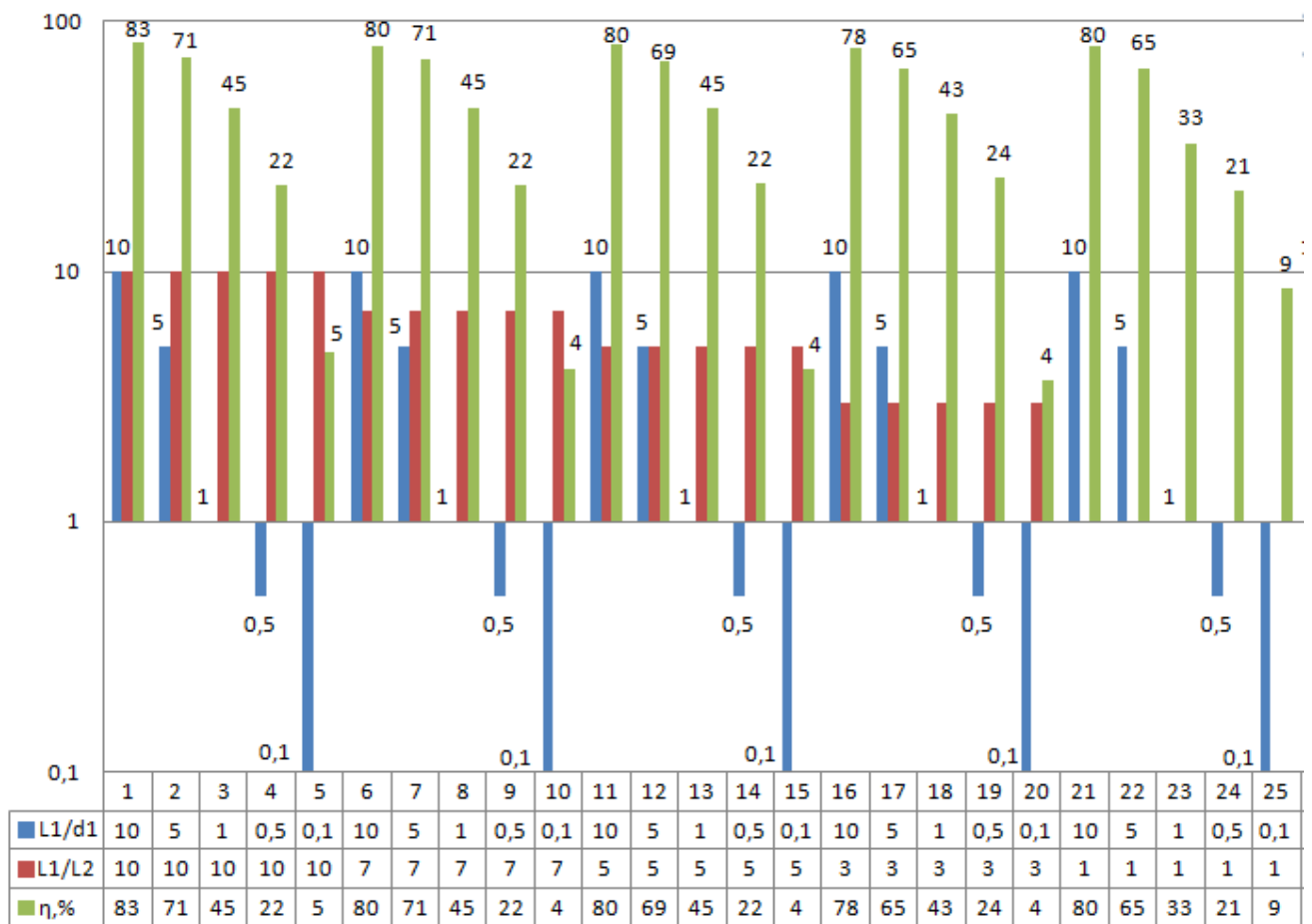


Рисунок 3.14 - Начало

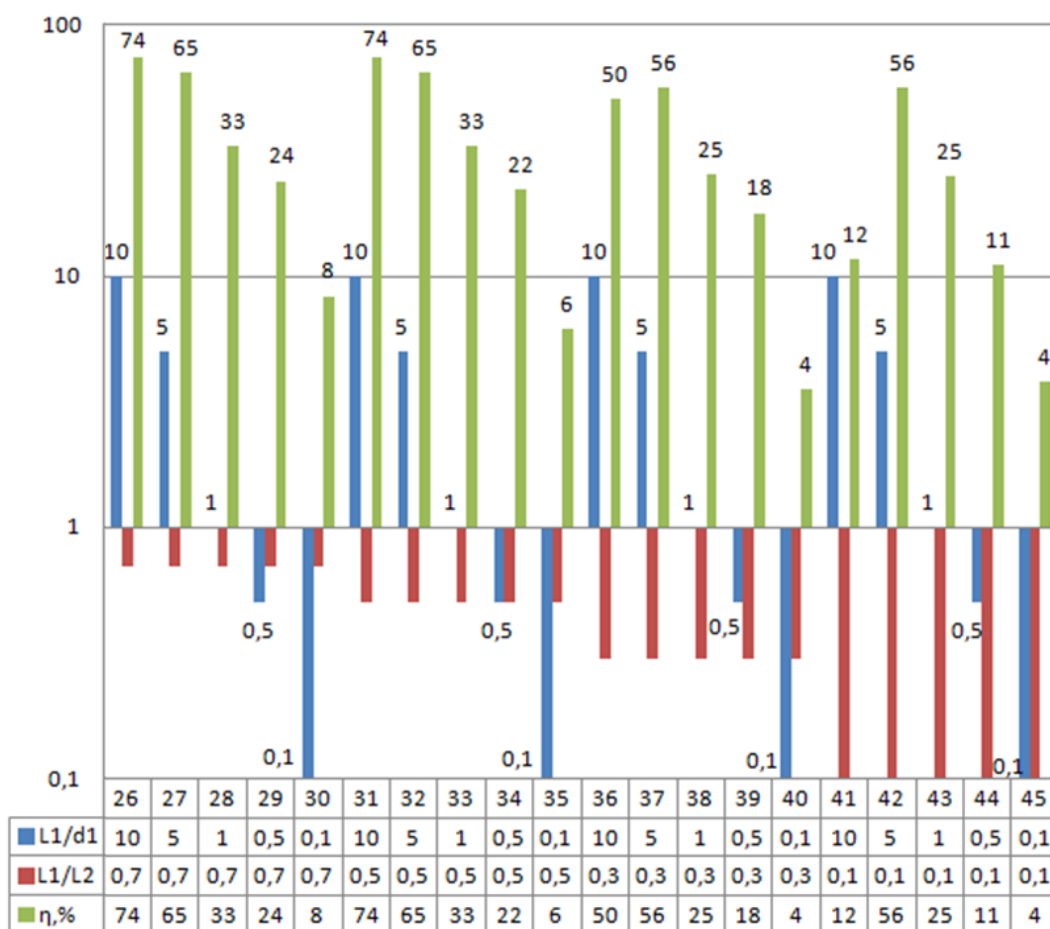


Рисунок 3.14 - Диаграмма зависимости доли передаваемой энергии ударного импульса в очаг деформации от отношения параметров ударной системы L_1/d_1 и L_1/L_2

3.4 Исследование влияния обрабатываемой среды на эффективность ВДУ

Условия эксперимента и подготовка модели

Моделирование происходило в несколько этапов. На первом этапе создавались модели материалов сред нагружения. Для исследований взяты три материала отличные по физико-механическим свойствам: сталь 40X, сплав АМгб и титан ВТ1-0. На втором этапе создавалась модель ударной системы. Она состоит из бойка и волновода, имеющих форму стержней с плоскими торцами. Волновод одним плоским торцом статически поджимался к среде нагружения, а по другому его плоскому торцу боек наносил единичный удар со скоростью V . Во всех экспериментах скорость удара бойка зависела от его массы, исходя из условия

постоянства энергии удара, равной 35 Дж. Это позволяет сравнивать результаты моделирования с данными, ранее проведенных при такой же энергии удара натуральных и вычислительных экспериментов. Эксперименты по выявлению влияния сред нагружения (АМг6 и ВТ1-0) на эффективность передачи энергии ударного импульса проводились в условиях, аналогичных ранее проведенным экспериментам для стали 40Х. Моделировались ударные системы: с отношением длины бойка L_1 к его диаметру d_1 в диапазоне $1 \dots 10$; с отношением длины бойка L_1 к длине волновода L_2 в диапазоне $1 \dots 10$; с диапазоном величин диаметров бойка и волновода $d_1=d_2=30, 48, 60$ мм. Выбранный диапазон параметров элементов ударной системы характерен для генераторов импульсов, имеющих рациональное сочетание необходимой мощности и допустимых габаритных размеров. При исследовании выполнялись расчеты для 120 экспериментальных точек.

На третьем этапе оценивалась энергия полученного в результате моделирования ударного импульса. Смоделированные импульсы соответствовали экспериментальным, имели фронты спада и нарастания, и в зависимости от условий эксперимента, формировалась хвостовая часть ударного импульса - как результат действия отраженных волн. Адекватность полученных ударных импульсов (их форма, длительность, амплитуда) оценивалась их сравнением с экспериментальными данными, полученными при аналогичных условиях на специализированном полноразмерном стенде, предназначенном для изучения волновых процессов при ВДУ. Полученные в результате моделирования значения соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Результаты моделирования

Анализ эффективности передачи энергии ударного импульса в зависимости от параметров ударной системы и материала сред нагружения представлен на рисунке 3.15. Так, в ударных системах с диаметрами бойка и волновода равными 30 мм влияние материала среды нагружения прослеживается только в ударных системах с низкой энергоэффективностью (η не более 37%) с параметрами $L_1/d_1=1$; $L_1/L_2=1 \dots 10$ (рисунок 3.15, а). При использовании таких ударных систем и работе

со сплавами АМг6 и ВТ1-0 удалось передать в среднем больше на 10,2% и 6,7%, соответственно, по сравнению со сталью 40Х.

Во всех других рассматриваемых ударных системах влияние среды нагружения на результаты ВДУ находилось в пределах 1-2%.

В ударных системах с диаметром бойка и волновода 48 мм влияние среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса достаточно близко по характеру к ударной системе с $d_1=d_2=30$ мм (рисунок 3.15, б). Значимое влияние среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса отмечено в низкоэффективных ударных системах (n не более 37%) с параметрами $L_1/d_1=1$; $L_1/L_2=1...10$.

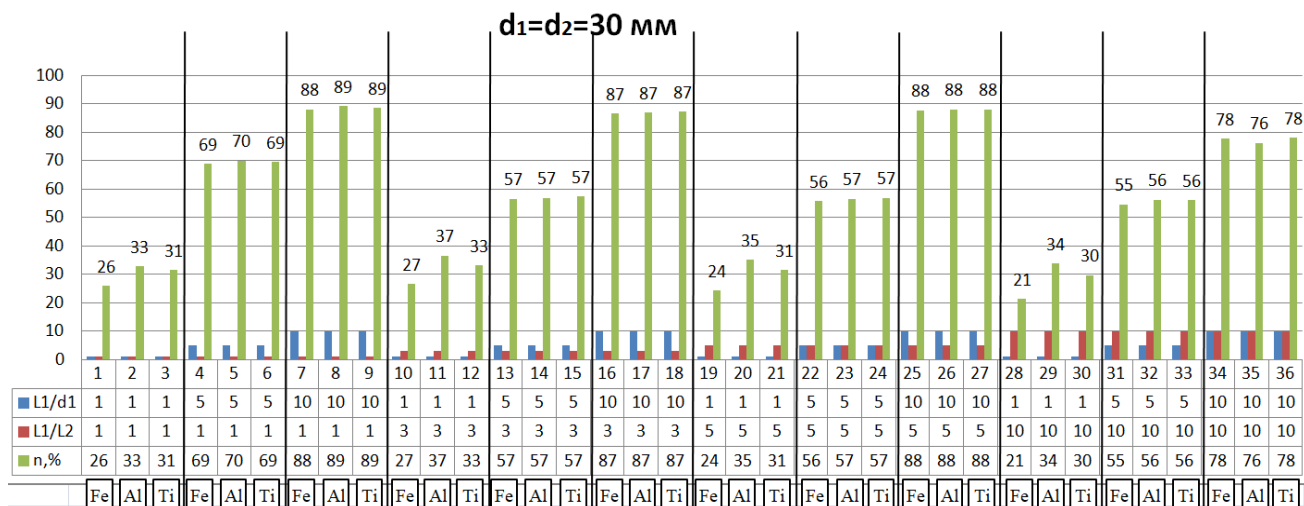


Рисунок 3.15, а - (начало)

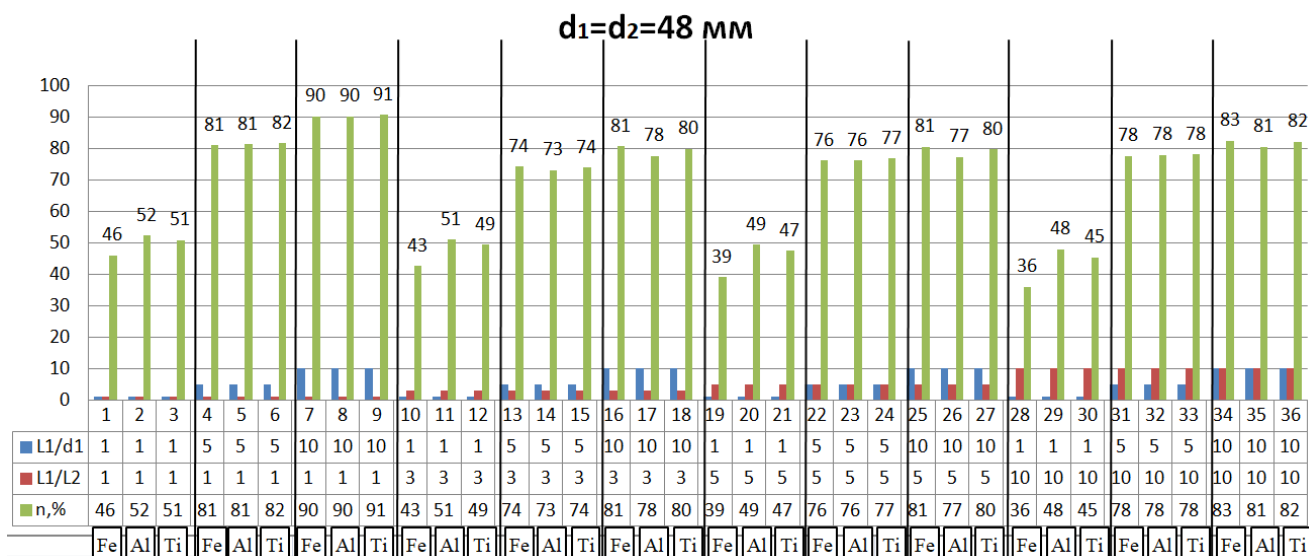
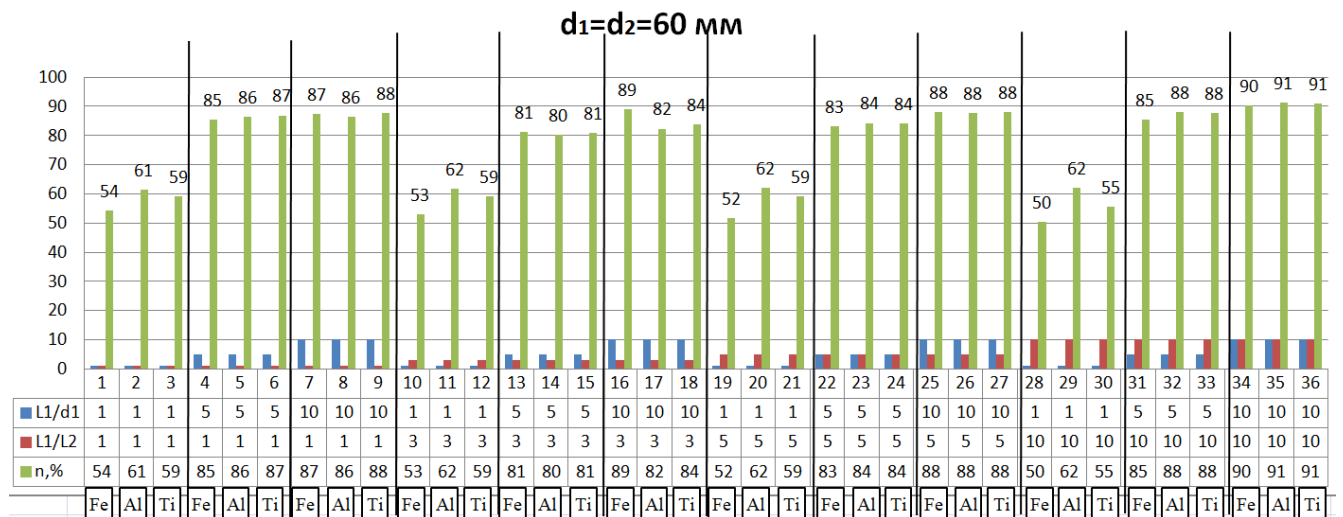


Рисунок 3.15, б - (начало)



в)

а - ударные системы диаметром 30мм; б - ударные системы диаметром 48мм;

в - ударные системы диаметром 30мм

Обозначения материалов сред нагружения: $\boxed{\text{Fe}}$ - сталь 40Х; $\boxed{\text{Al}}$ - АМГ6; $\boxed{\text{Ti}}$ - ВТ1-0

Рисунок 3.15 - Диаграмма зависимости доли передаваемой энергии ударного импульса (n) в очаг деформации от отношения параметров ударной системы (L_1/d_1 и L_1/L_2) и материала нагружаемой среды

Так, при материале среды нагружения АМГ6 и ВТ1-0 позволило повысить долю передаваемой энергии на 9% и 7%, соответственно, по сравнению со сталью 40Х. Во всех других ударных системах влияние марки материала на эффективность передачи энергии ударного импульса установлено в пределах 1...3%, без явных преимуществ того или иного материала.

При диаметре бойка и волновода равном 60 мм (рисунок 3.15, в), влияние материала на эффективность ударной системы, как и ранее, установлено для наименее эффективных ударных систем (n не более 62%) с параметрами $L_1/d_1=1$; $L_1/L_2=1...10$. В этом случае, изменение среды нагружения на АМГ6 и ВТ1-0 по сравнению со сталью 40Х сопровождается увеличением доли передаваемой энергии на 9,5% и 5,7% соответственно. В других ударных системах влияние среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса составляет 1..3%.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что:

- наиболее значимое влияние на долю передаваемой энергии ударного импульса оказывают параметры бойка, изменение которых в рассмотренном диапазоне позволяет в 15,6 раза повысить эффективность ударной системы.

- следующим по значимости фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность передачи энергии ударного импульса, является соотношение длин бойка и волновода, изменение которого в исследованном диапазоне значений позволяет в 2,8 раза повысить долю передаваемой энергии.

- наименьшее влияние на эффективность передачи энергии удара в очаг деформации ударной системой оказывает материал среды нагружения – 1...3% для рациональных значений соотношений параметров элементов ударной системы (п более 80%). При вынужденном выборе менее эффективных ударных систем ($L_1/d_1=1$; $L_1/L_2=1...10$; п менее 62%) влияние материала среды нагружения более значимо и может составлять 6...10%.

Выбор параметров элементов ударной системы генератора импульсов для ВДУ различных материалов с учетом выполненного теоретического исследования позволит более тонко управлять процессом и получить максимальный эффект от ВДУ, а также оптимизировать габаритные размеры генератора импульсов в зависимости требуемой мощности [69].

3.5 Исследование влияния формы инструмента на характер упрочнения при единичном ударе для одноконтактных и многоконтактных схем ВДУ

Целью исследований является выявление влияния формы инструмента на эффективность упрочнения при единичном ударе, с учетом физико-механических свойств обрабатываемого материала и изучение особенностей деления энергии ударного импульса на несколько инструментов для обеспечения возможности обработки мягких материалов.

Условия эксперимента и подготовка модели

Создание конечно-элементной модели процесса волнового одноконтактного и многоконтактного деформационного упрочнения проводилась с помощью доработки модели формирования ударного импульса. Для этого бойку вместо

одного удара, задавалось несколько ударов с частотой 10 Гц и энергией ударов 100 Дж. Среде нагружения ранее представляющей собой полупространство, задавались конечные размеры: длина 100 мм, ширина 50 мм, толщина 15 мм. Обрабатываемому материалу присваивалась постоянная скорость движения (подачи S) по одной из осей модели. Это необходимо для того, чтобы отпечатки ударов инструмента смещались друг относительно друга, а не накладывались в одну точку. В созданную модель, между волноводом и средой нагружения устанавливался один или несколько инструментов, согласно плану эксперимента. После нанесения единичного удара, с энергией 100 Дж для сталей (40Х, 45, 10ХСНД, 30ХГСА, 09Г2С) и 35 Дж для АМГ2 и АМГ6, исследовалась доля переданной энергии в очаг деформации, оценивалась глубина упрочнения h (мм), степень упрочнения ΔHV (%), максимальные величины деформаций E (%) и эквивалентных напряжений (Equivalent Stress (von-Mises)) Q (МПа).

На первом этапе выполнялось моделирование нанесения единичных (не перекрывающихся) отпечатков. На втором этапе моделировался процесс ВДУ с перекрытием отпечатков в диапазоне $K=0; 0,3; 0,6$.

Адекватность полученных параметров упрочненных областей (размеры единичных отпечатков; значения твердости и глубины упрочнения, полученные при рассматриваемых значениях коэффициента перекрытия K) оценивалась в результате их сравнения с данными, полученными при аналогичных условиях на установке для волнового деформационного упрочнения. Полученные в результате моделирования значения соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Результаты моделирования

Моделирование нанесения единичных отпечатков при ВДУ для одноконтактной и многоконтактной схем нагружения

В модели, при одноконтактной схеме ВДУ, в качестве инструмента, поочередно использовались: 1) шары диаметром 10, 18, 27 мм; 2) стержневые ролики длиной 60 мм и диаметрами 10, 18 и 27 мм; 3) плоские стержни высотой 18 мм и диаметрами 6, 12 и 24 мм (удар наносился плоским торцом стержня); 4)

стержень с одним сферическим торцом диаметром 12 мм (рисунок 3.16). Влияние данных типов инструментов на эффективность ударного воздействия исследовалась для каждой выбранной марки материала.

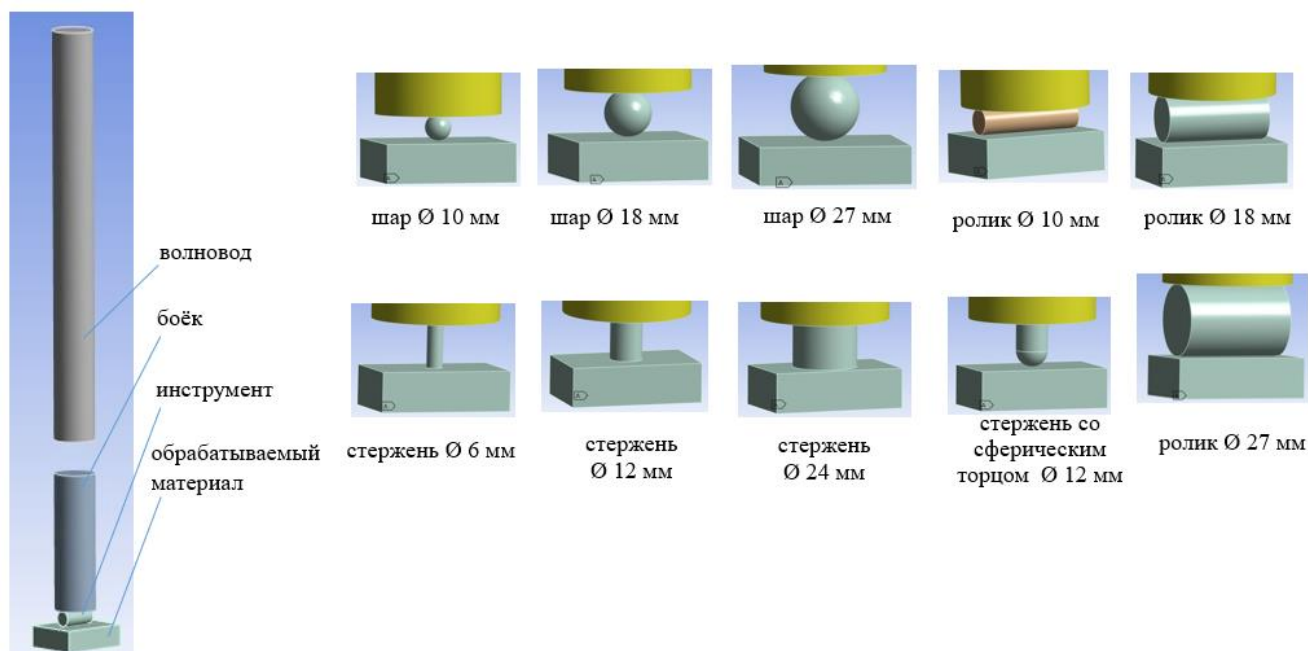


**Рисунок 3.16 - Инструменты для исследования возможностей
одноконтактной схемы ВДУ**

Так, при единичном ударе по стальной среде нагружения, в условиях ВДУ установлено, что у всех рассматриваемых марок сталей просматривается общая тенденция ($\pm 3...4\%$) распределение доли передаваемой энергии ударного импульса, в зависимости от типа инструмента. Добавление (поочередно) таких инструментов, как шаров диаметром 10 и 18 мм, роликов диаметром 18 и 27 мм, стержней с плоскими торцами диаметром 6 и 24 мм, привело к передаче не менее 80% энергии ударного импульса. При том, что энергоэффективность выбранной ударной системы без инструмента составляет 87,7%. Упрочнение глубиной более $h=6,5$ мм обеспечили лишь шары диаметром 10 и 18 мм и стержни со сферическим торцом диаметром 12 мм. Стержни с плоским торцом диаметром 24 мм ни в одном стальном образце не смогли обеспечить образование упрочненного слоя. Стержни с плоским торцом диаметром 12 мм обеспечили глубину упрочнения у всех сталей не более 2 мм, кроме 30ХГСА $h=0$ мм.

В результате однократного удара по рассматриваемым инструментам (поочередно) по сплавам АМГ2 и АМГ6 доля передаваемой энергии составила более 80%. Так, при ударе по АМГ2 в случае использования единичных инструментов, таких как шар диаметром 10 мм, стержень с плоскими торцами диаметром 6 мм и стержень со сферическим торцом диаметром 12 мм, наблюдалось сквозное упрочнение образца ($h=15$ мм), однако получаемые значения E порядка 100%, свидетельствуют о переупрочнении материала. Использование шаров диаметрами 18 и 27 мм позволило достичь $h=11,8$ и 9 мм, при обеспечении $E=48$ и 28%, соответственно. Применение роликов диаметрами 10, 18, 27 мм обеспечило соответственно $h=8,7$; 8,7; 7,8 мм; $\Delta HV=42, 30, 22\%$. Стержни с плоскими торцами диаметрами 12 и 24 мм обеспечили в поверхностном слое глубину упрочнения $h=6,2$ и 1,25 мм и $\Delta HV=9$ и 11%, соответственно.

Использование в качестве инструментов для удара по АМГ6 шаров диаметров 10 и 18 мм, стержня со сферическим торцом диаметром 12 мм, стержня с плоскими торцами диаметром 6 позволили обеспечить глубину 7,8; 5,9; 8; 5 мм и степень упрочнения 43, 27, 31, 37%, соответственно. Не обеспечили формирование упрочненного слоя ролик диаметром 27 мм и стержни с плоскими торцами диаметрами 12 и 24 мм.

Таким образом, из рассматриваемых типов инструментов наиболее перспективными (с точки зрения обеспечения глубины и степени упрочнения), для использования их в качестве инструментов в конечно-элементной модели формирования ударного импульса в многоконтактной ударной системе являются шары диаметрами 18 и 27 мм, стержни с плоскими торцами диаметром 6 мм, стержни со сферическими торцами диаметром 12 мм. Использование шара диаметром 10 мм в качестве инструмента, в дальнейшем, исключается из рассмотрения из-за большого проникновения в среду нагружения, в силу небольших своих размеров, и сложности закрепления в волноводе при ВДУ. Применение рассматриваемых роликов, при многоконтактном нагружении, так же не целесообразно из-за их высокой площади контакта. Использование нескольких

таких инструментов может привести к значительному снижению параметров упрочнения.

Для проведения исследований эффективности передачи энергии ударного импульса в многоконтактной ударной системе, создавалась ее модель, в которую поочередно вносились от 2 до 5 инструментов. Ограничивающим фактором числа одновременно используемых инструментов являлся размер сечения волновода (в нашем случае диаметром 48 мм), которое передавало им энергию ударного импульса (рисунок 3.17).

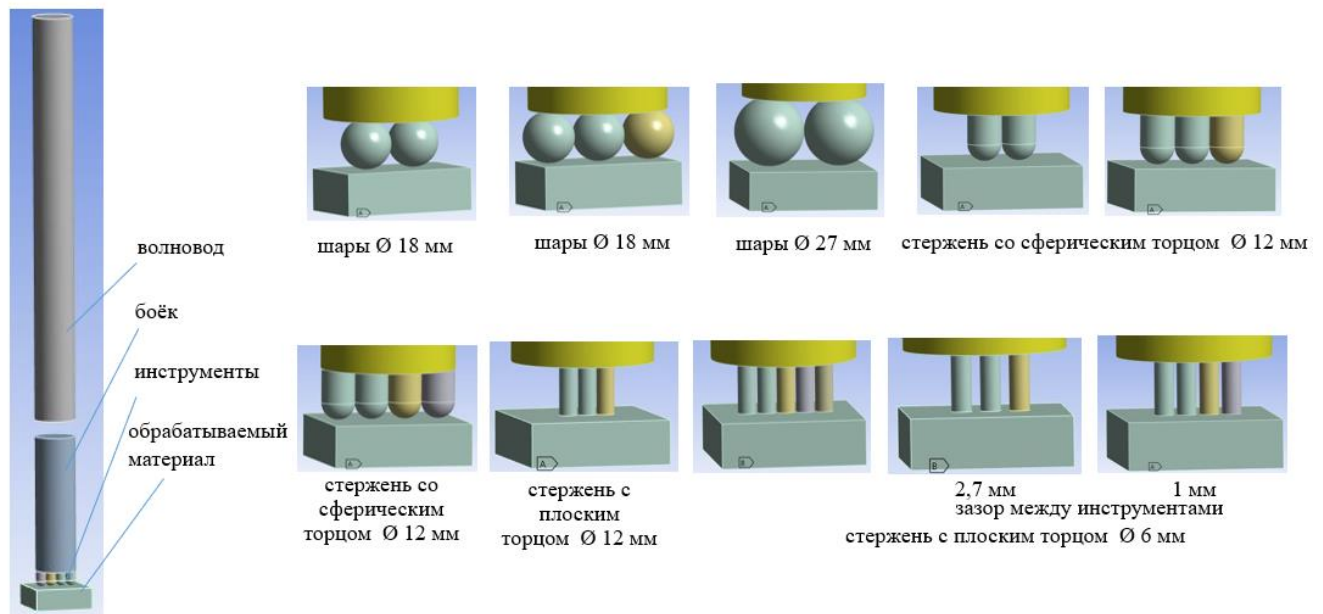


Рисунок 3.17 - Инструменты для исследования возможностей многоконтактной схемы ВДУ

Так, при единичном ударном воздействии, на рассматриваемые стальные среды нагружения, добавление второго, третьего и четвертого инструментов привело, в среднем, к снижению доли передаваемой энергии на 5; 7; 8,8%, соответственно, по сравнению с аналогичными одноконтактными системами. Так, при увеличении числа шаров диаметром 18 мм с 1 до 2 и до 3 штук, привело к снижению глубины и степени упрочнения, соответственно: 1) для стали 09Г2С h до 7; 5,1; 3,7 мм, ΔHV до 39; 32; 29 %; 2) для стали 10ХСНД h до 6,5; 5,9; 5 мм, ΔHV до 38; 29; 28 %; 3) для стали 30ХГСА h до 5,5; 5; 4,3 мм, ΔHV до 70; 51; 46 %; 4)

для стали 40X h до 7,3; 5,5; 5 мм, ΔHV до 31; 27; 25 %; 5) для стали 45 h до 7,5; 6,5; 5,9 мм, ΔHV до 39; 26; 19 %.

При увеличении числа шаров диаметром 27 мм с 1 до 2 штук привело к следующему снижению глубины и степени упрочнения: 1) для стали 09Г2С h до 5,9; 1,8 мм, ΔHV до 25; 19 %; 2) для стали 10ХСНД h до 4,6; 4,3 мм, ΔHV до 23; 18 %; 3) для стали 30ХГСА h до 4,6; 2,5 мм, ΔHV до 34; 17 %; 4) для стали 40X h до 6,8; 4,3 мм, ΔHV до 23; 18 %; 5) для стали 45 h до 6,6; 5 мм, ΔHV до 23; 19 %.

Так, с возрастанием числа стержней со сферическим торцом диаметром 12 мм с 1 до 2, до 3 и 4 штук, привело к снижению глубины и степени упрочнения, соответственно: 1) для стали 09Г2С h до 7,8; 5,9; 5; 4,3 мм, ΔHV до 51; 44; 38; 35 %; 2) для стали 10ХСНД h до 7,5; 5,6; 5; 4,3 мм, ΔHV до 50; 41; 38; 35 %; 3) для стали 30ХГСА h до 6,5; 5; 4,3; 3,7 мм, ΔHV до 100; 79; 71; 61 %; 4) для стали 40X h до 8,4; 6,2; 5,3; 5 мм, ΔHV до 37; 34; 30; 29 %; 5) для стали 45 h до 9; 6,2; 5,3; 4,6 мм, ΔHV до 37; 35; 32; 30 %.

При единичном ударном воздействии на среды нагружения из материалов АМГ2 и АМГ6, добавление второго, третьего и четвертого инструментов привело, в среднем, к снижению доли передаваемой энергии на 2; 3; 3,5; 3,8%, соответственно, по сравнению с аналогичными одноконттактными системами. Так, при увеличении числа шаров диаметром 18 мм с 1 до 2 и до 3 штук, привело к снижению глубины и степени упрочнения, соответственно: 1) для АМГ2 h до 11,8; 8,1; 6,8 мм, ΔHV до 69; 52; 0 %; 2) для стали АМГ6 h до 5,9; 4,6; 4,3 мм, ΔHV до 27; 23; 22 %.

При возрастании числа шаров диаметром 27 мм с 1 до 2 штук привело к следующему снижению глубины и степени упрочнения: 1) для АМГ2 h до 9; 6,2 мм, ΔHV до 51; 47%; 2) для стали АМГ6 h до 4,6; 4,3 мм, ΔHV до 21; 16%.

Так, с увеличением числа стержней со сферическим торцом диаметром 12 мм с 1 до 2, до 3 и 4 штук, привело к снижению глубины и степени упрочнения, соответственно: 1) для АМГ2 h до 15; 7,8; 7,1; 6,5 мм, ΔHV до 100; 74; 68; 67 %; 2) для АМГ6 h до 8,1; 5; 4; 3,4 мм, ΔHV до 37; 32; 28; 27 %.

Возрастание числа стержней с плоскими торцами диаметром 6 мм с 1, 2, 3, 4, 5 штук привело к уменьшению глубины упрочнения, соответственно: 1) у АМГ2 (рисунок 3.18) h до 15; 6,8; 5,6; 5; 3,2 мм, ΔHV до 100; 48; 35; 26; 22 %; 2) у АМГ6 h до 5; 2,5; 2; 0; 0 мм, ΔHV до 31; 16; 11; 0; 0%.

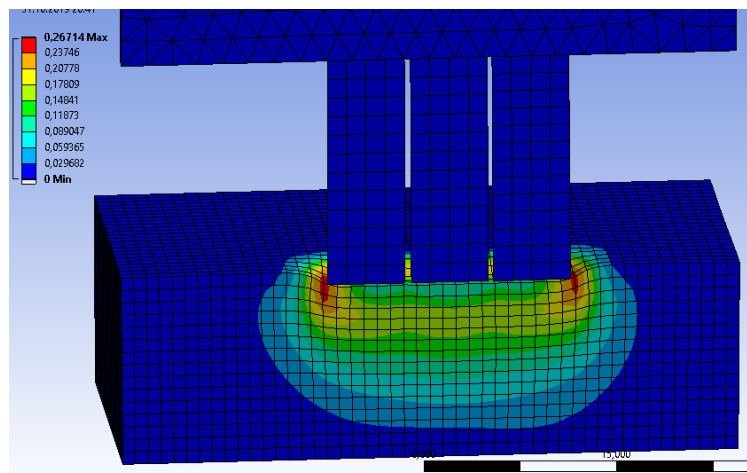


Рисунок 3.18 - Пример эпюры распределения деформаций в сплаве АМГ2 после единичного удара по трем стержням с плоскими торцами, диаметром 6 мм

Так, как сплав АМГ2 является достаточно пластичным материалом, то обеспечение между инструментами полного перекрытия упрочненных областей может быть достигнуто не только за счет расположения стержней с плоскими торцами диаметром 6 мм рядом друг с другом, но и на некотором расстоянии. Для поиска дистанции между инструментами, обеспечивающее полное перекрытие упрочненных областей проводились серии экспериментов. В результате чего установлено, что оптимальным расстоянием между тремя стержнями с плоскими торцами является 2,7 мм; для четырех инструментов – 1 мм. Использование данных зазоров между инструментами позволяет увеличить производительность обработки, в первом случае на 23%, а во втором случае на 15%, без ухудшения параметров упрочнения в поверхностном слое. Для материала АМГ6 установлена оптимальная дистанция равная 3 мм, между двумя стержнями с плоским торцами диаметром 6 мм. Дальнейшее увеличение числа стержней, в случае АМГ6, не приводит к формированию упрочненного слоя.

Таким образом, в случае дальнейшего использования рассматриваемых типов инструментов, для одноконтактных схем волнового деформационного упрочнения всех рассматриваемых видов материалов, согласно их возможностям по формированию упрочненного поверхностного слоя целесообразно использовать стержневой ролик диаметром 10 мм и длиной 60 мм. Для одноконтактного упрочнения материала марки АМГ2 перспективным представляется использование в качестве инструмента стержня с плоским торцом диаметром 12 мм, а для обработки АМГ6 – стержнем с плоскими торцами диаметром 6 мм.

В многоконтактных схемах нагружения, целесообразно использовать, для обработки рассматриваемых стальных материалов, инструментов в виде четырех стержней со сферическим торцом диаметром 12 мм. Для многоконтактных схем при ВДУ сплава АМГ2 – целесообразно использовать стержни с плоскими торцами диаметром 6 мм в количестве пяти штук. Для многоконтактной обработки материалов АМГ6 предлагается использование инструментов в форме плоских стержней диаметром 6 мм в количестве трех штук.

Моделирование серии ударов инструмента с перекрытием отпечатков для одноконтактной и многоконтактной схем нагружения ВДУ

Так, в результате одноконтактной схемы ВДУ сплава АМГ2 стержневым роликом с плоскими торцами диаметром 12 мм и сплава АМГ – стержнем с плоскими торцом диаметром 6 мм, не удалось получить перекрывающиеся упрочненные области из-за увязания инструмента в обрабатываемом материале, при работе с заданными значениями коэффициента перекрытия K . ВДУ единичным стержневым роликом диаметром 10 мм при $K=0; 0,3; 0,6$ мм всех рассматриваемых материалов позволили получить следующие результаты. Так, при ВДУ стали 09Г2С увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3 до 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 4; 4,5; 5 мм и степени упрочнения до 36; 39; 45%, соответственно. При ВДУ стали 40Х, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3, 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 4,7; 5,6; 6,2 мм и степени упрочнения до 20; 30; 34%, соответственно. При ВДУ стали 10ХСНД, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3, 0,6, привело к повышению

глубины упрочнения h до 2,8; 3,7; 4,7 мм и степени упрочнения до 30; 38; 45%, соответственно. При ВДУ стали 45 (рисунок 3.19), увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 4,7; 5; 5,6 мм и степени упрочнения с 31; 33; 37%, соответственно. При ВДУ стали 35ХГСА, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 3,1; 4,4; 5,9 мм и степени упрочнения до 39; 70; 93%, соответственно. При ВДУ АМГ2, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 5,3; 5,9; 6,6 мм и степени упрочнения до 44; 46; 60%, соответственно. При ВДУ АМГ6, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h с 3,7; 4,4; 5 мм и степени упрочнения с 22; 29; 35%, соответственно.

При многоконтактной схеме ВДУ сплава АМГ2 и АМГ6 стержнями со сферическими торцами в количестве пяти штук не удалось получить перекрывающиеся упрочненные области из-за застревания (увязания) инструмента в обрабатываемом материале при работе с заданными значениями коэффициента перекрытия K .

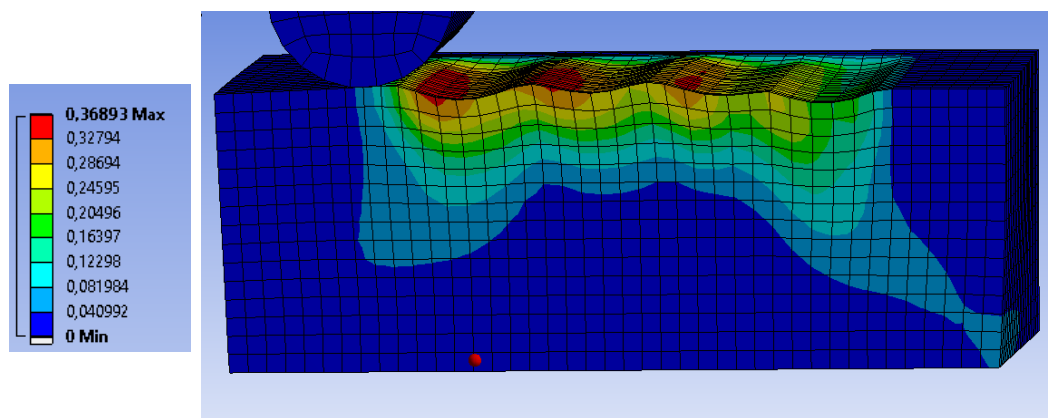


Рисунок 3.19 - Пример эпюры распределения деформаций в стали 45 после волнового деформационного упрочнения роликом диаметром 10 мм, и длиной 60 мм, с коэффициентом перекрытия отпечатков $K=0$

Так, в результате многоконтактной ВДУ стальных материалов четырьмя инструментами в виде стержней со сферическими торцами диаметром 12 мм,

получены следующие результаты. При многоконтактном ВДУ стали 09Г2С, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 4,3; 4,7; 5 мм и степени упрочнения до 37; 39; 41%, соответственно. При многоконтактном ВДУ стали 35ХГСА, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 3,7; 4; 4,2 мм и степени упрочнения до 62; 67; 74%, соответственно. При многоконтактном ВДУ стали 10ХСНД, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 4,3; 4,5; 4,7 мм и степени упрочнения до 39; 43; 47%, соответственно. При многоконтактном ВДУ стали 40Х, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3 до 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 3,4; 4,7; 5,3 мм и степени упрочнения до 30; 32; 36%, соответственно. При многоконтактном ВДУ стали 45, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 3,7; 4,7; 5 мм и степени упрочнения до 32; 34; 38%, соответственно.

В результате многоконтактного волнового деформационного упрочнения сплава АМГ2 инструментами в виде пяти штук стержней с плоскими торцами диаметром 6 мм, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 3,4; 3,4; 4 мм и степени упрочнения до 35; 40; 44%, соответственно [22, 23, 92, 93].

При многоконтактном волновом деформационном упрочнении сплава АМГ6 тремя стержнями с плоскими торцами диаметром 6 мм, увеличение коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения h до 2,9; 4,9; 5,8 мм и степени упрочнения до 29; 39; 46%, соответственно.

Многоконтактное ВДУ двумя шарами диаметром 27 мм с увеличением коэффициента перекрытия K с 0; 0,3; 0,6, привело к повышению глубины упрочнения в сплавах: АМГ2 h до 6,4; 8,2; 10 мм и степени упрочнения с 50; 57; 69%; АМГ6 h до 4,8; 5,3; 6 мм и степени упрочнения до 17; 29; 40%, соответственно.

ВЫВОДЫ ПО 3 ГЛАВЕ

На основании исследований волновых процессов в ударной системе сформулированы выводы и уточнены рекомендации, касающиеся выбора рациональных параметров бойка и волновода, выявлены условия энергетической эффективности ВДУ:

1. 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 (η) более 80% энергии ударного импульса в очаг деформации, а влияние материала среды нагружения на эффективность передачи энергии составляет: 1-3% если η более 80%; 6-10% если η менее 60%.

2. Нецелесообразно использовать ударные системы диаметром более 60 мм, так как уровень технической сложности растет быстрее, чем энергетическая эффективность этой системы, а 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: $1 < L_1/L_2 < 3$; $30 < d_1 = d_2 < 60$; $5 < L_1/d_1 < 10$.

3. Установлено, что при одноконтактной схеме ВДУ целесообразно применение в качестве инструмента стержневого ролика (например, диаметром 10 мм и длиной 60 мм), что при ударе с энергией 70 Дж обеспечивает упрочненный слой глубиной более 7 мм с максимальной степенью упрочнения более 40% в образцах с исходной твердостью 170-230 НВ. При обработке пластичных материалов целесообразно применять многоконтактные схемы ВДУ, увеличивая количество инденторов с уменьшением твердости материала и устанавливая их с зазором для увеличения производительности обработки без снижения параметров упрочнения, а в качестве инструментов использовать стержневые инденторы с плоским или сферическим торцом $\varnothing$ 6 мм и более (например: при ВДУ образцов с НВ 65 – 3 индентора, а для образцов с НВ 45 – 5 инденторов).

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ИЗДЕЛИИ С КОНЕЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ

4.1 Особенности разработки конечно-элементной модели ВДУ

Для разработки конечно-элементной модели ВДУ выполнялась «достройка» конечно-элементной модели ударной системы ВДУ (рисунок 4.1). Использование элементов ударной системы, состоящей из бойка и волновода (как в третьей главе) для генерирования ударного импульса при моделировании процесса ВДУ не использовалось. Это связано с тем, что появлением в модели дополнительных объектов (бойка и волновода) и как следствие увеличения значительного числа дополнительных конечных элементов привело бы к усложнению модели процесса ВДУ и значительному увеличению времени расчета (в 18 раз), поэтому при построении модели процесса ВДУ элементы ударной системы (боек, волновод) заменялись приложением непосредственно к инструменту закона изменения силы во времени [109].

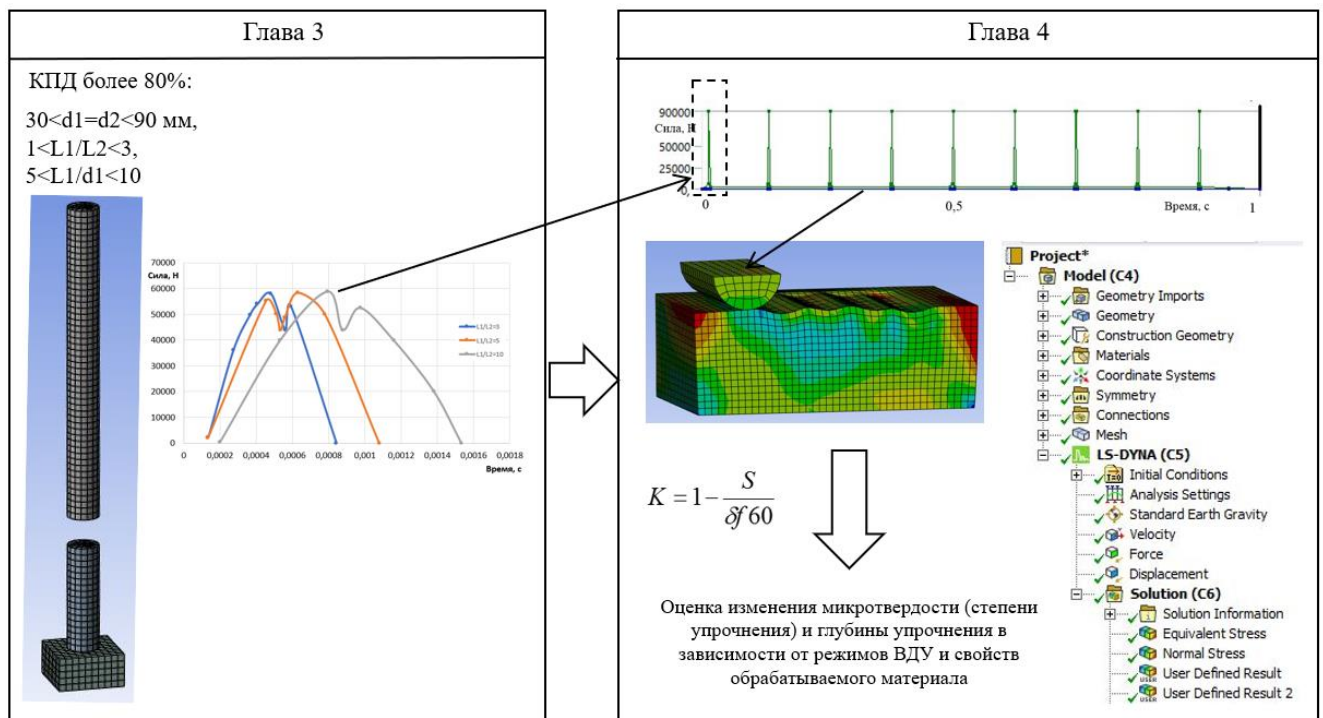


Рисунок 4.1 - Этапы «достройки» модели ударной системы ВДУ

Данный закон использовался для задания серии ударов инструмента по обрабатываемому материалу при моделировании процесса ВДУ.

Модель процесса ВДУ состояла из инструмента, который с постоянной статической силой поджимался к обрабатываемому материалу. Инструмент, согласно закону, полученному при том или ином отношении L_1/L_2 , периодически наносил удары по обрабатываемому материалу, который двигался с постоянной скоростью S вдоль оси, расположенной перпендикулярно оси нанесения ударов. В результате ударов, в обрабатываемом материале формировались отпечатки ударов инструмента (упрочненная область). Равномерность нанесения ударов оценивалась через коэффициент перекрытия K . При моделировании, ВДУ для всех проводимых исследований выполнялось с $K=0,4$. Выбор ВДУ с $K=0,4$ объясняется перспективностью применения равномерности упрочнения с таким перекрытием для повышения эксплуатационных и прочностных свойств. Модель позволяет определять изменения микротвердости (степени упрочнения) и глубины упрочнения в зависимости от режимов ВДУ, марки материалов (свойств) и размеров упрочняемых образцов.

4.2 Исследование влияния прямоугольных, треугольных, цилиндрических форм образцов на эффективность ВДУ

Специфика формирования упрочненного слоя ВДУ впервые позволила обратить внимание на тот факт, что при равных объемах упрочняемых образцов и режимах обработки наблюдаются разные эпюры распределения микротвердости в поверхностном слое. То, что данная особенность имеет волновой характер должно подтверждаться именно влиянием изменений размеров бойка и габаритов, обработанных образцов на результаты упрочнения, вследствие того, что сформированная в результате удара акустическая волна каждый раз преобразуется на всех границах с изменяемой акустической жесткостью, в том числе и на границах, которые являются конечными размерами исследуемых образцов. Целью исследований является выявление взаимосвязей между параметрами волны

деформации, и формой, размерами упрочняемых образцов и картой микротвердости поверхностного слоя, характеризующей его упрочнение.

Условия эксперимента и подготовка модели

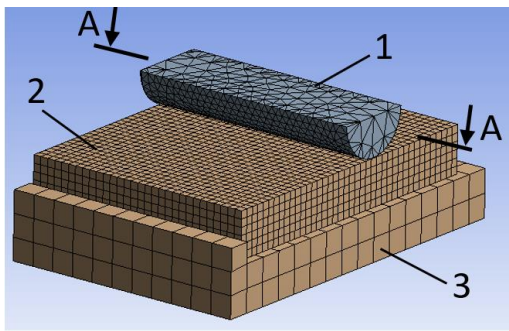
В модели, в качестве инструмента 1, использовался стержневой ролик диаметром 10 мм и длиной 30 мм. Удары наносились с энергией 30 Дж и коэффициентом перекрытия $K=0,4$. Для оценки влияния разных типов волн деформаций созданы модели ударных систем, с отношением длин бойка L_1 и волновода L_2 : 3, 5, 10. В качестве обрабатываемых материалов использовались: сталь 45, титан ВТ 1-0, бронза БрАЖ 9-4, алюминий В-95. Выбор материалов обоснован широтой их применения для изготовления разнообразных изделий в промышленности.

Исследование влияния геометрических форм на эффективность упрочнения проводилась на прямоугольных, треугольных и цилиндрических образцах толщиной 6 мм с единым для всех объемом 7200 мм^3 (рисунок 4.2).

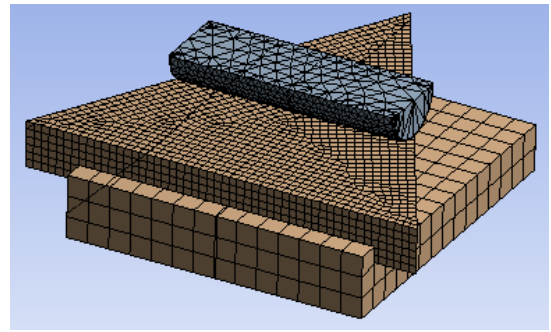
Для изучения влияния внутренних полостей на характер упрочнения, в прямоугольных исследуемых образцах ($30 \times 30 \times 10 \text{ мм}$), вырезались единого объема (300 мм^3) треугольные, цилиндрические и прямоугольные пазы. Типы внутренних сечений образцов использованных при ВДУ, представлены на рисунке 4.3.

Исследование эффективности упрочнения оценивалось по результатам измерения микротвердости в выбранном сечении обрабатываемого материала (рисунок 4.3). На основании серии измерений микротвердости определялось максимальное значение степени (H_m) и глубины (h_m) упрочнения.

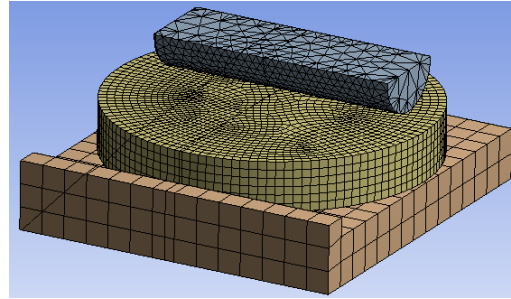
Глубиной упрочнения считалось расстояние, измеренное по перпендикуляру к лицевой (упрочняемой) поверхности образца до плоскости, в которой зафиксировано 10% увеличение значения микротвердости по сравнению с ее исходной величиной. Степень упрочнения определялась для точек, находящихся на поверхности образца. Оценки адекватности результатов моделирования проводились на основании их сравнения с данными реального эксперимента, полученными при аналогичных режимах и условиях (размеры единичных отпечатков; значения твердости и глубины упрочнения).



а)



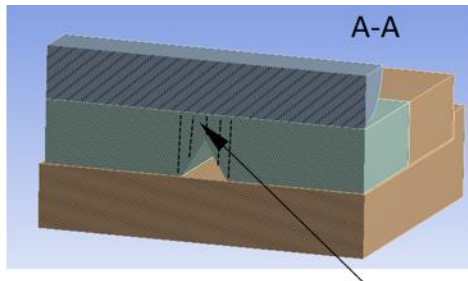
б)



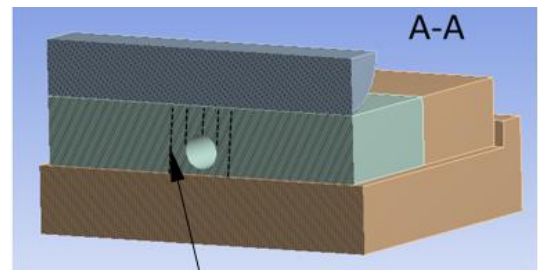
в)

1 - инструмент, 2 – образец, 3 – стол

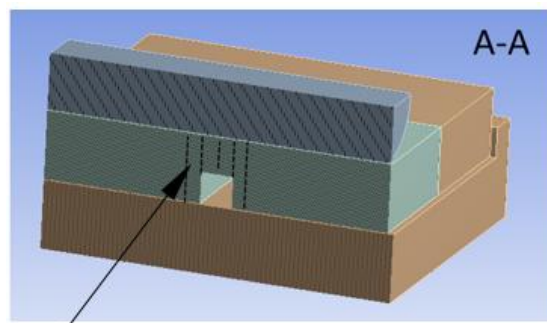
Рисунок 4.2 - Примеры моделей процесса ВДУ с образцами прямоугольной (а), треугольной (б) и цилиндрических (в) форм



а)



б)



в)

Места измерения микротвердости образца в сечении A-A (рисунок 4.2,а)

Рисунок 4.3 - Треугольные (а), цилиндрические (б) и прямоугольные (в) формы внутренних полостей упрочняемых образцов

Полученные в результате моделирования значения соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Результаты моделирования

Исследование с помощью КЭМ влияния форм и полостей в обрабатываемом изделии на эффективность ВДУ

Во всех рассматриваемых образцах из стали 45 в результате ВДУ установлено сквозное упрочнение на всю толщину образца (6 мм), а наибольшее увеличение степени упрочнения (на 3,5-5,7%) получено при обработке образцов прямоугольной формы (рисунок 4.4). Величины степеней упрочнения, достигнутые при ВДУ образцов треугольных и цилиндрических форм, в рамках одной ударной системы мало отличались. Так, при $L_1/L_2=3$ и 10, H_m составила 52 и 49%, соответственно.

При ВДУ титановых (ВТ 1-0) образцов ударными системами с отношением длин $L_1/L_2=3$ и 10 не выявлено влияния форм образцов из обрабатываемых материалов на результаты его упрочнения. Так, при обработке с $L_1/L_2=3$ у всех упрочняемых форм материалов достигнута степень упрочнения 82%, а глубина упрочнения 1,4 мм. При $L_1/L_2=10$, $H_m=74\%$, $h_m=1,4$ мм. При использовании ударной системы с $L_1/L_2=5$ глубина упрочнения у всех рассматриваемых форм образцов составила 1,6 мм. Наибольшее значение степени упрочнения 90% достигнуто в образцах прямоугольной формы, тогда как в образцах треугольной формы H_m составила 87%, а в цилиндрических 82%.

При упрочнении образцов из бронзы (БрАЖ 9-4) прямоугольной формы, по сравнению с треугольной и цилиндрической, установлено на 2,7% большее повышение степени упрочнения (значения глубины упрочнения практически не изменились).

Использование ударных систем с отношением $L_1/L_2=3$, 5 и 10 привело к формированию следующих значений степени и глубины упрочнения при ВДУ образцов прямоугольной формы: $H_m=112\%$ и $h_m=2,8$ мм; $H_m=113\%$ и $h_m=2,9$ мм; $H_m=110\%$ и $h_m=2,5$ мм, соответственно.

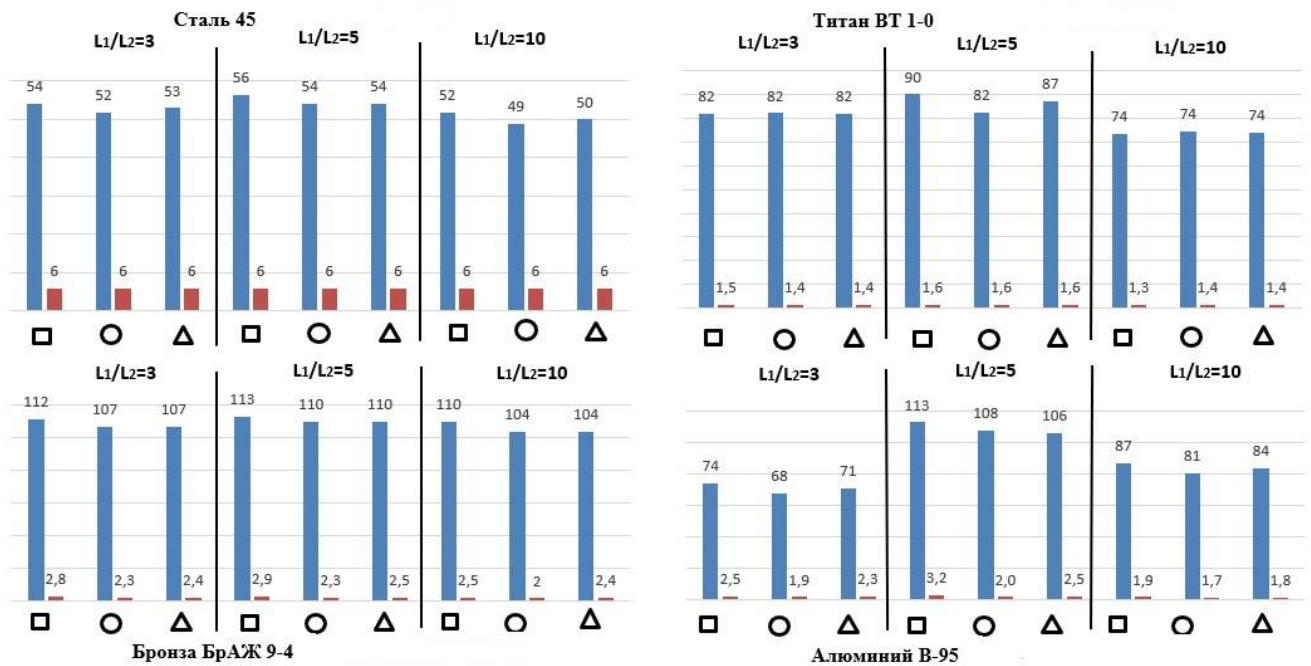


Рисунок 4.4 - Исследования влияния отношений длин бойка и волновода, внешних форм обрабатываемого материала на изменение степени H_m (%) и глубины h_m (мм) упрочнения при ВДУ (где □ ○ Δ соответственно, образцы прямоугольной, цилиндрической и треугольной форм)

В случае упрочнения образцов цилиндрической формы: $H_m=107\%$ и $h_m=2,3$ мм; $H_m=110\%$ и $h_m=2,35$ мм; $H_m=104\%$ и $h_m=2$ мм, соответственно. При обработке образцов треугольной формы: $H_m=107\%$ и $h_m=2,38$ мм; $H_m=110\%$ и $h_m=2,48$ мм; $H_m=104\%$ и $h_m=2,35$ мм, соответственно.

При упрочнении алюминия (В-95), образцы прямоугольной формы по сравнению с треугольными обеспечили повышение степени упрочнения на 4,9% и глубины на 13,6%, а с цилиндрическими - H_m на 6,4% и h_m на 26,2%. Применение ударных систем с отношением $L_1/L_2=3, 5$ и 10 привело к формированию следующих значений степени и глубины упрочнения при ВДУ образцов прямоугольной формы: $H_m=74\%$ и $h_m=2,5$ мм; $H_m=113\%$ и $h_m=3,2$ мм; $H_m=87\%$ и $h_m=1,9$ мм, соответственно. В случае упрочнения образцов цилиндрической формы: $H_m=68\%$ и $h_m=1,9$ мм; $H_m=108\%$ и $h_m=2$ мм; $H_m=81\%$ и $h_m=1,7$ мм, соответственно. При обработке образцов треугольной формы: $H_m=71\%$ и $h_m=2,3$ мм; $H_m=106\%$ и $h_m=2,5$ мм; $H_m=84\%$ и $h_m=1,8$ мм, соответственно.

Исследование влияния полостей на характер упрочнения в разных ударных системах

При анализе результатов эксперимента установлено сквозное упрочнение исследуемых областей обрабатываемых материалов, поэтому оцениваться будет только достигнутая максимальная степень упрочнения. Так, при упрочнении из стали 45 с $L_1/L_2=3$ образцов с прямоугольной формой внутренней полости достигнута $H_m=47,5\%$, тогда как в образцах с треугольной и цилиндрической формой $H_m=46,5\%$.

При ВДУ, в образцах из стали 45 с прямоугольной формой внутренней полости, по сравнению с цилиндрическими и треугольными достигнута на 3-4% большая степень упрочнения. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с $L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 47,5; 46,5 и 46,4%, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 50,8; 49,3 и 49,1%, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=48,5$; 46,5 и 45,3%, соответственно.

При ВДУ, в образцах из титана (ВТ 1-0) с прямоугольной формой внутренней полости, достигнута большая степень упрочнения по сравнению с цилиндрическими на 3,8%, а с треугольными на 3,2%. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с $L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 74,2; 72,1 и 69,8%, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 83,4; 79,4 и 81,5%, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=71$; 69,7 и 68,6%, соответственно.

При ВДУ, в образцах из бронзы (БрАЖ 9-4) с прямоугольной формой внутренней полости, достигнута большая степень упрочнения по сравнению с цилиндрическими на 0,7%, а с треугольными на 8%. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с $L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 79,9; 71,5 и 76,8%, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 82,7; 78,3 и 85,8%, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=78,3$; 69,5 и 76,6%, соответственно.

При ВДУ, в образцах из алюминия (В-95) с прямоугольной формой внутренней полости, достигнута большая степень упрочнения по сравнению с

цилиндрическими на 23,8%, а с треугольными на 18,1%. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с $L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 53; 42,6 и 40,7%, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 89,4; 71,4 и 64,5%, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=50,2$; 43,2 и 41,5%, соответственно.

В результате проведенных исследований установлена взаимосвязь между эффективностью упрочнения, формой образцов из различных обрабатываемых материалов, формой внутренних полостей, волнами деформации, генерируемыми в ударных системах с $L_1/L_2=3, 5, 10$.

1. Установлено, что образцы прямоугольной формы по сравнению с треугольной и цилиндрической, обеспечивают формирование большей степени и глубины упрочнения, в рамках использования одной и той же ударной системы с теми или иными параметрами бойка и волновода.

2. Установлено, что доминирующее влияние на эффективность упрочнения оказывают параметры ударной системы - отношение длин бойка и волновода, а не форма обрабатываемого образца или марка материала.

3. Установлено, что наличие в образцах пазов с прямоугольной формой, по сравнению с цилиндрической, обеспечивает формирование большей степени упрочнения [118].

4.3 Особенности влияния материала и конечных размеров детали (масштабного фактора) на карты микротвердости

В разных отраслях промышленности используют машины и оборудование, состоящие из деталей различных габаритных размеров. При их проектировании, разработке технологий изготовления, в преобладающем большинстве случаев применяется общий подход, как к небольшим деталям, так и к крупногабаритным. Однако, ряд исследователей, в своих работах определили влияние габаритных размеров (масштабного эффекта) на изменение механических и эксплуатационных свойств.

Так, Mailander R. и Bawersfeeld W. [33] при кручении образцов из стали Cr-Ni-W ($\sigma_B=91$ кг/мм²) установили, что с увеличением их диаметров с 14 до 45 мм происходит снижение предела усталости на 29%.

Lehr E. на конференции по вопросам расчета и конструирования деталей машин, предложил использовать зависимость снижения величины усталостной прочности исходя из диаметра образцов от 10 до 300 мм [3]. Данный график представлен на рисунке 4.5, где за 100% взято значение предела усталости образца Ø 10 мм. Данную зависимость автор назвал предположительной, так как он ее построил на основании обобщения литературных источников.

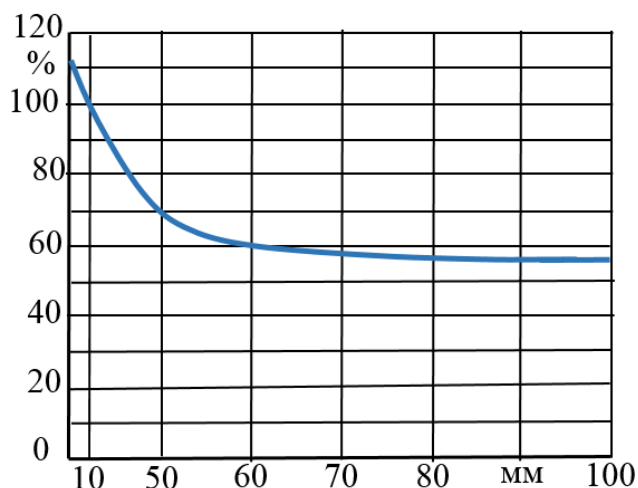
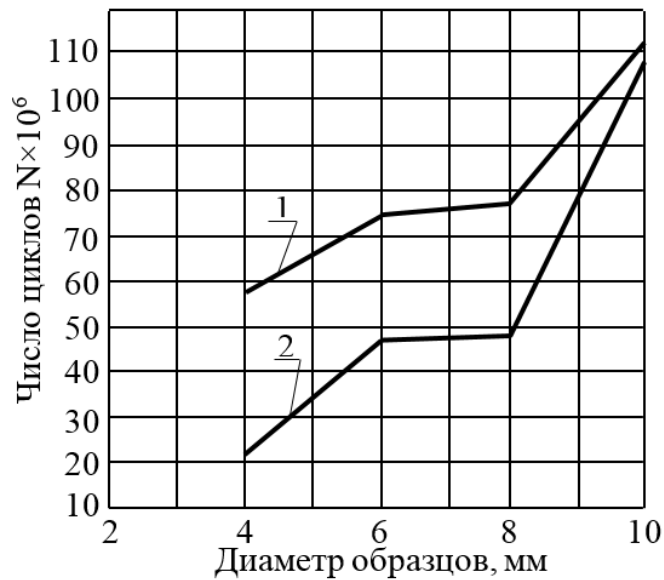


Рисунок 4.5 - Зависимость снижения величины усталостной прочности исходя из диаметра образцов [3]

В работе [52] Афанасьев Н.Н. установил, что уменьшение диаметров образцов с 27 до 7,5 мм приводит к повышению прочности до 5%. Так же отмечено снижение пределов усталости в работе [194] при увеличении диаметров с 9,5 до 30 мм образцов из углеродистой стали до 10,5%, из стали Cr-Ni-W до 16,8.

Влияние формы образцов на эксплуатационные свойства установлены в работе [172]. В ней отмечено, что при одинаковом контактном давлении, цилиндрическая форма (1) образца по сравнению со сферической (2), обеспечивает повышение долговечности от 2 до 5 раз с ростом их диаметра с 4 до 10 мм (рисунок 4.6).



1 - цилиндрические образцы; 2 - сферические образцы

Рисунок 4.6 - Изменение долговечности образцов в зависимости от их диаметра и формы [62, 172]

Таким образом на основании небольшого числа приведенных работ можно сделать вывод о необходимости учета масштабного эффекта изделий перед их проектированием, либо на стадии повышения параметров их качества за счет упрочнения.

Технология волнового деформационного упрочнения разработана относительно недавно, её возможности до конца не исследованы, в том числе влияние масштабного эффекта, воздействие которого предположительно стоит ожидать в связи с волновой природой данного способа.

Условия эксперимента

Для проведения исследований были взяты образцы из стали 45 с различным соотношением геометрических размеров: длины, ширины, толщины (таблица 4.1).

Таблица 4.1

Геометрические размеры образцов, мм.

Длина	Ширина	Толщина	Длина	Ширина	Толщина	Длина	Ширина	Толщина
50 * 20 * 10			100 * 20 * 10			150 * 20 * 10		
50 * 40 * 10			100 * 40 * 10			150 * 40 * 10		
50 * 40 * 20			100 * 40 * 20			150 * 40 * 20		

Для исключения влияния параметров ВДУ на исследуемый процесс упрочнение образцов на установке было выполнено с одним и тем же режимом: энергия ударов 25 Дж; частота ударов 23,3 Гц; коэффициент перекрытия отпечатков $K=0,4$; инструмент – цилиндрический ролик шириной 7 мм и диаметром 10 мм.

В результате воздействия волны деформации на материал происходит изменение его твердости и структуры. По изменению микротвердости поверхностного слоя выявлено влияние конечных размеров материала на процесс упрочнения. Для проведения исследований микротвердости упрочненные образцы разрезались в направлении продольной подачи (сечение А-А) (рисунок 4.7, 4.8).

Для того, чтобы оценить меняется ли картина распределения микротвердости по всей исследуемой плоскости ZY в продольном и поперечном направлении с шагом 0,3 мм, было полностью промерено несколько образцов. В результате замеров было установлено, что картина распространения микротвердости повторяется по всей плоскости образца. На основании этих данных было принято решение проводить исследования не по всей плоскости ZY, а только на фрагменте поверхности шириной 15 мм, расположенном в центре образца (рисунок 4.7).

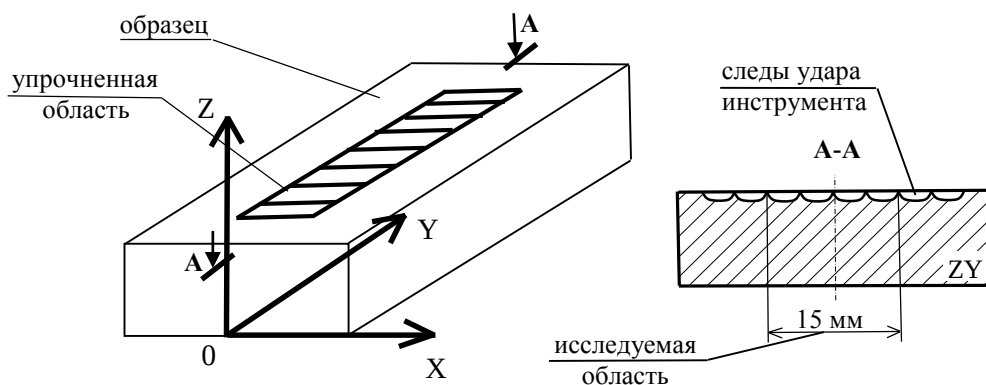


Рисунок 4.7 - Схема исследуемого образца

Для установления влияния технологической наследственности на эпюру распределения микротвердости были выполнены измерения нескольких образцов до упрочнения (рисунок 4.9, а,б).

Результаты исследований

Результаты измерений показали, что преобладающими являются области с твердостью $H_\mu=1800$ МПа ($H_\mu=1728-1761$ МПа). Данные значения и будем считать исходной твердостью. Преимущественно по краям (рисунок 4.9 а,б), а также хаотично – фрагментарно по всей поверхности образцов, располагаются участки повышенной твердости $H_\mu=2000$ МПа. На рисунок 4.9, б области с повышенной твердостью, относительно исходной на 200 МПа, располагаются в виде нескольких горизонтальных полос (волокнистой макроструктуры), проходящих через всё рассматриваемое сечение образца.



Рисунок 4.8 - Разрезанные образцы разной длины, ширины, толщины, в направлении продольной подачи инструмента ВДУ, перед измерением микротвердости

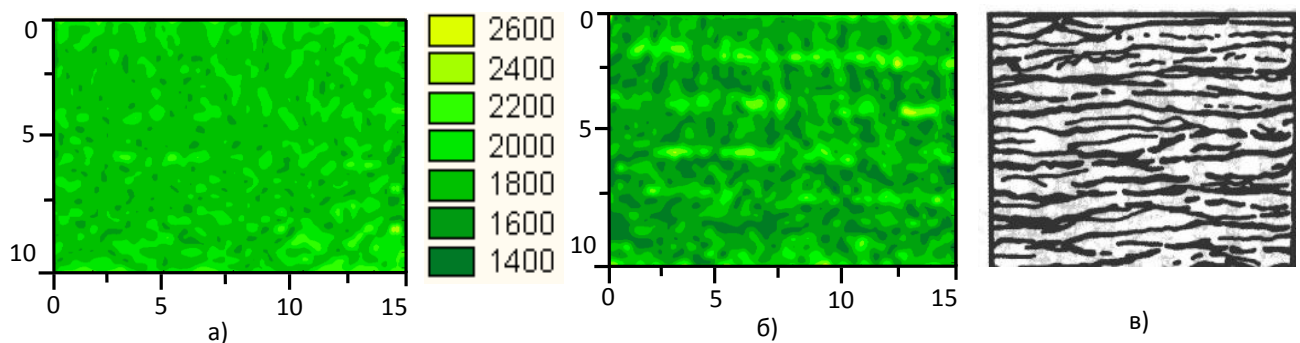


Рисунок 4.9 - а), б) - Эпюры распределения микротвердости в неупрочненных образцах; в) - макроструктура металла после обработки давлением

Появление данных областей является результатом технологической наследственности от предыдущих операций на стадии производства исходного материала образцов. Пример похожей сформированной макроструктуры металла после обработки давлением представлен в работе [193] (рисунок 4.9 в).

Полученные в ходе измерений эпюры распределения микротвердости исследуемых упрочненных образцов (таб.4.1) представлены на рисунок 4.10.

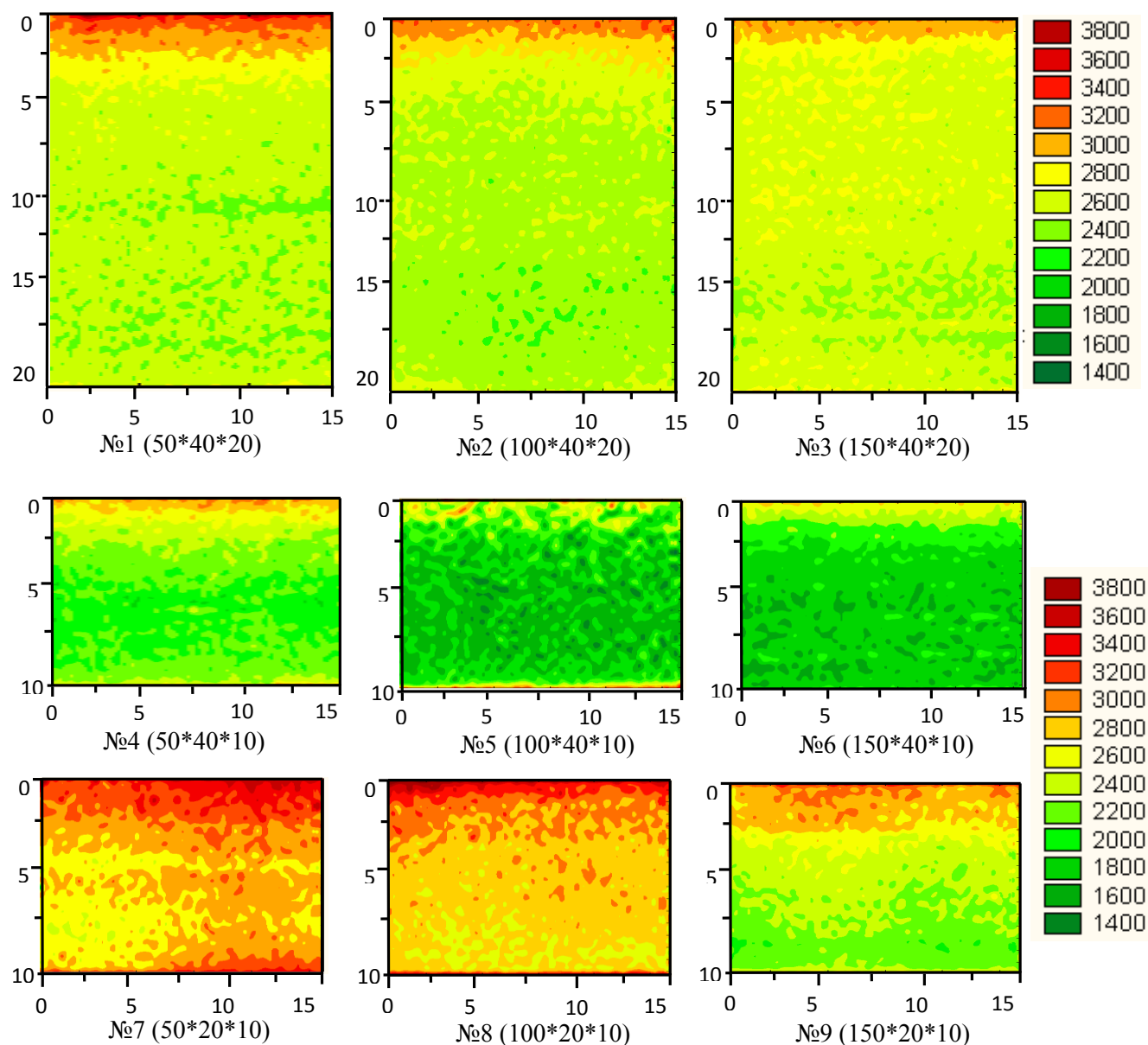


Рисунок 4.10 - Эпюры распределения микротвердости в исследуемых образцах

Анализ показал, что эпюры носят разный характер распределения микротвердости несмотря на то, что они были упрочнены с одним и тем же

режимом ВДУ. Это свидетельствует о том, что на распространение волн деформации оказывают влияние конечные размеры упрочняемого материала.

При сравнении эпюр на рисунок 4.9 и 4.10 можно сделать вывод, что технологическая наследственность не оказывает заметного влияния на распределение микротвердости при упрочнении ВДУ.

У образцов с разными геометрическими размерами, но одинаковым объемом (например, объем образцов $50 \times 40 \times 20$ и $100 \times 40 \times 10$ равен 40000 мм^3), были установлены разные картины распределения микротвердости (рисунок 4.10). Данный факт является еще одним подтверждением значимого влияния геометрических размеров материала на распределение микротвердости при упрочнении волной деформации.

Сравнительный анализ эпюр распределения микротвердости в поверхностном слое позволил установить следующие закономерности влияния конечных размеров материала на распределение микротвердости в поверхностном слое при его упрочнении волной деформации.

Изменение длины образцов

Так, после увеличения длины с 50 до 100 мм, в образцах с габаритными размерами (мм) $100 \times 40 \times 20$; $100 \times 40 \times 10$; $100 \times 20 \times 10$ установлено уменьшение твердости, соответственно, на 7,2%, 7,1% и 5,9%. В образцах $100 \times 40 \times 20$ и $100 \times 20 \times 10$ наблюдается упрочнение на всю толщину, минимально достижимая твердость составила 2400 МПа (рисунок 4.11).

После увеличения длины до 150 мм, в образцах $150 \times 40 \times 20$; $150 \times 40 \times 10$; $150 \times 20 \times 10$ твердость упала, соответственно, на 7,2%, 7,1% и 5,9% и составила, соответственно, 3000 МПа, 2600 МПа и 3200 МПа. В образцах $150 \times 40 \times 20$ и $150 \times 20 \times 10$ наблюдается полное упрочнение, минимально достижимая твердость практически не изменилась и составила, соответственно, 2400 МПа и 2200 МПа.

Изменение толщины образцов

После увеличения толщины с 10 до 20 мм у образцов $50 \times 40 \times 20$; $100 \times 40 \times 20$; $150 \times 40 \times 20$ возросла максимальная твердость, соответственно, на 12,5%, 13,3% и 13,3%. Также, с увеличением толщины, в образцах $50 \times 40 \times 20$; $100 \times 40 \times 20$;

150*40*20 отмечено появление сплошного упрочнения всего поверхностного слоя, минимально достижимая твердость которого составила, соответственно, 2200 МПа, 2400 МПа и 2400 МПа.

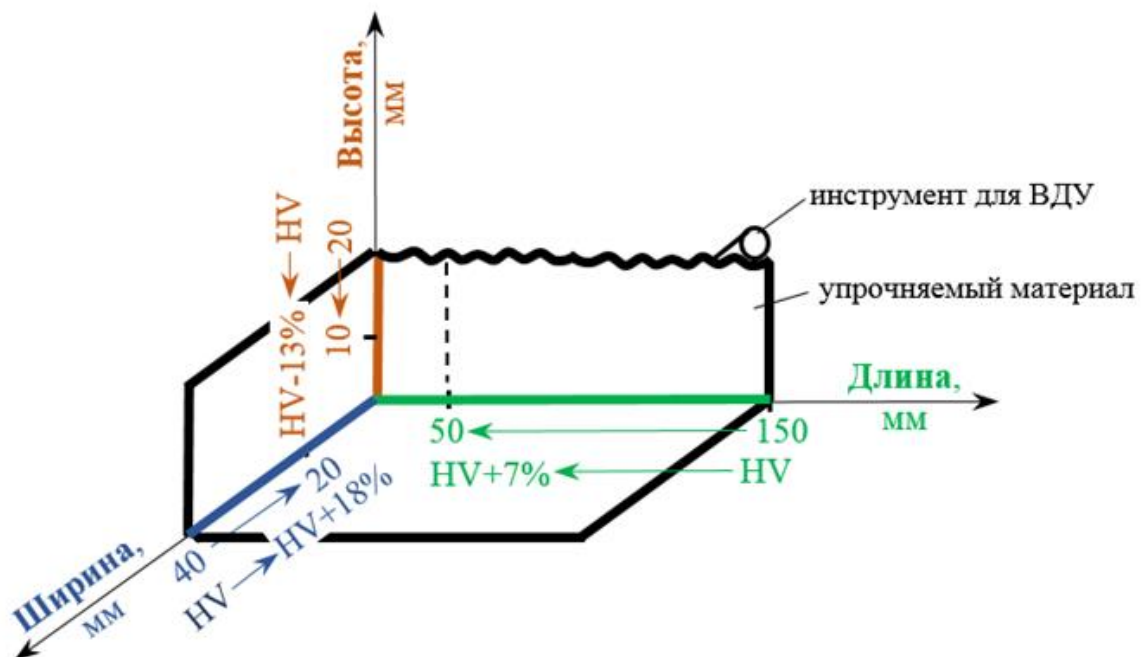


Рисунок 4.11 - Взаимосвязь между размерами образца и изменением микротвердости (HV) после ВДУ

Изменение ширины образцов

После увеличения ширины с 20 до 40 мм у образцов 50*40*10; 100*40*10; 150*40*10 твердость упала, соответственно, на 17,6%, 18,7% и 18,7% и составила, соответственно, 2800 МПа, 2600 МПа и 2600 МПа. Увеличение ширины с 20 до 40 мм в образцах 50*40*10; 100*40*10; 150*40*10 привело также и к уменьшению глубины упрочнения, соответственно, на 52%, 85% и 86%.

Рассмотренные особенности формирования упрочненного поверхностного слоя волной деформации за счет изменения его геометрических параметров имеют достаточно сложную природу, детальное изучение которой может оказаться важным и в практическом отношении.

В результате исследований, установлено, что:

- при равных объемах образцов и одинаковых режимах ВДУ, геометрические размеры обрабатываемого изделия оказывают влияние на формируемые параметры упрочнения поверхностного слоя.

- увеличение длины образцов с 50 до 150 мм в среднем приводит к падению их твердости на 6,7%;

- увеличение толщины образцов с 10 до 20 мм приводит к повышению их твердости в среднем на 13%;

- увеличение ширины образцов с 20 мм до 40 мм приводит к снижению твердости в среднем на 18,3%.

- при рассмотрении возможности ВДУ крупногабаритных изделий, для получения адекватных (предсказуемых) результатов, предварительные исследования должны проводиться на образцах габаритными размерами не менее (д*ш*в) 150*40*20 мм. В случае обработки изделий размерами менее 150*40*20 мм необходимо делать коррекцию на результаты исследований [6, 21, 29, 61, 63, 109, 119].

4.5 Исследование влияния наличия полостей различных размеров и формы в образцах, на эффективность ВДУ

Условия эксперимента и подготовка модели

Исходя из специфики формирования волновых состояний материала при ВДУ, достаточно интересными представляются исследования распределения микротвердости в поверхностном слое образцов цилиндрической и овальной формы, и в материалах, имеющих внутренние полости (пустоты).

Упрочнение ВДУ всех образцов инструментом - стержневым роликом диаметром 25 мм и шириной 30 мм, проводилось с энергией удара 70 Дж с коэффициентом, обеспечивающим равномерность перекрытия отпечатков ударов равным 0,4.

Изучение влияния геометрической формы обрабатываемого материала выполнялось на образцах, изготовленных из стали 45. Для сравнения использовались треугольные, прямоугольные и цилиндрические образцы

толщиной 10 мм. Примеры образцов представлены на рисунке 4.12. Выбор геометрических размеров образцов, при их общей толщине 10 мм обеспечивает единство их объёмов 10000 мм³.

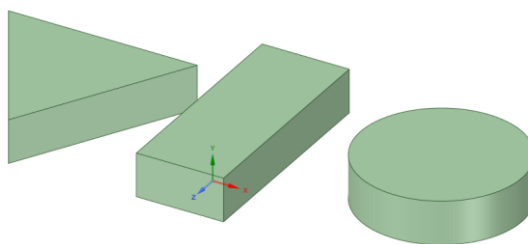


Рисунок 4.12 - Образцы из стали 45

Для исследования влияния формы внутренних полостей на характер упрочнения использовались образцы прямоугольной формы шириной 20 мм, длиной 50 и 100 мм, и высотой 10 и 15 мм, изготовленные из стали 45 и бронзы БРАЖ 9-4. Для данных исследований использовалось три типа образцов, имеющие по всей длине опорной поверхности: 1) паз с прямоугольным сечением (высотой 5 мм, шириной 10 мм); 2) паз в виде полукруга (радиусом 5 мм); 3) сквозные отверстия диаметром 5 мм. Используемые типы образцов представлены на рисунке 4.13.

Исследования карт микротвердости в исследуемых образцах выполнялись с использованием автоматического твердомера КВ 30S. Для этого из упрочненных образцов вырезались фрагменты, на которых, согласно схемам, измерялась микротвердость на опорных участках и областях над пазами и под отверстиями. Схемы измерения микротвердости представлены на рисунке 4.14.

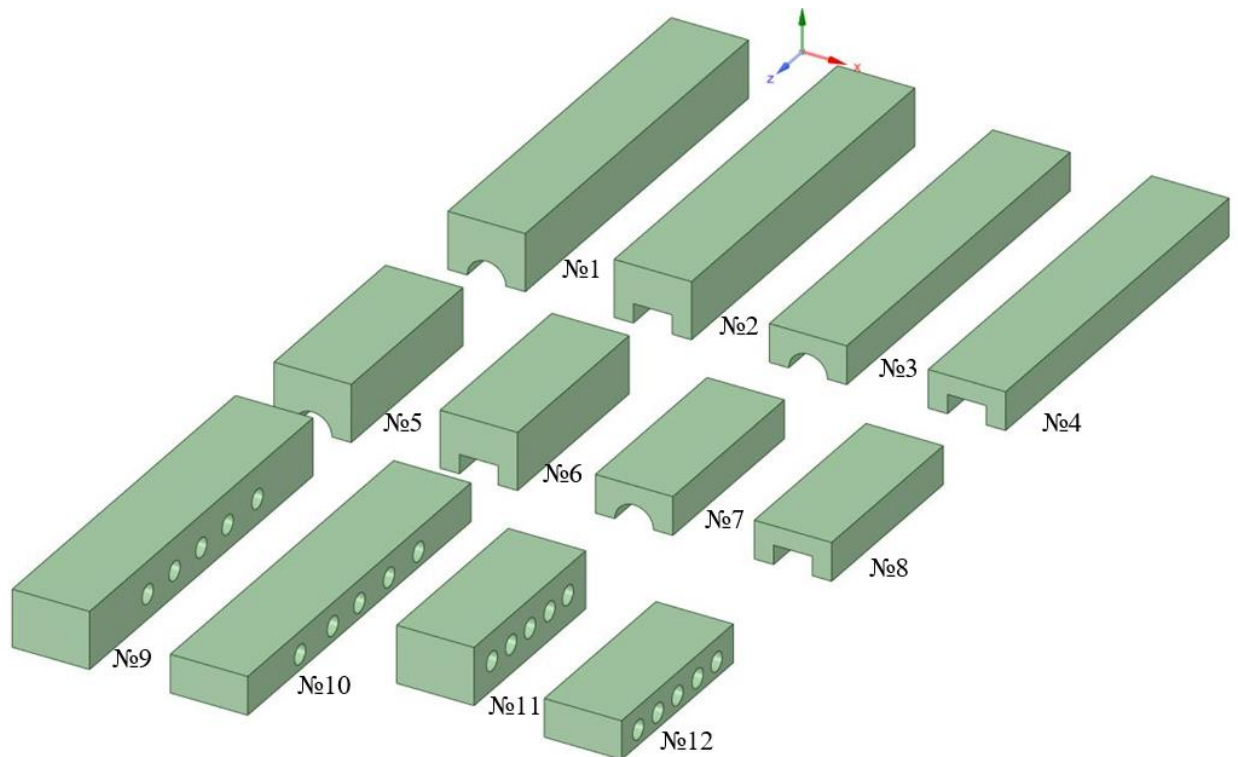
Результаты моделирования

Влияние геометрической формы обрабатываемого материала на характер ВДУ

Результаты ВДУ сравнивались по достигаемой степени упрочнения (ΔH), в зависимости от глубины упрочненного слоя. Графики распределения степени упрочнения по глубине поверхностного слоя в рассматриваемых типах образцов после их ВДУ представлены на рисунке 4.15.

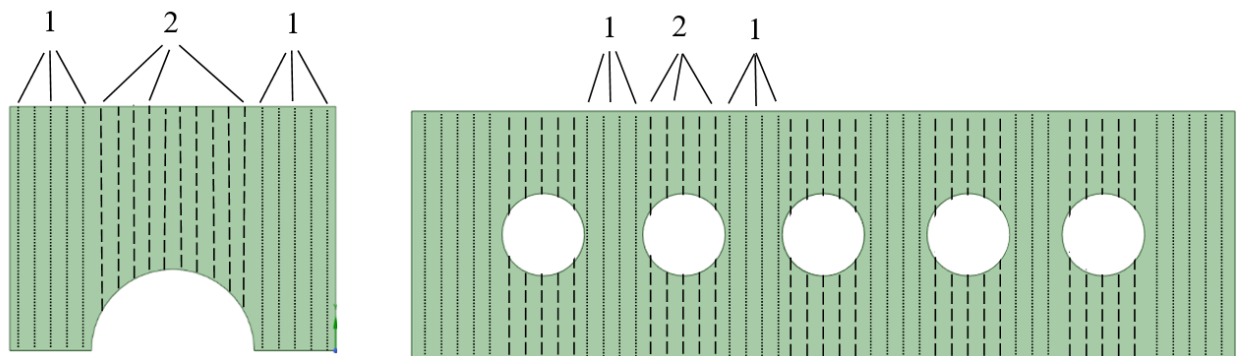
Из графиков виден сквозной характер упрочнения образцов всех типов. При ВДУ имеет место ярко выраженное двухстороннее упрочнение, с большей

степенью упрочнения не только контактной (лицевой), но и противоположной (опорной) поверхности и меньшей степенью упрочнения материала сердцевины образца.



*№1 - 100*20*15, №2 - 100*20*15, №3 - 100*20*10, №4 - 100*20*10, №5 - 50*20*15, №6 - 50*20*15, №7 - 50*20*10, №8 - 50*20*10, №9 - 100*20*15, №10 - 100*20*10, №11 - 50*20*15, №12 - 50*20*10*

Рисунок 4.13 - Типы и размеры используемых образцов (мм)



1 – на опорных участках, 2 - на участках над пазом (отверстием)

Рисунок 4.14 - Схемы измерения микротвердости

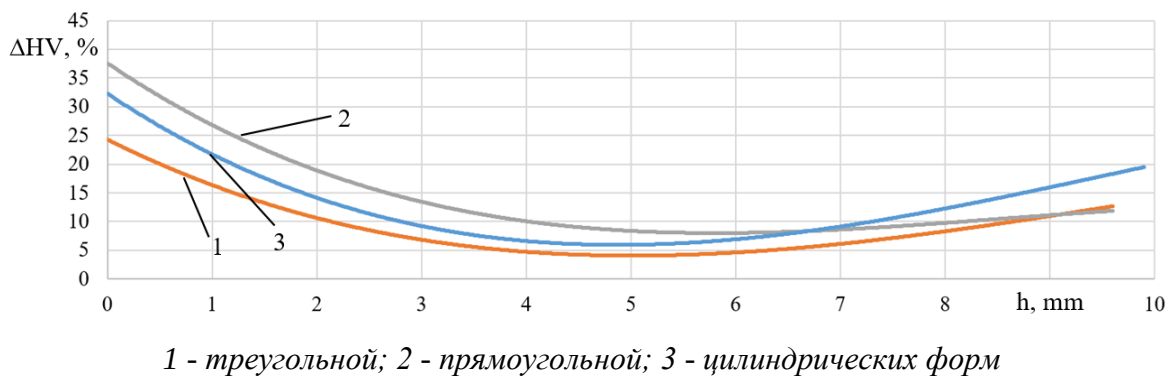


Рисунок 4.15 - Распределение степени упрочнения ΔH по глубине h поверхностного слоя у образцов

Анализ полученных данных показал, что в образцах треугольной формы получена минимальная степень упрочнения лицевой стороны – 25%, при этом степень упрочнения материала опорной поверхности составляет 12%. Для образцов цилиндрической формы степень упрочнения лицевой стороны составляет 32%, а опорной – 20%. Значения ΔH , полученные на опорной стороне, являются наибольшими среди рассматриваемых типов образцов. Степень упрочнения 37% материала лицевой стороны образцов прямоугольной формы, является максимальной среди исследуемых типов образцов. Степень упрочнения $\Delta H=12\%$ опорной стороны прямоугольных образцов соответствует аналогичным значениям для образцов треугольной формы.

Влияние внутренних полостей в образце на характер ВДУ

Исследование микротвердости всех типов упрочненных образцов с внутренними полостями установило их полное (сквозное) упрочнение. Для наглядности результаты упрочнения, полученные при аналогичных режимах ВДУ для образцов с полостями ($\Delta H_{\text{п}}$) и без них (ΔH), сравнивались между собой в виде отношения ($\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$). Рассчитанная таким образом количественная оценка эффективности упрочнения ($\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$) образцов с полостями представлена на рисунках 4.14 и 4.15.

Упрочнение образцов длиной 100 мм и толщиной 15 мм из стали 45 с прямоугольным пазом (рисунок 4.16, №2) по сравнению с формой паза в виде полуцилиндра (рисунок 4.16, №1) привело к незначительному снижению

отношения ($\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$) с 1,9 до 1,8 на опорной части, и с 1,8 до 1,7 на участках над пазом. Уменьшение толщины с 15 (рисунок 4.16, №2) до 10 мм (рисунок 4.16, №4) у образцов с прямоугольной формой паза не повлияло на изменение отношения ($\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$). А вот на образцах с формой паза в виде полуцилиндра уменьшение толщины с 15 (рисунок 4.16, №1) до 10 мм (рисунок 4.16, №3) привело к снижению $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ с 1,8 до 1,4 на опорной части, и с 1,7 до 1,4 на участке над пазом.

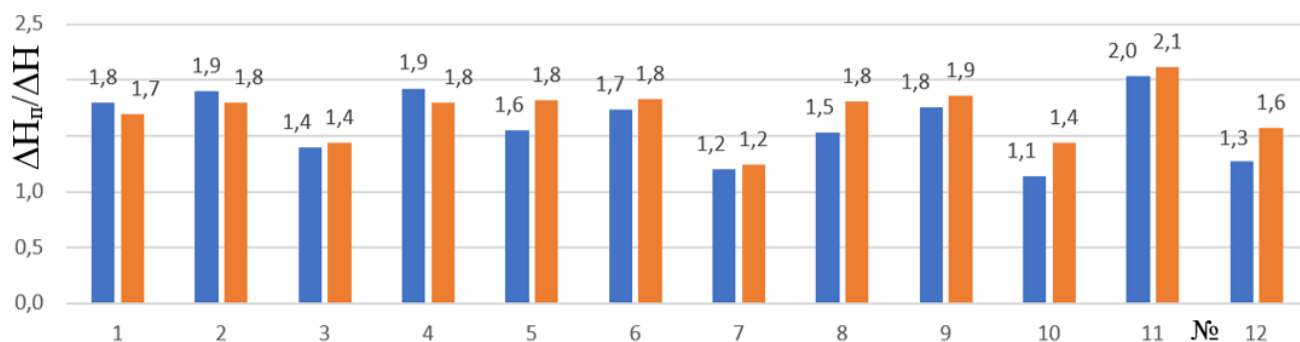


Рисунок 4.16 - Отношение $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части (маркер синего цвета) и участке над пазом (отверстием) (маркер оранжевого цвета) для образцов из стали 45: с прямоугольной формой паза (№ 2. 100*20*15 мм, №4. 100*20*10 мм, №6. 50*20*15 мм, №8. 50*20*10 мм); с формой паза в виде полуцилиндра (№1. 100*20*15 мм, №3. 100*20*10 мм, №5. 50*20*15 мм, №7. 50*20*10 мм); со сквозными отверстиями (№9. 100*20*15 мм, №10. 100*20*10 мм, №11. 50*20*15 мм, №12. 50*20*10 мм)

Уменьшение длины образцов со 100 (рисунок 4.16, №2) до 50 мм (рисунок 4.16, №6), толщиной 15 мм с прямоугольной формой паза, привело к снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 1,9 до 1,7, оставив при этом значение $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ неизменным на участках над пазом. Соответственно, в образцах с формой паза в виде полукруга (рисунок 4.16, №1, №5) в опорной части значение $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ уменьшилось с 1,8 до 1,6, а на участках над пазом выросло с 1,7 до 1,8. При ВДУ образцов длиной 50 мм и толщиной 15 мм, рассматриваемые формы полости (рисунок 4.16, №5, №6) практически не повлияли на результат упрочнения, а полученные отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части составили 1,6 – 1,7, а на участке

над пазами 1,8. Уменьшение толщины у образцов длиной 50 мм с 15 (рисунок 4.16, №6) до 10 мм (рисунок 4.16, №8) привело к тому, что у образцов с прямоугольным пазом наблюдалось снижение отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 1,7 до 1,5, а на участке над полостью $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ не изменилось и составило 1,8. Наличие формы паза в виде полуцилиндра, с уменьшением толщины с 15 (рисунок 4.16, №5) до 10 мм (рисунок 4.16, №7), привело к значительному снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 1,6 до 1,2, а на участке над пазом с 1,8 до 1,2.

Уменьшение толщины с 15 (рисунок 4.16, №9) до 10 мм (рисунок 4.16, №10) прямоугольных образцов длиной 100 мм, с отверстиями в боковой части, привело к снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 1,8 до 1,1, а на участке над отверстиями с 1,9 до 1,4. Расположение отверстий на образцах длиной 50 мм, с уменьшением их длины с 15 (рисунок 4.16, №11) до 10 мм (рисунок 4.16, №12) привело к снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2 до 1,3, а на участке над отверстиями с 2,1 до 1,6. При этом у образцов с отверстиями с уменьшением их длины со 100 (рисунок 4.16, №10) до 50 мм (рисунок 4.16, №12), при толщине 10 мм наблюдался рост отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 1,1 до 1,3, а на участке над отверстиями с 1,4 до 1,6. А при толщине 15 мм с 1,8 до 2 и с 1,9 до 2,1, соответственно (рисунок 4.16, №9, №11).

Из-за особенностей ВДУ, за счет преломления и отражения волн деформации в образцах, участки под отверстиями так же удалось упрочнить. Так отношение $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ в участках под отверстиями образцов из стали 45 длиной 100 мм и толщиной 15 и 10 мм составило 1,4 и 1,2. А у образцов длиной 50 мм и толщинами 15 и 10 мм получены $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ 1,6 и 1,9, соответственно.

В случае ВДУ образцов из бронзы БРАЖ 9-4 длиной 100 мм и толщиной 15 мм, изменение форм полости с прямоугольной (рисунок 4.17, №2) на полуцилиндрическую (рисунок 4.17, №1) привело к незначительному росту отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2,6 до 2,7 и снижению $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на участке над пазом с 3,2 до 3,1. Уменьшение толщины образцов с 15 (рисунок 4.17, №2) до 10 мм (рисунок 4.17, №4) с прямоугольной формой паза привело к снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2,6 до 1,8, а на участках над пазом с 3,2 до

1,7. А вот на образцах с формой паза в виде полуцилиндра уменьшение толщины с 15 (рисунок 4.17, №1) до 10 мм (рисунок 4.17, №3) привело к снижению $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ с 2,7 до 1,5 на опорной части, и с 3,1 до 1,5 на участке над пазом.

Уменьшение длины образцов со 100 (рисунок рисунок 4.17, №2) до 50 мм (рисунок рисунок 4.17, №6) толщиной 15 мм с прямоугольной формой паза привело к незначительному росту отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2,6 до 2,7 и снижению $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на участках над пазом с 3,2 до 3,1 мм.

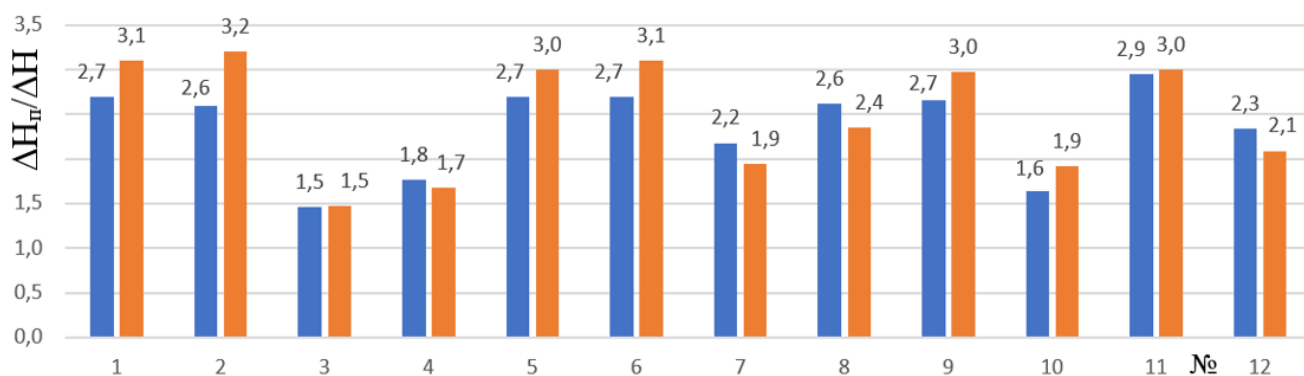


Рисунок 4.17 - Отношение $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части (маркер синего цвета) и участке над пазом (отверстием) (маркер оранжевого цвета) для образцов из Бронзы БРАЖ 9-4: с прямоугольной формой паза (№2. 100*20*15 мм, №4. 100*20*10 мм, №6. 50*20*15 мм, №8. 50*20*10 мм); с формой паза в виде полуцилиндра (№1. 100*20*15 мм, №3. 100*20*10 мм, №5. 50*20*15 мм, №7. 50*20*10 мм); со сквозными отверстиями (№9. 100*20*15 мм, №10. 100*20*10 мм, №11. 50*20*15 мм, №12. 50*20*10 мм)

Соответственно, в образцах с формой паза в виде полуцилиндра (рисунок 4.17, №1, №5) в опорной части значение $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ осталось неизменным – 2,7, а на участках над пазом снизилось с 3,1 до 3. При ВДУ образцов длиной 50 мм и толщиной 15 мм, рассматриваемые формы полости (рисунок 4.17, №5, №6) практически не повлияли на результат упрочнения, а полученные отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части составили 2,7, а на участке над пазами 3-3,1. Уменьшение толщины образцов длиной 50 мм с 15 (рисунок 4.17, №6) до 10 мм (рисунок 4.17, №8) привело к тому, что у образцов с прямоугольным пазом наблюдалось небольшое снижение отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2,7 до 2,6, а на участке над полостью $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$

с 3,1 до 2,4. Наличие формы паза в виде полуцилиндра с уменьшением толщины с 15 (рисунок 4.17, №5) до 10 мм (рисунок 4.17, №7) привело к значительному снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2,7 до 2,2, а на участке над пазом с 3 до 1,9.

Уменьшение толщины с 15 (рисунок 4.17, №9) до 10 мм (рисунок 4.17, №10) прямоугольных образцов длиной 100 мм, с отверстиями в боковой части, привело к снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2,7 до 1,6, а на участке над отверстиями с 3 до 1,9. Расположение отверстий на образцах длиной 50 мм, с уменьшением их длины с 15 (рисунок 4.17, №11) до 10 мм (рисунок 4.17, №12), привело к снижению отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 2,9 до 2,3, а на участке над отверстиями с 3 до 2,1. При этом у образцов с отверстиями, с уменьшением их длины со 100 (рисунок 4.17, №10) до 50 мм (рисунок 4.17, №12), при толщине 10 мм, наблюдался рост отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части с 1,6 до 2,3, а на участке над отверстиями с 1,9 до 2,1. А при толщине 15 мм отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ на опорной части выросло с 2,7 до 2,9, а на участке над отверстиями осталось неизменным - 3 (рисунок 4.17, №9, №11).

Отношения $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ в участках под отверстиями в образцах из бронзы длиной 100 мм и толщиной 15 и 10 мм составили 1,2 и 1. А у образцов длиной 50 мм и толщиной 15 и 10 мм получены $\Delta H_{\text{п}}/\Delta H$ 1,1 и 1,2, соответственно.

В результате исследований установлено, что:

- при одинаковых объемах и толщинах, обрабатываемых ВДУ образцов из различных материалов, образцы прямоугольной формы принимают большую степень упрочнения по сравнению с треугольными и цилиндрическими.
- наличие пазов или отверстий в прямоугольных образцах способствует повышению степени упрочнения при ВДУ.
- рост толщины и уменьшение длины образцов с отверстиями или пазами способствует увеличению степени упрочнения.
- возможность упрочнения материала, расположенного под отверстиями, за счет преломления и отражения волн деформации при ВДУ.

- образцы с пазами или отверстиями из бронзы БРАЖ 9-4 упрочняются эффективнее, чем образцы из стали 45 [30].

4.6 Исследование влияния ВДУ на изменение технологической наследственности в обрабатываемом изделии, упрочнение лицевой и тыльной сторон образца

4.6.1 Исследование влияния ВДУ на изменение технологической наследственности в обрабатываемом изделии

Условия эксперимента

В результате упрочнения стальных образцов волной деформации установлено, что при одинаковых режимах обработки могут формироваться различные эпюры микротвердости. Для выяснения причин и закономерностей этого явления во взаимосвязи с исходной структурной технологической наследственностью вырезались образцы из круглого проката (сталь 45) прямоугольной и цилиндрической формы толщиной 10 и 20 мм (рисунок 4.18 а, б). Использование круглого проката объясняется известностью направления волокон исходной наследственной структуры (рисунок 4.19, а). Одна часть вырезанных из круглого проката образцов была упрочнена таким образом, что волны деформации в процессе обработки проходили поперек волокон исходной наследственной структуры, а другая часть образцов – при прохождении волн деформации вдоль волокон. Все исследуемые образцы упрочнены волной деформации с одинаковыми режимами: энергия ударов 25 Дж; частота ударов 23,3 Гц; коэффициент перекрытия отпечатков $K=0,4$; инструмент – цилиндрический ролик шириной 7 мм и диаметром 10 мм.

Эффективность упрочнения материала волной деформации оценивалось по изменению эпюры микротвердости в поверхностном слое. Для исследований образцы разрезались по оси симметрии упрочненной дорожки в направлении подачи (рисунок 4.18).

На полученном шлифе в поперечном и продольном направлении с шагом 0,3 мм измерялась микротвердость алмазной пирамидкой по методу Виккерса

(рисунок 4.18, в). По результатам измерения микротвердости в программе Statistica строились эпюры её распределения в поверхностном слое.

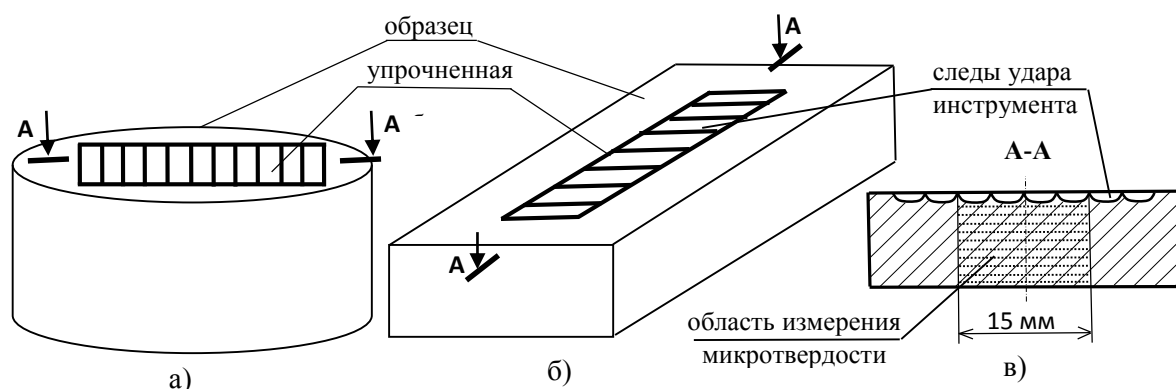


Рисунок 4.18 - Схемы исследуемых образцов

Результаты исследований

Эпюры микротвердости исходной структуры круглого проката представлены на рисунок 4.19. На эпюрах (рисунок 4.19, а) видны характерные для проката волокна, имеющие более высокую твердость по сравнению с основным металлом. На рисунок 4.19, б представлена эпюра микротвердости образца с поперечным расположением исходной волокнистой структуры, на рисунок 4.19, в – с продольным расположением волокон.

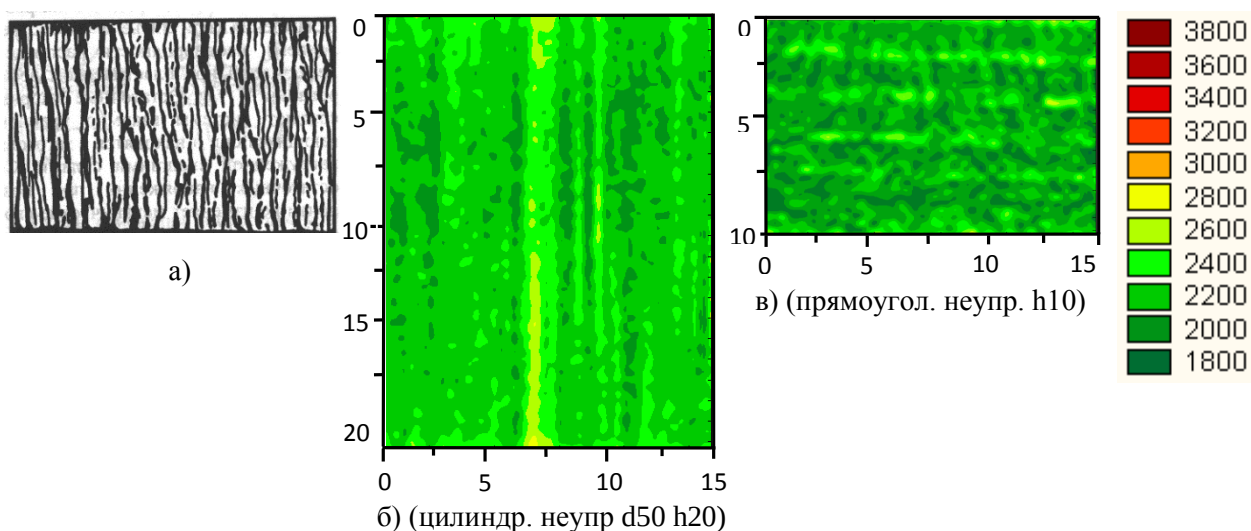


Рисунок 4.19 - а) Макроструктура металла после обработки давлением; б), в)

**Эпюры распределения микротвердости в неупрочненных образцах
цилиндрической и прямоугольной форм**

Эпюры микротвердости в образцах, упрочненных волной деформации вдоль и поперек исходной волокнистой структуры, представлены на рисунок 4.20. Анализ полученных эпюр показал, что в случае упрочнения образцов с продольным расположением наследственной волокнистой структуры (рисунок 4.20, в-е), волна деформации в силу анизотропии свойств исходного металла, распространяется по волокнам, как по совокупности стержней, охватывая все сечение образца.

Материал сильнее упрочняется вдоль волокон, однако, степень упрочнения относительно невелика. Только в поверхностном слое глубиной до 2,5 мм фрагментарно наблюдается степень упрочнения более 40%. Между волокнами и там, где волокнистая структура выражена слабее, степень упрочнения меньше – не более 20%.

В случае прохождения волны деформации поперек волокон (рисунок 4.20, а, б) степень упрочнения материала поверхностного слоя гораздо выше, а глубина существенно упрочненного слоя больше. Практически весь поверхностный слой на глубине 3 мм имеет степень упрочнения 50% и более. Чаще всего образец приобретает многослойную градиентно упрочненную структуру без ярко выраженных волокон. Наименее упрочненная зона формируется, как правило, в центре образца. Однако, при определенных условиях и режимах обработки волновое деформационное упрочнение способно полностью изменить унаследованную структуру – разбить волокна и сформировать пятнистую гетерогенно упрочненную структуру с чередующимися более твердыми и более вязкими областями (рисунок 4.21).

В этом случае наблюдается и более интенсивное увеличение эксплуатационных свойств материала. Следует отметить, что во всех случаях упрочняется поверхностный слой материала как с контактной, так и с противоположной стороны образца – за счет отраженных волн деформации.

В результате исследований установлено, что:

- установлено, что на эффективность волнового деформационного упрочнения сильное влияние оказывает технологическая наследственность – волокна, сформированные на стадии прокатки металла;

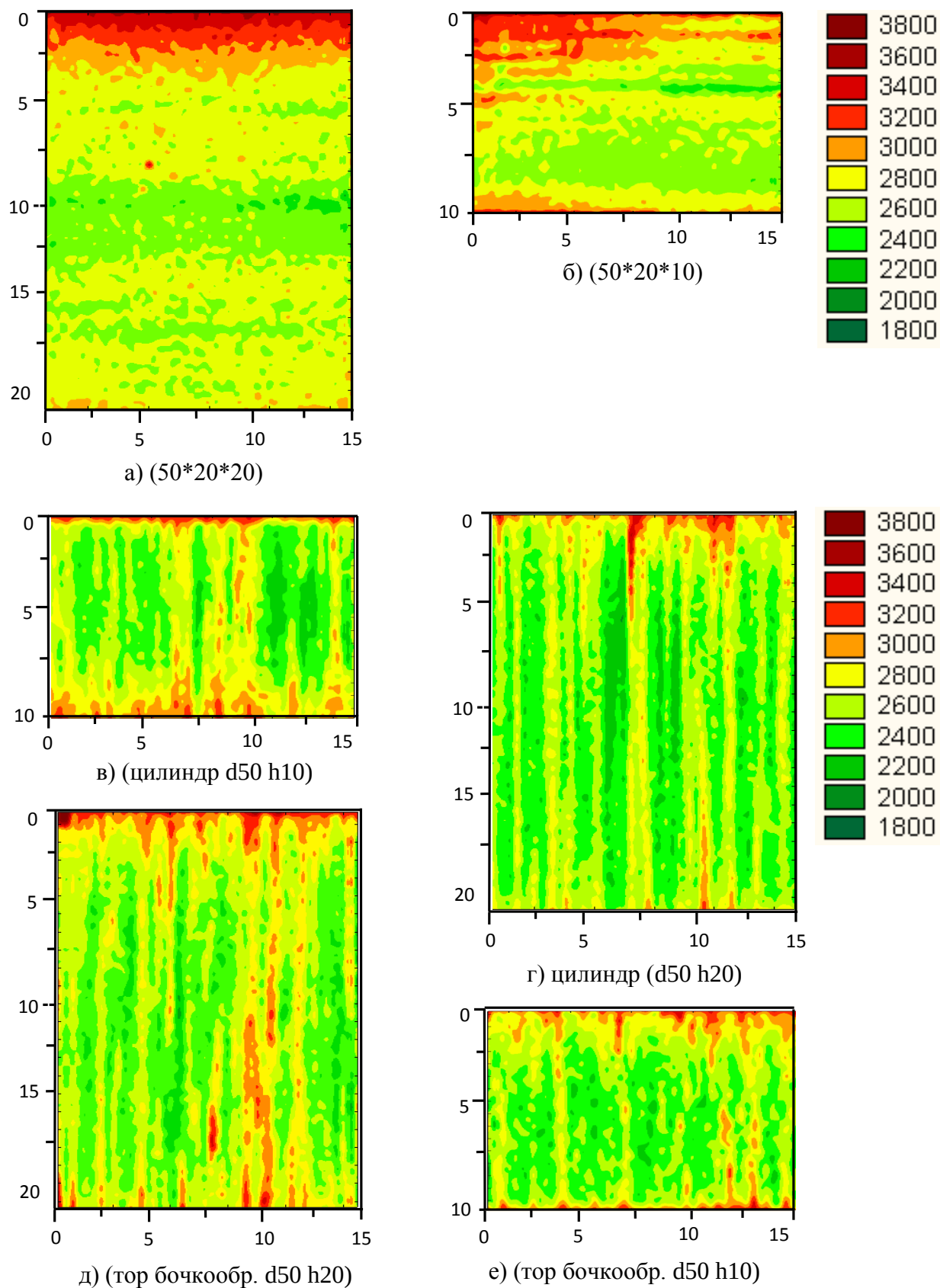


Рисунок 4.20 - Эпюры микротвердости после упрочнения материала волной деформации

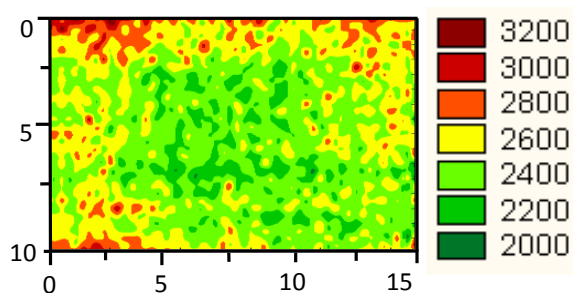


**Рисунок 4.21 - Получение волной деформации локальных чередований
твёрдо вязких областей в поверхностном слое**

- установлено, что для получения больших значений глубины и степени упрочнения поверхностного слоя волна деформации должна быть направлена поперек волокон исходной структуры;
- установлено, что для упрочнения всего образца, волна деформации должна направлена вдоль волокон исходной структуры;
- установлено, что при определенных условиях волна деформации может полностью изменить исходную волокнистую структуру и обеспечить чередование более твердых и более вязких локальных областей на значительной глубине поверхностного слоя или по всему сечению образца [17].

4.6.2 Исследование влияния ВДУ на упрочнение лицевой и тыльной сторон образца

Условия эксперимента

Для проведения исследований влияния материалов и размеров изделий на параметры упрочнения волной деформации использовались образцы длиной 50 и 100 мм, толщиной 10 и 20 мм и шириной 20 мм. В качестве материалов образцов использовались: сталь 45, титан ВТ 1-0, бронза БРАЖ 9-4, сплав алюминия Б-95. Выбор материалов обоснован широтой их применения при изготовлении изделий в машиностроении. Упрочнение ВДУ проводилось при энергии удара 70 Дж, с коэффициентом, обеспечивающим равномерность перекрытия отпечатков ударов инструмента равным 0,4. Упрочнение образцов проводилось на специально

разработанном стенде для исследования процессов волнового деформационного упрочнения (рисунок 2.12) [209]. В качестве инструмента для ВДУ применялся стержневой ролик диаметром 25 мм и шириной 30 мм. В ударной системе использовался боек длиной 450 мм и диаметром 45 мм, обеспечивающим соотношение длин бойка и волновода 3:1. Эффективность упрочнения оценивалась по карте микротвердости поверхностного слоя. Для её построения образец разрезался поперек упрочненной области, затем в сечении измерялась микротвердость на автоматическом твердомере.

Результаты исследований

Ранее установлено, что при ВДУ упрочняется не только контактная (лицевая) сторона обрабатываемого образца, но и на его противоположная тыльная часть, при этом сердцевина образца остается неупрочненной. Вследствие этого, карта микротвердости строилась для всего сечения упрочненного образца.

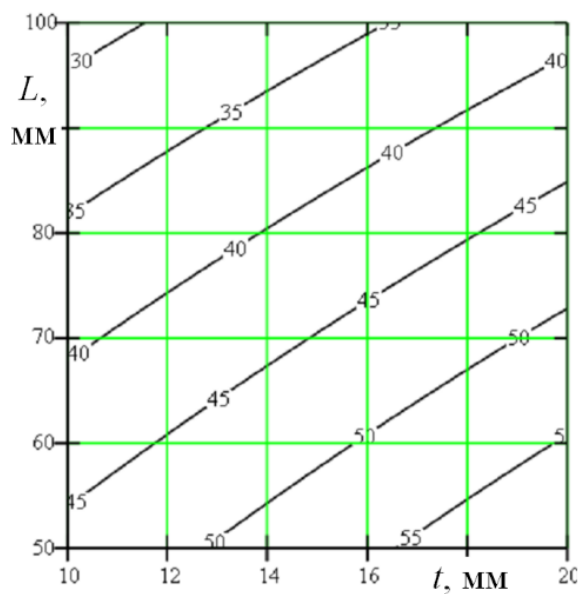
Результаты исследований влияния материала и размеров изделий на параметры упрочнения (степень ΔH_μ и глубину h_μ упрочнения) волной деформации представлены на рисунках 4.21 – 4.24.

Из рисунков видно, что результаты ВДУ зависят от размеров обрабатываемых образцов. Увеличение длины образцов с 50 до 100 мм сопровождается снижением степени (ΔH_μ) и глубины (h_μ) упрочнения:

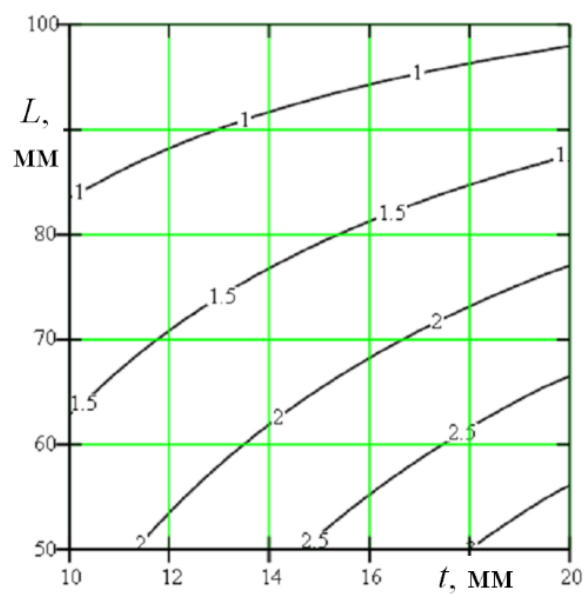
- для образцов из стали 45 толщиной (t) 10 мм (рисунок 4.21) степень упрочнения поверхностного слоя лицевой стороны снижается на 38%, а глубина упрочнения - на 66%, при $t=20$ мм на 35 и 73%, соответственно. Степень упрочнения тыльной стороны образца также снизилась для $t=10$ мм на 47%, а глубина упрочненного слоя - на 87%, для $t=20$ мм соответственно ΔH_μ на 10%, h_μ на 80%.

- для образцов из бронзы БРАЖ 9-4 толщиной (t) 10 мм (рисунок 4.22) степень упрочнения поверхностного слоя лицевой стороны снижается на 47%, а глубина упрочненного слоя - на 87%, для $t=20$ мм на 10 и 80%, соответственно. Степень упрочнения тыльной стороны образца также снизилась для $t=10$ мм на

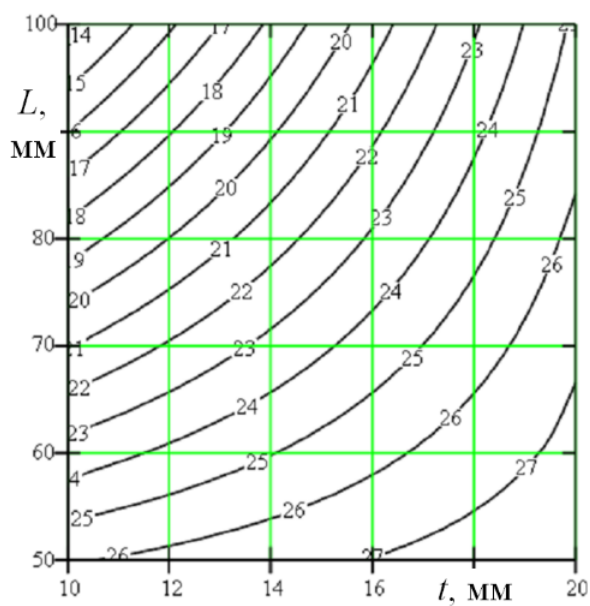
73%, а глубина упрочненного слоя - на 70%, для $t=20$ мм соответственно ΔH_μ на 59%, h_μ на 68%.



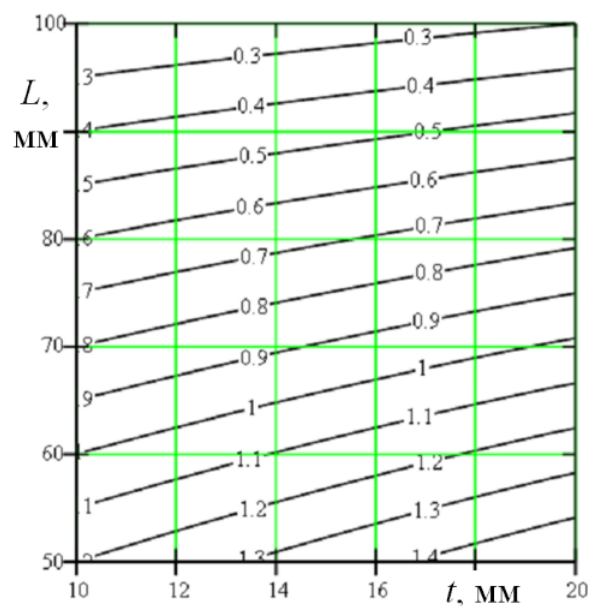
а)



б)



в)



г)

а, б - лицевая; в, г - тыльная стороны образца

Рисунок 4.21 - Зависимость степени (%) - (а, в) и глубины (мм) - (б, г) упрочнения от длины (L) и толщины образца (t) из стали 45 при ВДУ

- для образцов из титана ВТ 1-0 толщиной (t) 10 мм (рисунок 4.23) степень упрочнения поверхностного слоя лицевой стороны снижается на 14%, а глубина упрочнения - на 30%, при $t=20$ мм на 31 и 33%, соответственно.

Степень упрочнения тыльной стороны образца также снизилась для $t=10$ мм на 25%, а глубина упрочненного слоя - на 43%, для $t=20$ мм соответственно ΔH_{μ} на 64%, h_{μ} на 50%.

- для образцов из сплава алюминия Б-95 толщиной (t) 10 мм (рисунок 4.24) степень упрочнения поверхностного слоя лицевой стороны снижается на 55%, а глубина упрочнения - на 50%, при $t=20$ мм на 28 и 68%, соответственно. Степень упрочнения тыльной стороны образца также снизилась для $t=10$ мм на 52%, а глубина упрочненного слоя - на 30 %, для $t=20$ мм соответственно ΔH_{μ} на 22%, h_{μ} на 43%.

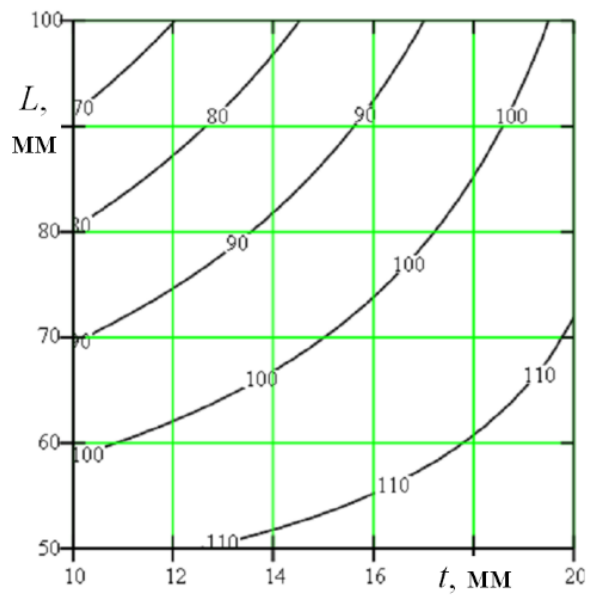
На основании результатов проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Подтвержден факт упрочнения при ВДУ не только с лицевой, но и с тыльной стороны образца, при этом сердцевина образца сохраняет исходную твердость материала.

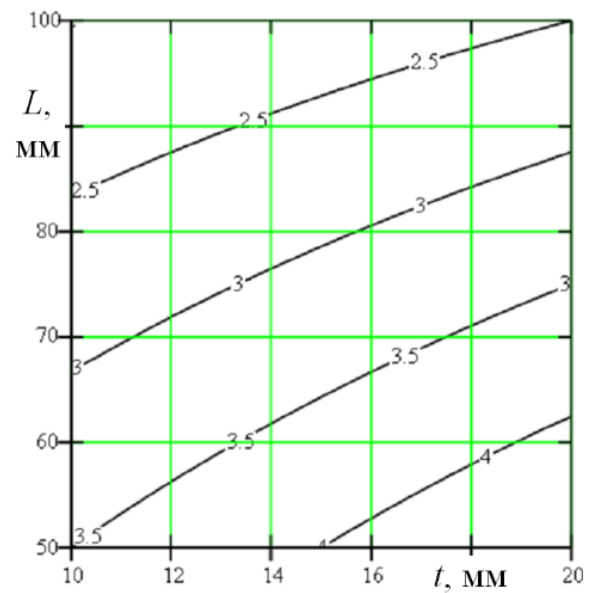
2. Установлено, что увеличение длины обрабатываемого ВДУ образца сопровождается снижением степени и глубины упрочнения как лицевой, так тыльной стороны, причем степень снижения этих показателей зависит от марки обрабатываемого материала.

3. Установлено, что увеличение толщины обрабатываемого ВДУ образца сопровождается ростом степени и глубины упрочнения как лицевой, так тыльной стороны, причем степень возрастания этих показателей зависит от марки обрабатываемого материала.

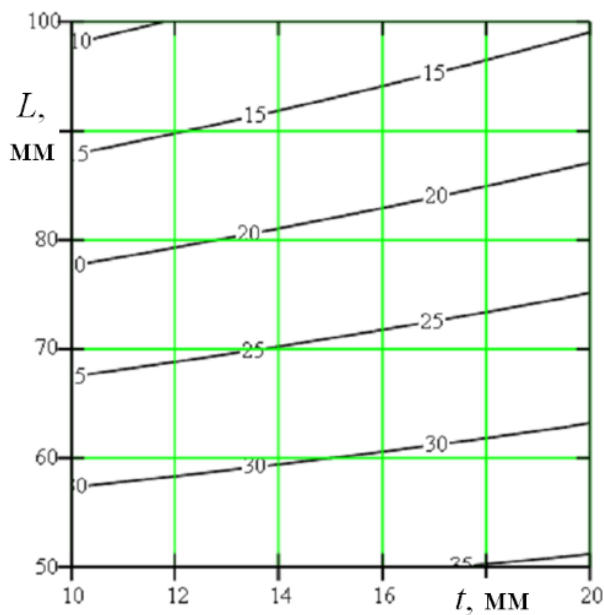
4. Наибольшая чувствительность параметров упрочнения поверхностного слоя характерна для образцов из стали 45 и сплава алюминия Б-95, наименьшая – для бронзы БРАЖ 9-4 и титанового сплава ВТ 1-0 [70].



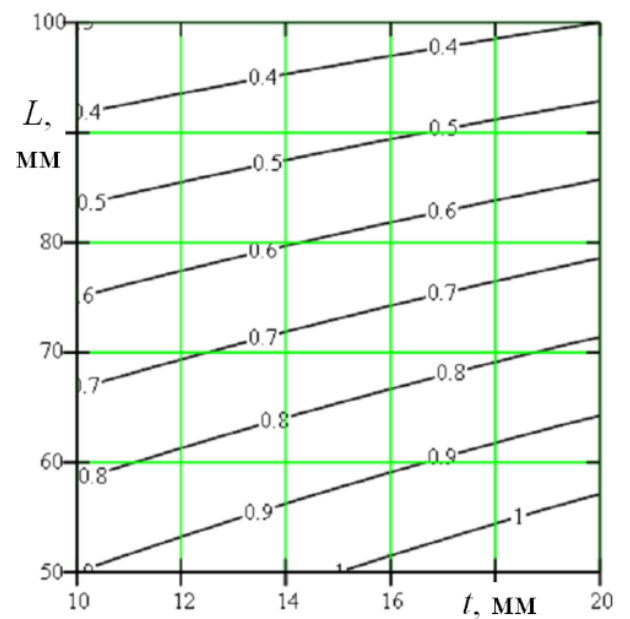
а)



б)



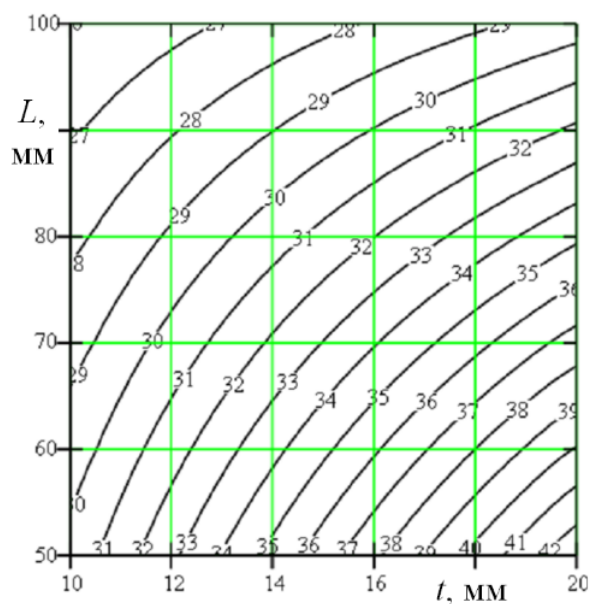
в)



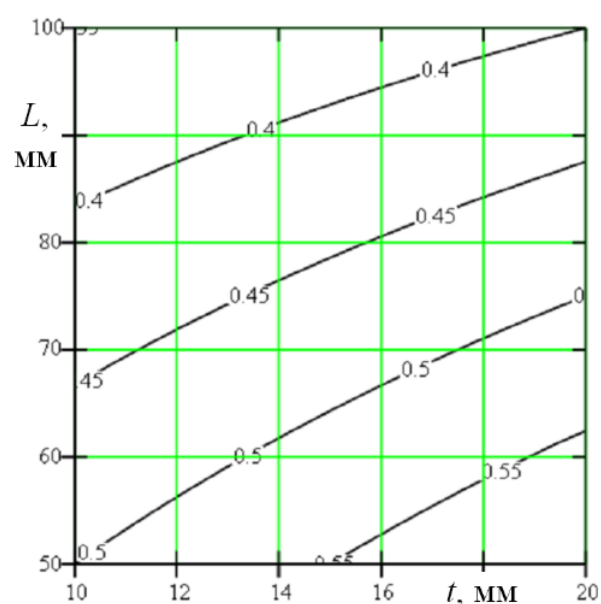
г)

а, б - лицевая; в, г - тыльная стороны образца

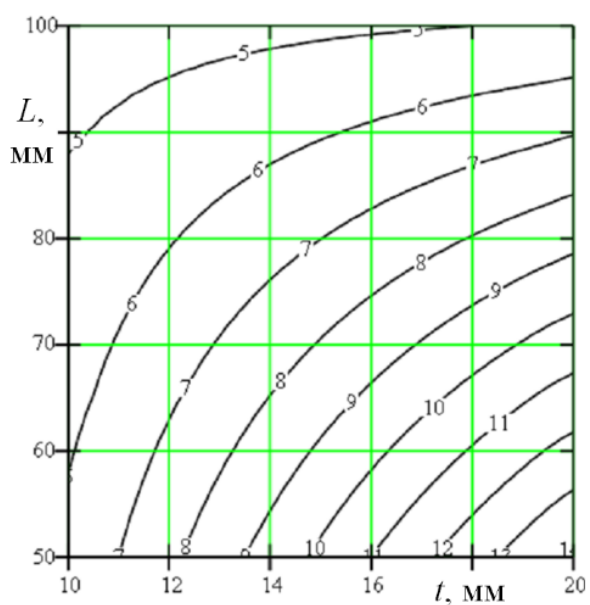
Рисунок 4.22 - Зависимость степени (%) - (а, в) и глубины (мм) - (б, г) упрочнения от длины (L) и толщины образца (t) из бронзы БРАЖ 9-4 при ВДУ



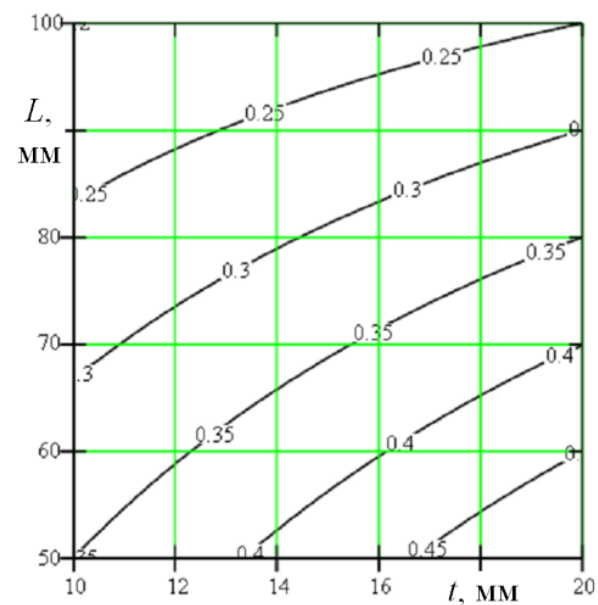
а)



б)



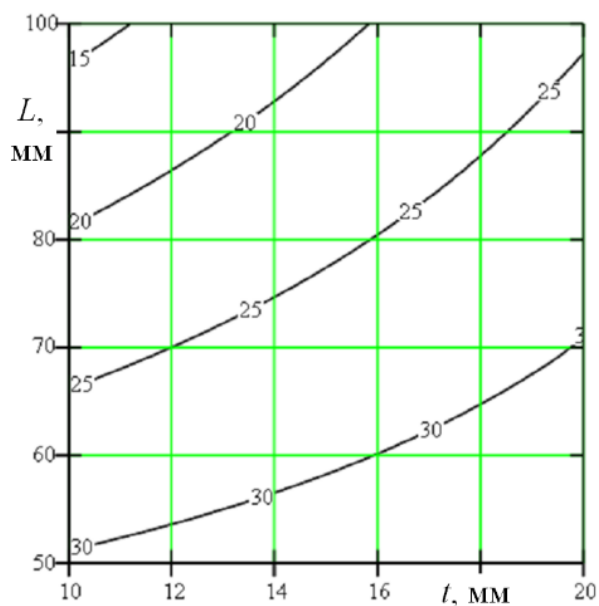
в)



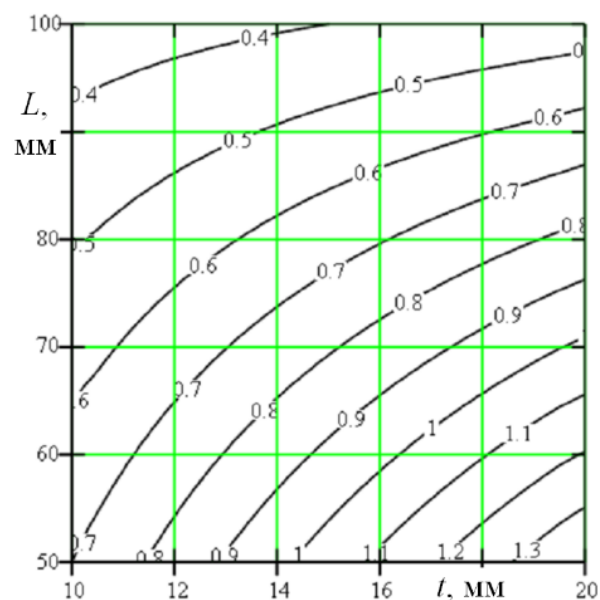
г)

а, б - лицевая; в, г - тыльная стороны образца

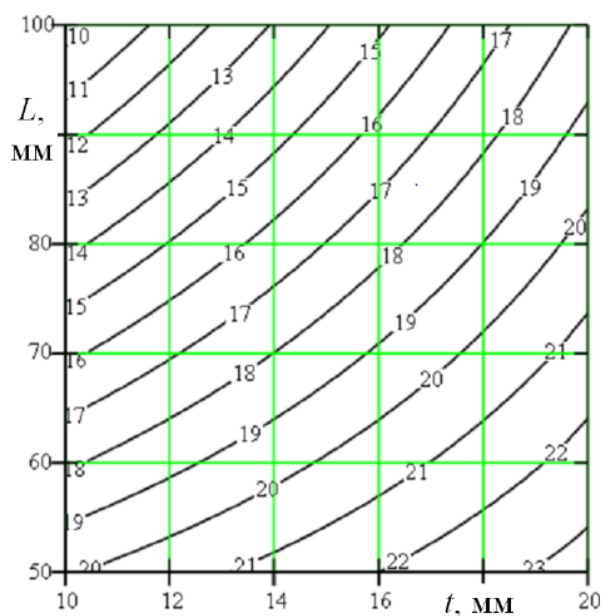
Рисунок 4.23 - Зависимость степени (%) - (а, в) и глубины (мм) - (б, г) упрочнения от длины (L) и толщины образца (t) из титана ВТ-1-0 при ВДУ



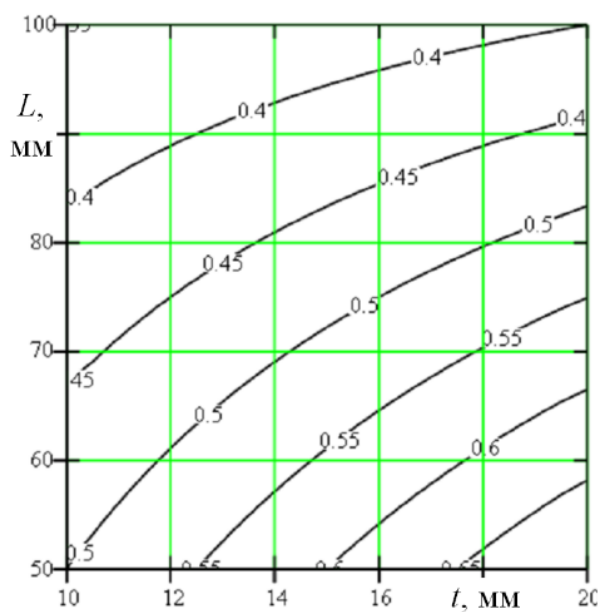
а)



б)



в)



г)

а, б - лицевая; в, г - тыльная стороны образца

Рисунок 4.24 - Зависимость степени (%) - (а, в) и глубины (мм) - (б, г) упрочнения от длины (L) и толщины образца (t) из сплава алюминия Б-95 при ВДУ

4.7 Исследование влияния волновых процессов на микроструктуру и прочность

В ходе проведенных исследований установлены особенности воздействия волн деформации на среды с разной акустической жесткостью. Однако не маловажным является установление влияния волновых процессов на изменения микроструктуры и прочности в обрабатываемом ВДУ материале. Целью проводимых экспериментов является установить влияние режимов ВДУ на изменение микроструктуры и прочности, на примере упрочняемых образцов из нескольких видов сталей.

4.7.1 Исследование влияния упрочнения волной деформации на прочность сталей 45, 40X, 35ХГСА

Для проведения исследований влияния упрочнения волной деформации на прочность использовались плоские образцы из сталей 45, 40X и 35ХГСА толщиной 7мм. Упрочнение проводилось с равномерностью $0,2 < K < 0,9$. В качестве инструмента использовался стержневой ролик шириной и диаметром 10 мм. Удары наносились с энергией 25 Дж. Исследования прочностных свойств выполнялись как на образцах, упрочненных только с одной стороны (с контактной), так и на образцах, упрочненных с двух сторон (с контактной и опорной). Прочностные характеристики исследуемых образцов определялись на универсальной электромеханической машине WDW100E [28, 113].

Также, проводились исследования, устанавливающие влияние на прочностные свойства направлений расположения отпечатков ударов инструмента (стержневого ролика) в поверхностном слое (рисунок 4.25). Исследовалось влияние на прочностные свойства четырех типов расположения отпечатков инструмента, полученных при одинаковых режимах упрочнения. Различие между типами нанесения отпечатков заключалось в их расположении в поверхностном слое относительно оси симметрии упрочняемого образца.

В результате прочностных испытаний было установлено, что за счет нанесения отпечатков по типу 1 и 2 (рисунок 4.26), удалось повысить предел прочности материала на 4-5%.

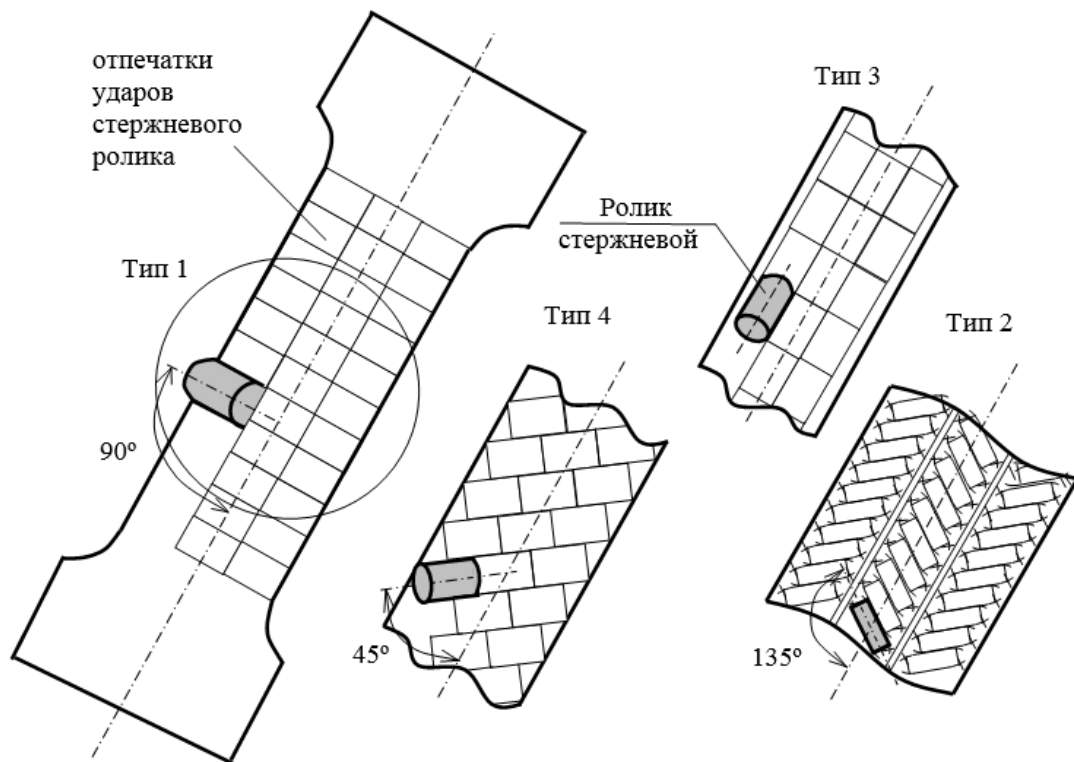


Рисунок 4.25 - Типы направлений расположения отпечатков ударов инструмента (стержневого ролика) в поверхностном слое образцов из стали 45, упрочненных с перекрытием $K=0,4$ [28, 113]

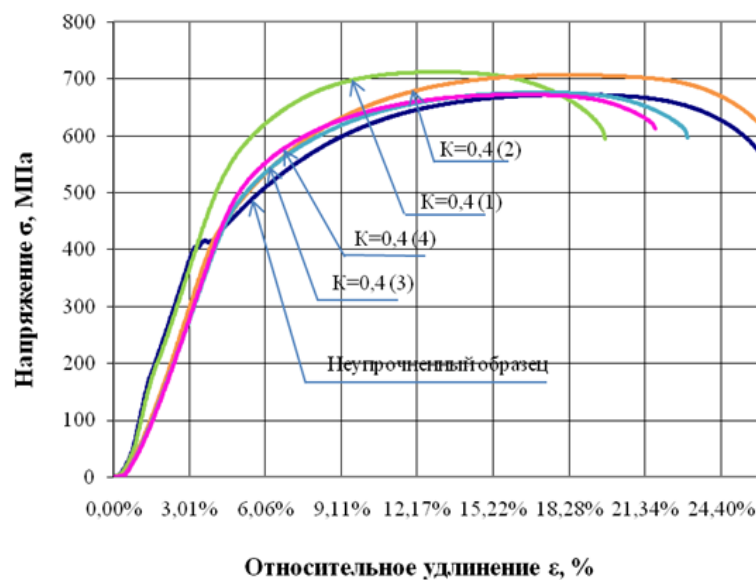


Рисунок 4.26 - Диаграмма растяжения образцов из стали 45, упрочненных с перекрытием $K=0,4$, для различных типов нанесения отпечатков ударов инструмента, при упрочнении относительно направления его подачи [28, 113]

Расположение отпечатков по типу 1, в отличие от типа 2, позволило получить в образцах, при сравнительно равных величинах пределов прочности, большие значения предела текучести. Поэтому, в дальнейшем, применяется нанесение отпечатков по типу 1, для упрочнения всех образцов [28, 113].

Так, в результате одностороннего упрочнения волной деформации стали 45 наибольшее значение повышения предела прочности - 8% (рисунок 4.27) достигнуто при $K=0,7$, при этом предел текучести повысился на 43%, а пластичность уменьшилась на 37%, по сравнению с неупрочненными образцами. Также установлено, что при упрочнении стали 45 с увеличением коэффициента перекрытия с 0,1 до 0,7 предел прочности увеличивается от 2,6 до 8%, пластичность снижается на 37%, а предел текучести повышается с 8,6 до 43%.

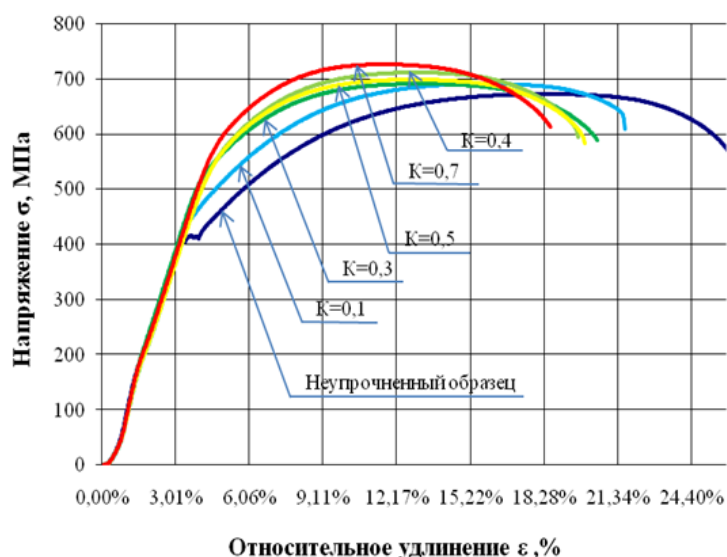
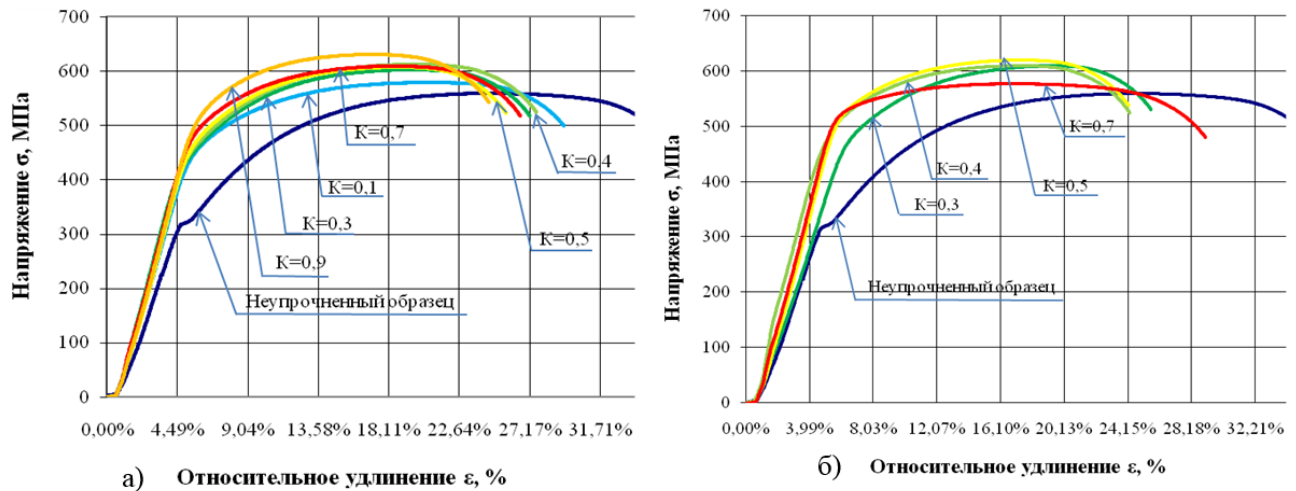


Рисунок 4.27 - Диаграмма растяжения образцов из стали 45, упрочненных волной деформации с различным коэффициентом перекрытия отпечатков (K)

При одностороннем упрочнении стали 40Х наибольшее значение повышения предела прочности - 13% (рисунок 4.28, а) достигнуто при $K=0,9$, при этом предел текучести повысился на 81%, а пластичность уменьшилась на 38%, по сравнению с неупрочненными образцами. При упрочнении образцов из стали 40Х с увеличением коэффициента перекрытия K от 0,1 до 0,9 предел прочности

повысился с 3,5 до 13%, пластичность уменьшилась на 38%, а предел текучести увеличился с 39 до 81% [28, 113].



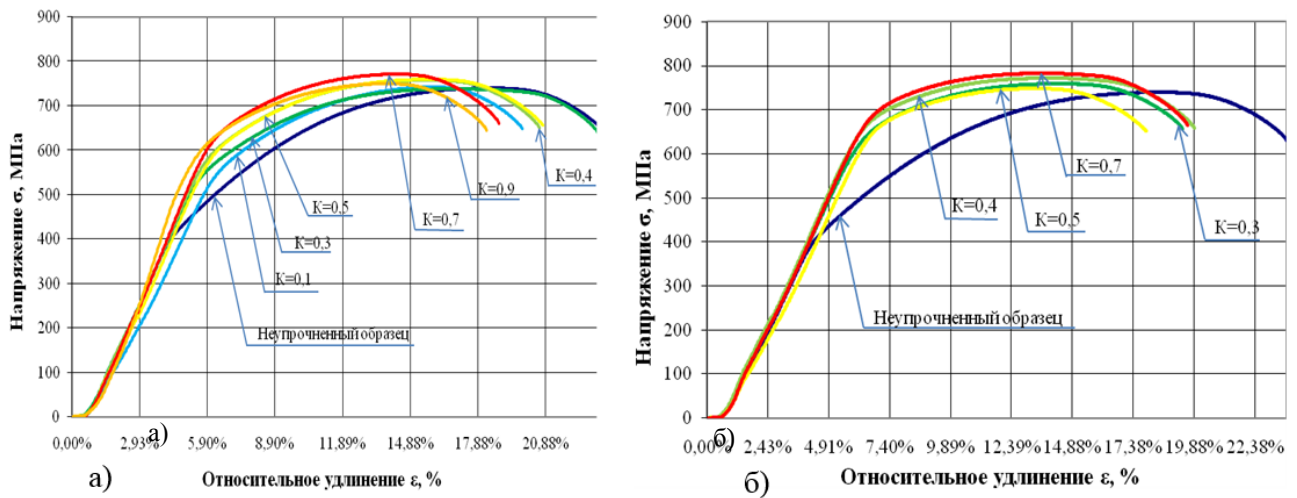
а - с контактной стороны; б - с контактной и опорной стороны

Рисунок 4.28 - Диаграмма растяжения образцов из стали 40Х, упрочненных с различным перекрытием (K)

При двухсторонней обработке (рисунок 4.28, б) у образцов из стали 40Х, упрочненных с коэффициентом перекрытия K от 0,3 до 0,5, значения пределов прочности, пластичности, текучести практически не изменились, по сравнению с односторонним упрочнением. Это связано с тем, что уже на стадии односторонней обработки, исследуемые образцы, из стали 40Х (толщиной 7 мм) были упрочнены насквозь. Поэтому, двухстороннее упрочнение не повлияло на предел прочности. На образцах с $K=0,7$, при двухстороннем упрочнении, в связи с перенаклёпом, наблюдалось снижение предела прочности на 6,5%, по сравнению с односторонней обработкой [28, 113].

Одностороннее упрочнение стали 35ХГСА волной деформации позволило добиться повышения предела прочности лишь на 5,8% (рисунок 4.29, а) при $K=0,7$, при этом предел текучести удалось повысить на 51%, а пластичность в результате уменьшилась на 28% по сравнению с неупрочненными образцами. При упрочнении стали 35ХГСА увеличение коэффициента перекрытия с 0,1 до 0,7 приводит к увеличению: предела прочности с 0,4 до 5,8%, предела текучести с 39 до 51% и уменьшению пластичности на 28%, по сравнению с неупрочненными образцами. У

образца с $K=0,9$, по сравнению с $K=0,7$, наблюдается уменьшение предела прочности и пластичности из-за перенаклёпа.



а - с контактной стороны; б - с контактной и опорной стороны

Рисунок 4.29 - Диаграмма растяжения образцов из стали 35ХГСА, упрочненных с различным перекрытием (K)

В отличие от стали 40Х, сталь 35ХГСА имеет на 50% больший предел текучести, поэтому она может выдерживать большие нагрузки. Это позволило достичь, при двухстороннем упрочнении, с изменением коэффициента перекрытия с 0,3 до 0,7, роста предела прочности с 2 до 2,8%, предела текучести с 15,3% до 20% и уменьшения пластичности на 14%, по сравнению с односторонней обработкой (рисунок 4.29, б) [28, 113].

Таким образом, в результате исследований установлено, что:

- при одинаковых режимах упрочнения волной деформации за счет расположения отпечатков инструмента, по типу 1, можно повысить предел прочности материала на 5%;
- за счет применения упрочнения волной деформации образцов только с одной стороны (с контактной) из сталей 45, 40Х, 35ХГСА возможно увеличить, соответственно, предел прочности на 8, 13 и 5,8%, предел текучести - на 37, 81 и 51%;

- в зависимости от материала и толщины стенки образца, необходимо принимать решение о том, какое должно быть упрочнение: одностороннее или двухстороннее. Так, например, для образцов из стали 40Х, толщиной 7 мм, создавать большую глубину упрочнения за счет двухсторонней обработки не эффективно, так как они, при односторонней обработке, упрочнялись насквозь. Для стали 35ХГСА, наоборот, из-за ее меньшей склонности к упрочнению пластическим деформированием, ее двухсторонняя обработка привела к росту предела прочности на 2,8%, предела текучести на 20%, по сравнению с односторонней обработкой [28, 113]

4.7.2 Исследование влияния ВДУ на изменение микроструктуры

В проведенных исследованиях микроструктуры поверхностного слоя, упрочненных ВДУ образцов из сталей 45, 40Х, 35ХГСА, получены следующие результаты. При микроструктурных исследованиях в поверхностном слое стали 45, с увеличением равномерности с $K=0,1$ до $K=0,9$ происходит уменьшение толщины слоя с микроструктурными изменениями с 200 мкм до 66 мкм. В данном слое можно выделить несколько зон. Так, при $K=0,1$ в поверхностной зоне толщиной 100 мкм наблюдается разворот на 90° ферритных зерен. Утонение ферритных оболочек перлитных колоний и выдавливание феррита приводит к слиянию целых перлитных зерен и образованию нитевидных структур. В зоне, расположенной на глубине с 100 мкм до 203 мкм установлено протекание процесса текстурирования поверхностного слоя, характеризующегося образованием под углом $40-45^\circ$ волокнистой структуры в виде чередования прослоек феррита и перлита. При $K=0,4$ в поверхностной зоне толщиной до 70 мкм установлено дробление ферритных оболочек на зернистые (глобулярные) структуры (рисунок 4.30). В зоне, расположенной на глубине с 70 мкм до 142 мкм установлено образование волокнистой структуры, расположенной под углом 38° (рисунок 4.31). При $K=0,7$ видимые структурные изменения происходят на меньшей глубине 66 мкм – 93 мкм по сравнению с образцами, упрочненными с $K=0,1$ и $K=0,4$ [112].

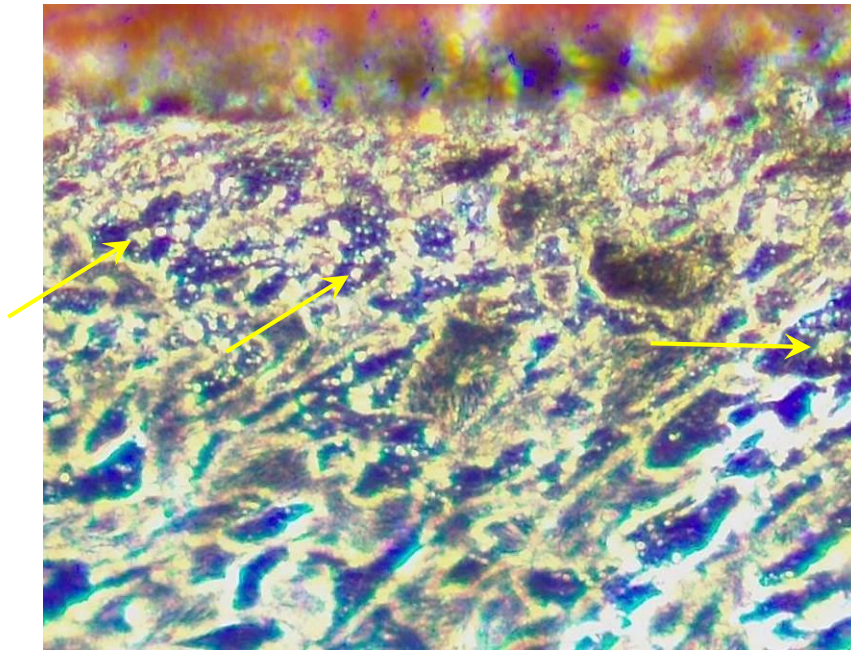


Рисунок 4.30 - Зернистый (глобулярный) феррит (сталь 45, $K=0,4$), $\times 1680$ [112]

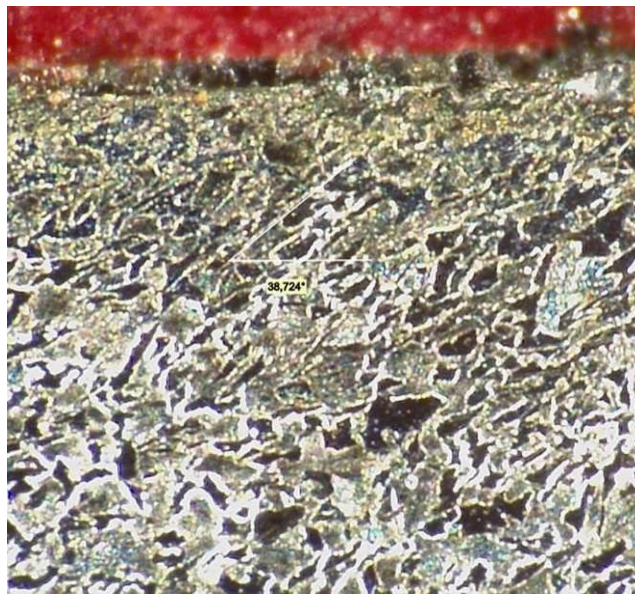


Рисунок 4.31 - Текстурирование упрочненного слоя образца из стали 45, с $K=0,4$, $\times 500$

В этой области установлено начало разрушения зерен перлита и феррита, и вытягивание их перпендикулярно деформирующему усилию, образуя, таким образом, тонкодисперсную смесь феррита с перлитом. При $K=0,9$ в поверхностной зоне на глубине до 370 мкм присутствует структура неоднородного упрочненного

слоя, выражаемая в образовании высокодисперсных зон в форме линз – переупрочненных областей (рисунок 4.32, а).

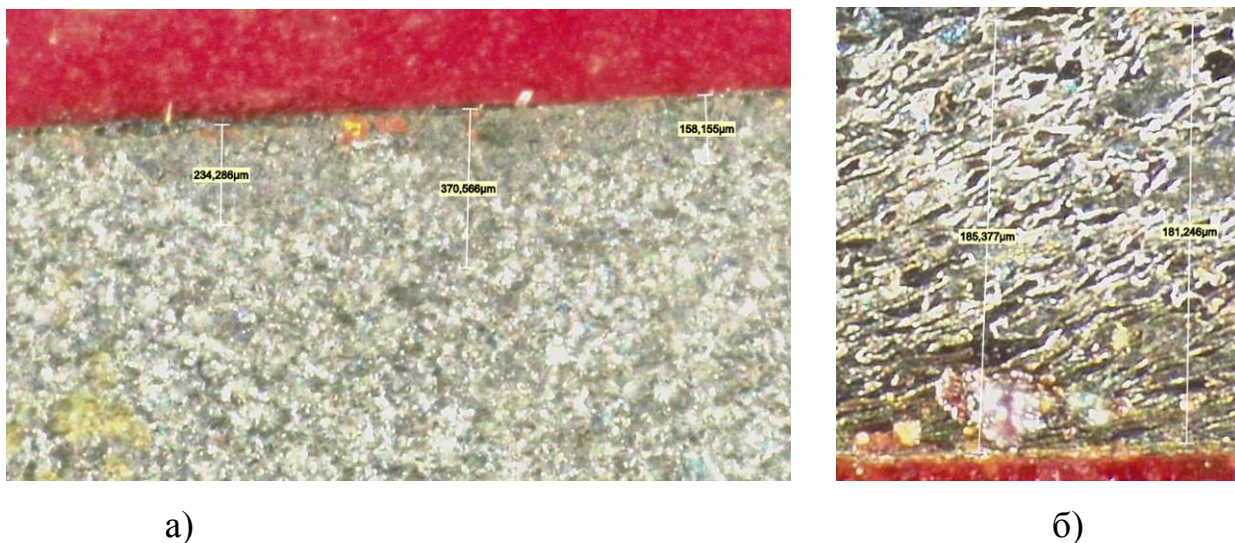


Рисунок 4.32 - а) Образование высокодисперсных зон в форме линз в упрочненном слое образца из стали 45, с $K=0,9$, $\times 140$; б) Волокнистая структура в нижней (тыльной) части упрочненного образца из стали 45, с $K=0,9$, $\times 500$ [112].

Между линзообразными зонами на поверхность образца имеет выходы исходная недеформированная структура. Наличие трещин, при упрочнении с $K=0,9$, не установлено. Под зонами с микроструктурными изменениями расположена исходная (состояние поставки) нормализованная структура, представляющая собой сетку феррита и перлита разной степени дисперсности. Рост толщины видимой деформации зерен с противоположной (тыльной) стороны начинается со значения $K=0,7$ и выше. На тыльной стороне образование волокнистой текстурированной структуры имеющей зерна, развернутые на угол $38-41^\circ$, происходит только при упрочнении с $K=0,9$ (рисунок 4.32, б). При увеличении до $\times 20000$, в поверхностном слое стали 45 не обнаружено нано-размерных следов деформации структурных компонентов (рисунок 4.33) [112].

При микроструктурных исследованиях в поверхностном слое стали 40Х, с увеличением равномерности с $K=0,1$ до $K=0,9$ происходит увеличение толщины слоя с микроструктурными изменениями с 124 до 311 мкн (рисунок 4.34, 4.35). Внутри этого слоя наблюдается текстура деформации зерен, сглаживающая их

границы. Под зоной с микроструктурными изменениями расположена исходная (состояние поставки) нормализованная структура перлита и феррита. При $\times 20000$ увеличении, в образце из стали 40X, упрочненном с $K=0,4$ на глубине 2,5 мкм установлено разрушение (дробление) цементитных пластин до ультрамелкозернистых размеров (рисунок 4.35).

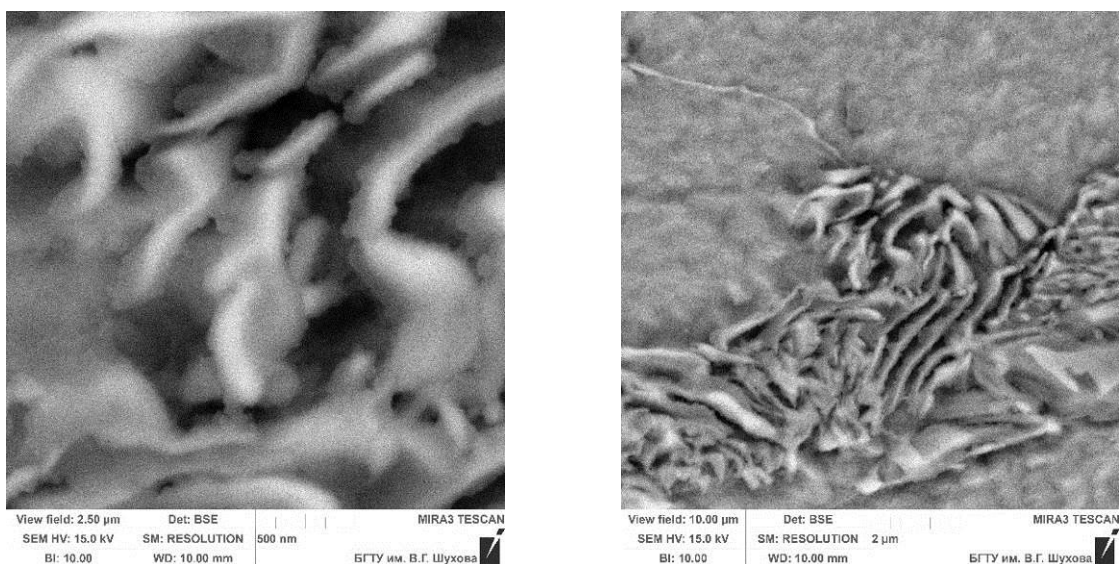


Рисунок 4.33 - Структуры феррита и перлита без следов деформации, при упрочнении образцов из стали 45 с $K=0,4$, $\times 20000$

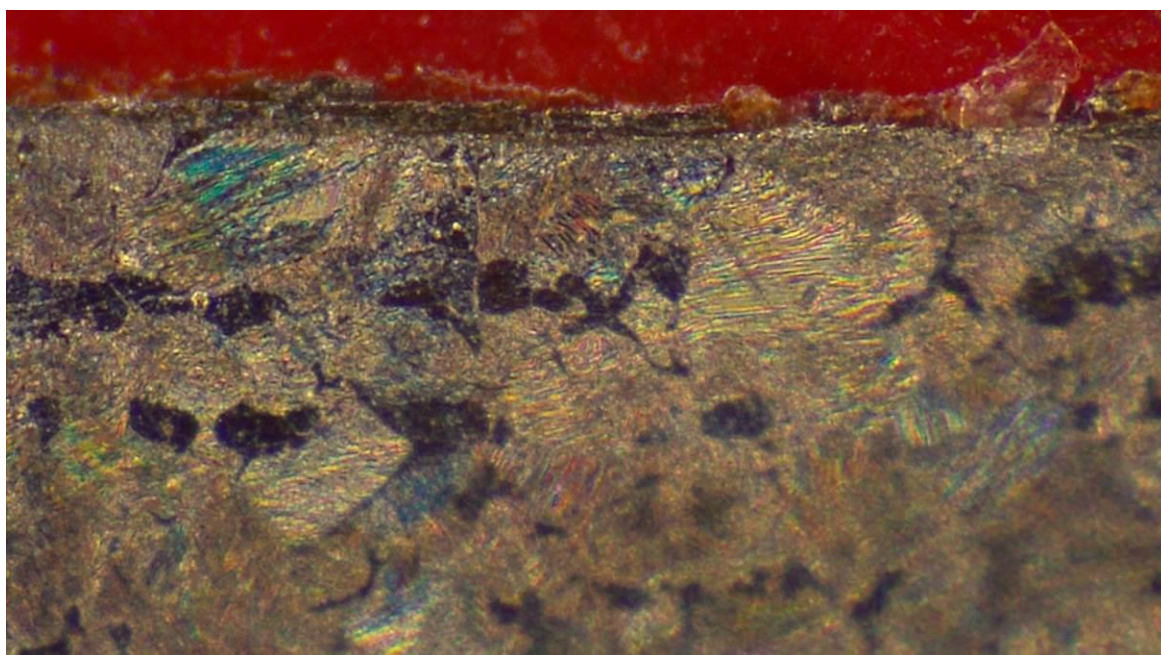
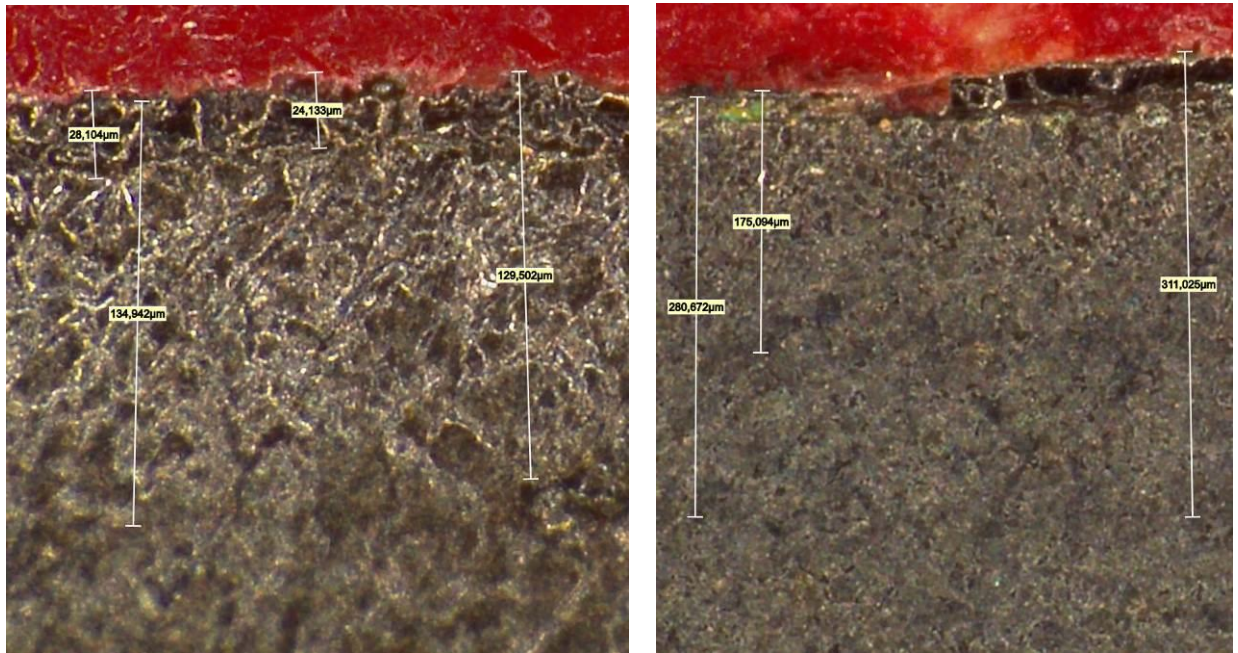


Рисунок 4.34 - Деформация зерен в поверхностном слое образца из стали 40X, с $K=0,4$, $\times 1560$



а)

б)

а - $K=0,4$, $\times 1044$; б - $K=0,9$, $\times 497$

Рисунок 4.36 - Упрочненный слой образца из стали 40X

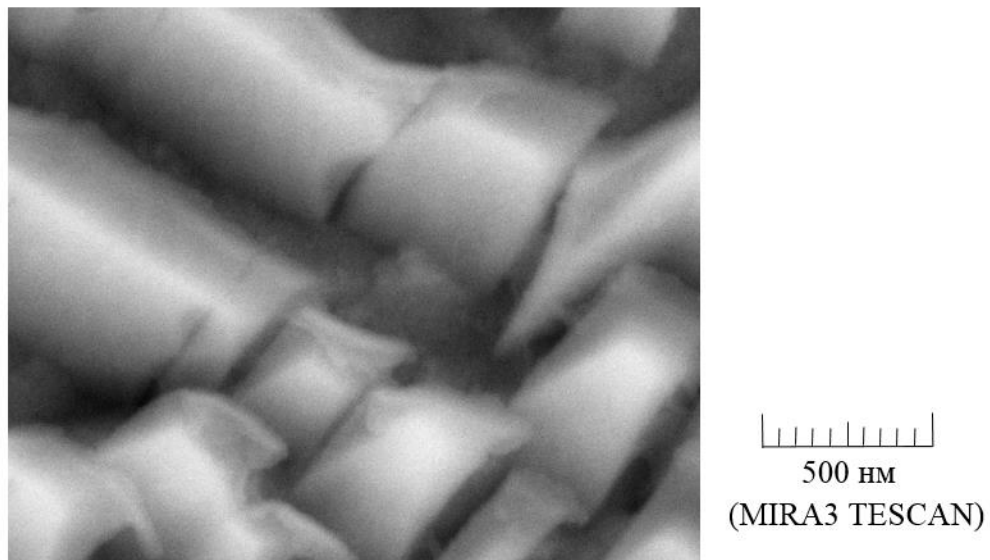


Рисунок 4.36 - Дробление цементитных пластин до ультрамелкозернистых размеров, в образце из стали 40X, упрочненном с $K=0,4$ на глубине 2,5 мкм, $\times 20000$

При микроструктурных исследованиях в поверхностном слое стали 35ХГСА с увеличением равномерности упрочнения K с 0,1 до 0,4 из-за возрастания интенсивного перемешивания идет дефрагментация (разрушение) границ зерен.

Это приводит к расширению их границ и укрупнению размеров. Толщина слоя с микроструктурными изменениями, с изменением K с 0,1 до 0,4, повышается с 100 мкм до 270 мкм (рисунок 4.37, 4.38, а). Дальнейшее увеличение равномерности упрочнения K с 0,7 до 0,9 приводит к полному раздроблению структуры упрочненного слоя и образованию однородной монолитной области (рисунок 4.38, б). На одном из образцов зафиксировано образование трещин на глубине 2 мм. Под слоем с микроструктурными изменениями расположена исходная (состояние поставки) перлитная структура, в которой ферритные включения легированы кремнием. В нижней (тыльной) части образца, только при упрочнении с $K=0,9$, установлено протекание неоднородных процессов деформации, характеризующихся дроблением исходной структуры перлита без ее перемешивания. Толщина данной области составила 61 мкм - 111 мкм. При увеличении до $\times 20000$, в поверхностном слое стали 35ХГСА не обнаружено наноразмерных следов деформации структурных компонентов (рисунок 4.39).

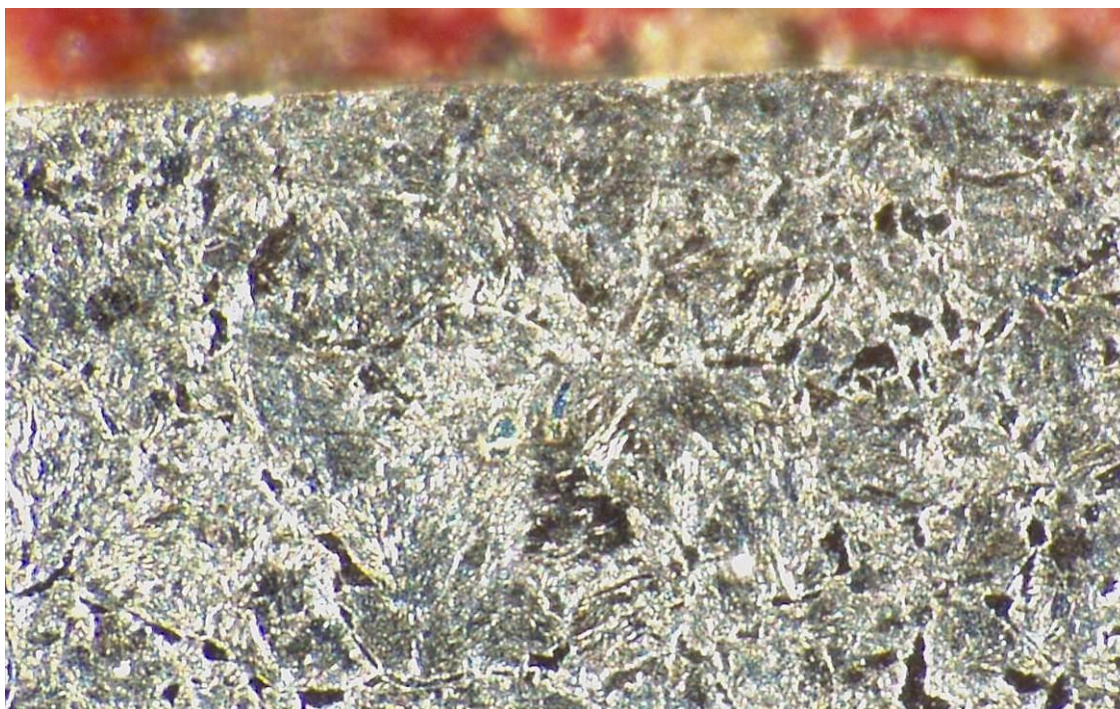
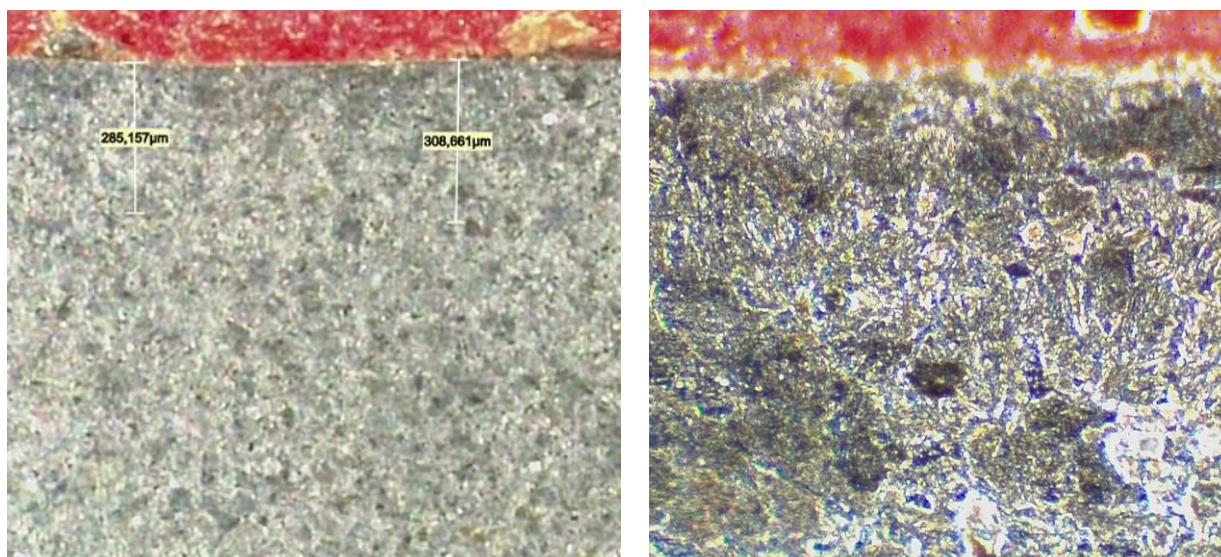


Рисунок 4.37 - Деформация зерен в образце из стали 35ХГСА, упрочненном с $K=0,4$, $\times 1000$

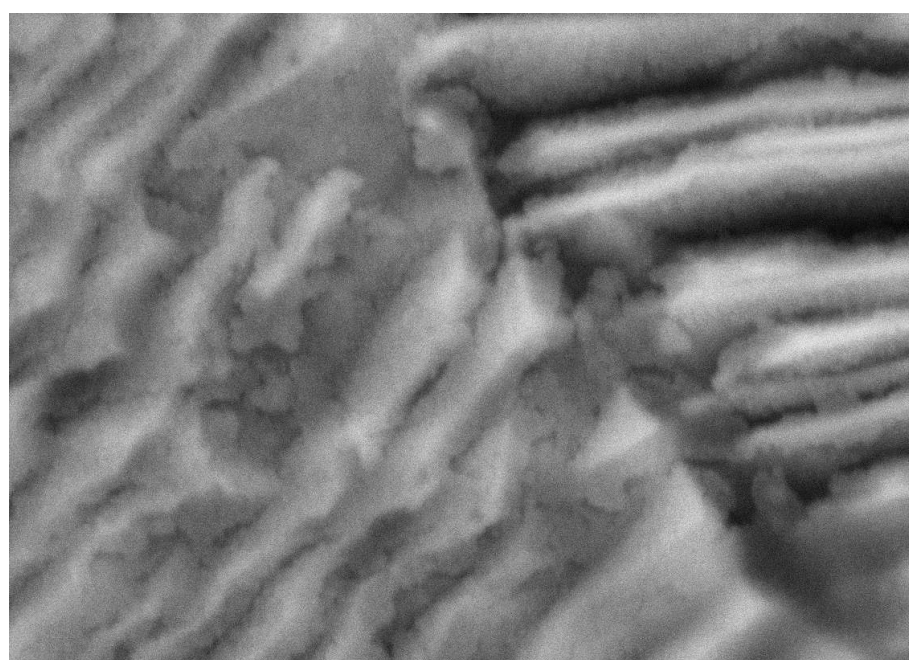


а)

б)

а - $K=0,4$, $\times 140$; б - дефрагментация с образованием однородного материала, в упрочненных образцах из стали 35ХГСА, с $K=0,9$, $\times 1680$

Рисунок 4.38 - Упрочненный слой образца из стали 35ХГСА



View field: 2.50 μm	Det: BSE		MIRA3 TESCAN
SEM HV: 15.0 kV	SM: RESOLUTION	500 nm	
BI: 10.00	WD: 9.97 mm		БГТУ им. В.Г. Шухова

Рисунок 4.39 - Стык перлитных колоний. Элементы деформации перлита отсутствуют, при упрочнении образцов из стали 35ХГСА с $K=0,4$, $\times 20000$

4.7.3 Взаимосвязь между параметрами упрочнения, прочности и микроструктуры сталей 45, 40Х, 35ХГСА после ВДУ

Изменения в стали 45. В результате упрочнения волной деформации стали 45 наибольшее значение повышения предела прочности - 8% (726 МПа) достигнуто при $K=0,7$, при этом предел текучести повысился на 43%, а пластичность уменьшилась на 37%, по сравнению с неупрочненными образцами. По результатам измерения микротвердости глубина упрочнения при $K=0,7$ составила 3 мм, а степень упрочнения 39%. Микроструктурные исследования показали, что на образце, упрочненном с перекрытием $K=0,7$ в поверхностном слое, начинают разрушаться зерна перлита и феррита и вытягиваться перпендикулярно деформирующему усилию, формируя зону полного диспергирования феррита и перлита, образуя, таким образом, тонкодисперсную (однородную) смесь феррита с перлитом. Видимые структурные изменения, происходят на глубине $h=0,066 - 0,093$ мм. Сопоставляя данные с данными измерений микротвердости видно, что у образца с $K=0,7$, формируется достаточно равномерно упрочненный поверхностный слой. На нижней стороне, также сформирована зона с видимыми структурными изменениями, глубиной 27–34 мкм. В ней начинается дробление зерен перлита, фрагментарно встречается глобулярность феррита.

У образцов, упрочненных с $K=0,4$ из стали 45, значение предела прочности лишь на 2% (711 МПа) меньше, чем у образцов, упрочненных с $K=0,7$. Результаты измерения микротвердости при $K=0,4$ показали, что образцы (толщиной 8 мм) упрочнились полностью, а степень упрочнения составила 45%. Однако микроструктурные исследования установили, что в упрочненных областях с $K=0,4$, наблюдаются видимые структурные изменения в металле на толщине 70–142 мкм. Упрочнение с $K=0,4$ приводит к фрагментации, дроблению ферритной оболочки на зернистые (глобулярные) структуры. Одновременно с образованием глобулярного феррита идет образование волокнистой структуры, которая располагается под углом 38° . При увеличении до $\times 20000$, в поверхностном слое стали 45 не обнаружено нано-размерных следов деформации структурных компонентов.

Изменения в стали 40Х. В результате упрочнения волной деформации стали 40Х, наибольшее значение повышения предела прочности - 13% (631 МПа) стали 40Х достигнуто при упрочнении с $K=0,9$. При этом предел текучести повысился на 81%, а пластичность уменьшилась на 38%, по сравнению с неупрочненными образцами. В результате измерения микротвердости при $K=0,9$ установлено, что образцы (толщиной 8 мм) упрочнились полностью, а степень упрочнения составила 43 %. Микроструктурные исследования показали, что на образце, упрочненном с перекрытием $K=0,9$ структура деформационного слоя состоит из нескольких зон. Первая (поверхностная) зона толщиной 21-24мкм, представляет собой переупрочненный слой с наличием возможных трещин и расслоений, вследствие переупрочнения. Под переупрочненной зоной располагается упрочненный слой толщиной 132-185мкм с текстурой деформации и дефрагментации ферритной сетки, имеющих много глобулярных включений. Под этим слоем располагается исходная структура. В середине образца расположена исходная структура. В нижней части образца деформаций не обнаружено.

У образцов, упрочненных с $K=0,4$ из стали 40Х, значение предела прочности лишь на 3% (611 МПа) меньше чем у образцов, упрочненных с $K=0,9$. Результаты измерения микротвердости при $K=0,4$ показали, что образцы (толщиной 8 мм) упрочнились полностью, а степень упрочнения составила 45 %. Однако микроструктурные исследования установили, что в упрочненных областях с $K=0,4$, наблюдаются интенсивная деформация, а толщина деформированного слоя составляет 220-240 мкм. Волокнистая структура проявляется достаточно рельефно. Это связано с более высокой прочностью стали 40Х по сравнению со сталью 45. Поверхностный слой является переупрочненной областью с высокодисперсной структурой и состоит из перлита и феррита. В нижней части образца явных структурных деформационных изменений не обнаружено. При увеличении до $\times 20000$, в поверхностном слое на глубине 2,5 мкм установлено неоднородное деформационное воздействие на структуру стали. Деформируются преимущественно через разрушение цементитных пластин отдельные колонии перлита. Ферритная матрица, находится в области упругих деформаций, которые

не изменяют её структуру. Разрушений ферритной матрицы не обнаружено. Интенсивная фрагментация пластин цементита в колониях перлита осуществляется по сдвиговому механизму разрушения для хрупких тел под углом около 45° . Размер фрагментов цементитных включений имеет ультрамелкозернистый размер.

Изменения в стали 35ХГСА. В результате упрочнения волной деформации стали 35ХГСА, наибольшее значение повышения предела прочности – 5,8% достигнуто при упрочнении с $K=0,7$. При этом предел текучести удалось повысить на 51%, а пластичность в результате уменьшилась на 28% по сравнению с неупрочненными образцами. Результаты измерения микротвердости при $K=0,7$ показали, что образцы (толщиной 8 мм) упрочнились полностью, а степень упрочнения составила 25%. Микроструктурные исследования показали, что на образце, упрочненном с перекрытием $K=0,7$ в поверхностном слое наблюдается полное раздробление структуры упрочненного слоя, дефрагментация с образованием однородного материала. В нижней части образца, протекает неоднородный процесс упрочнения. Происходит дробление исходной структуры перлита без перемешивания.

У образцов, упрочненных с $K=0,4$ из стали 35ХГСА, значение предела прочности лишь на 1,7% (757 МПа) меньше чем у образцов, упрочненных с $K=0,7$. По результатам измерения микротвердости глубина упрочнения при $K=0,4$ составила 2,5 мм, а степень упрочнения 18%. Однако микроструктурные исследования установили, что в поверхностном слое образцов упрочненных с $K=0,4$ (из-за интенсивного перемешивания) идет разрушение первых границ зерен. Это приводит к расширению границ зерен и укрупнению их размеров. В данных объемах наблюдается максимальная твердость. В нижней части образца располагается структура поставки, сохраняется веерообразность и присутствуют единичные небольшие деформированные области, дающие увеличение твердости. При увеличении до $\times 20000$, в поверхностном слое стали 35ХГСА не обнаружено нано-размерных следов деформации структурных компонентов.

Обработка в программе Statistica данных взаимосвязи между параметрами: упрочнения, прочности и микроструктуры, позволила получить следующие регрессионные модели для сталей 45 (1), 40Х (2), 35ХГСА (3), соответственно:

$$\sigma_T = 542,62 + 31,33\Delta H_\mu - 42,97h_\mu + 514,27h_{\text{мик.ст.}} + 225,24K \quad (4.1),$$

$$\sigma_T = 508 - 6,67\Delta H_\mu + 19,33h_\mu + 66,71h_{\text{мик.ст.}} + 90K \quad (4.2),$$

$$\sigma_T = 360,88 + 8,77\Delta H_\mu + 1,15h_\mu + 680h_{\text{мик.ст.}} - 150,05K \quad (4.3),$$

где σ_T – 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.

Регрессионный анализ полученных моделей показал, что все параметры значимы, адекватность моделей для сталей 45, 40Х, 35ХГСА составила, соответственно 90%; 87% и 88%. Данные регрессии свидетельствуют об адекватности использования полученных моделей для определения прочности в зависимости от глубины и степени упрочнения, толщины слоя с микроструктурными изменениями и равномерности упрочнения сталей 45, 40Х, 35ХГСА [28, 112, 113].

ВЫВОДЫ ПО 4 ГЛАВЕ

На основании исследований процессов, протекающих при ВДУ в изделии, анализа результатов моделирования и натурных экспериментов, выполненных на образцах длиной от 50 до 150 мм, шириной от 20 до 40 мм, высотой от 10 до 20 мм, изготовленных из стали 45, титана ВТ 1-0, бронзы БрАЖ 9-4, алюминия В95, экспериментальной оценки влияния макроструктурной технологической наследственности на результаты ВДУ и влияния ВДУ на макроструктурную технологическую наследственность, сформулированы выводы и рекомендации:

1. Установлено, что вследствие интерференционного волнового характера упрочнения при ВДУ упрочняется не только контактная, но и опорная поверхности. Это обеспечивает возможность бесконтактного деформационного упрочнения противоположной воздействию индентора стороны образца (рисунок 4.25). 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 4.2)

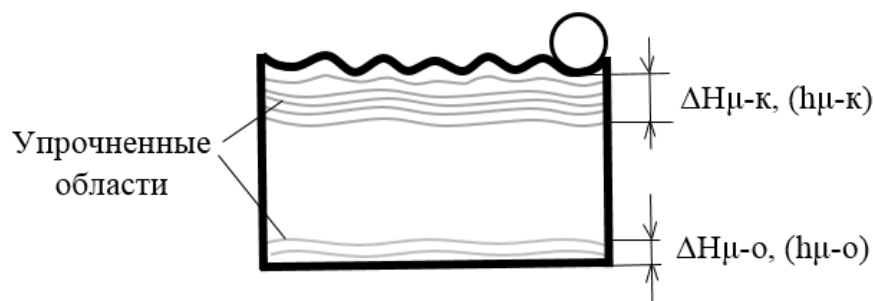


Рисунок 4.25 - Схема и расположения упрочненных областей после ВДУ

Таблица 4.2

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
$\Delta H_\mu\text{-к} / \Delta H_\mu\text{-о}$	1,4	5,1	4,8	1,9
$h_\mu\text{-к} / h_\mu\text{-о}$	1,3	5,7	1,5	2,6
Материал	Алюмин В-95	Бронза БрАЖ 9-4	Титан ВТ 1-0	Сталь 45

Установлено влияние формы и габаритных размеров образцов при ВДУ на микротвердость (H_{μ}) и степень упрочнения. При равных объемах и толщине образцов, одинаковых режимах ВДУ, прямоугольная форма обеспечивает большую степень упрочнения, чем треугольная и цилиндрическая.

3. Установлено, что при равных объемах образцов и одинаковых режимах ВДУ, геометрические размеры обрабатываемого изделия оказывают влияние на формируемые параметры упрочнения поверхностного слоя. Так, увеличение: длины образцов с 50 до 150 мм в среднем приводит к падению их твердости на 6,7%; толщины образцов с 10 до 20 мм приводит к повышению их твердости в среднем на 13%; ширины образцов с 20 мм до 40 мм приводит к снижению твердости в среднем на 18,3%.

4. Установлено, что при рассмотрении возможности ВДУ крупногабаритных изделий, для получения адекватных (предсказуемых) результатов, предварительные исследования должны проводиться на образцах габаритными размерами не менее (д*ш*в) 150*40*20 мм. В случае обработки изделий размерами менее 150*40*20 мм необходимо делать коррекцию на результаты исследований (рисунок 4.26, а).

5. Установлено, что наличие в обрабатываемом изделии полостей (пазов) усиливает эффект ВДУ. В зависимости от размеров полостей (пазов) 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 на 8%, титана и стали на 4%, алюминия 21%. Степень упрочнения над полостями выше, чем у рядом расположенных областей на 10-30% в стальных образцах, на 10-60% - в бронзовых. Установлено также упрочнение участков, расположенных под отверстиями.

6. Установлено, что для обработки изделий из стали, титана и бронзы целесообразно использовать ударные системы $L1/L2=3...5$, так как они обеспечивают на 7,3% большую степень и на 9,5% большую глубину упрочнения,

чем $L1/L2=10$. При аналогичных результатах упрочнения длина ударной системы $L1/L2=3$ на 50% меньше, чем у $L1/L2=5$, что делает её более удобной для использования. Для обработки изделий из алюминия следует использовать ударные системы $L1/L2=5$, так как они на 34% обеспечивают большую степень и на 12% большую глубину упрочнения, чем $L1/L2=10$, и на 23 и 29%, соответственно, чем $L1/L2=3$.

7. Установлено, что на характер упрочнения при ВДУ влияет направление волокон исходной макроструктуры. 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, формированием вязкой пластичной сердцевины.

8. Установлена взаимосвязь между режимами ВДУ, микроструктурой и прочностью. Так, при ВДУ стали 45 при $K=0,7$ установлено наибольшее повышение прочности на 8%, предел текучести на 43%, но при этом пластичность снизилась на 37%. А формирование в поверхностном слое глобулярного феррита и текстурирование поверхностного слоя, характеризующегося образованием под углом 40-45° волокнистой структуры в виде чередования прослоек феррита и перлита достигнуто при упрочнении с $K=0,4$. При ВДУ стали 40Х, наибольшее значение повышения предела прочности на 13% достигнуто при упрочнении с $K=0,9$. При этом предел текучести повысился на 81%, а пластичность уменьшилась на 38%, по сравнению с неупрочненными образцами. При ВДУ стали 40Х с $K=0,4$ на глубине 2,5 мкм установлено дробление цементитных пластин до ультрамелкозернистых размеров. Так, при ВДУ стали 35ХГСА при $K=0,7$ установлено наибольшее повышение прочности на 5,8%, предел текучести на 51%,

но при этом пластичность снизилась на 28%. При упрочнении с $K=0,7$ в поверхностном слое наблюдается полное раздробление структуры упрочненного слоя, дефрагментация с образованием однородного материала. В нижней части образцов, протекает неоднородный процесс упрочнения, характеризующийся дроблением исходной структуры перлита без перемешивания.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВДУ СВАРНОГО ШВА И ВДУ ВЫРАЩЕННОГО ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ ИЗДЕЛИЯ. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

5.1 Особенности разработки конечно-элементных моделей комбинированных технологий сварки, наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ

Большой научный и практический интерес представляет упрочнение не только монолитных, но и соединенных сваркой или полученных с помощью синтеза сваркой деталей. Сварной шов и зона термического влияния сварного шва являются слабым местом любого ответственного изделия. Сварка широко используется в производстве ответственных ресурсопределяющих деталей [156].

Начиная с 2015 г. взрывное развитие получает WAAM/3DMP (Wire Arc Additive Manufacturing/3D Metal Print) технология аддитивного синтеза изделий из металлической проволоки методом электродуговой сварки. Достоинством метода является высокая универсальность и экономическая конкурентоспособность традиционным технологиям, изделие можно наплавлять практически из любого металла или сплава. Однако известно, что вследствие недостаточной твердости и прочности выращенного изделия, во всем мире аддитивными технологиями изготавливается 60...80 % прототипов и моделей и только 20...40 % деталей [7, 156, 202]. Проблема может быть успешно решена путем создания аддитивно-упрочняющих технологий [110].

В данной главе выполняется разработка моделей комбинированных технологий ВДУ сварного шва и ВДУ выращенного электродуговым методом изделия [96].

Моделирование любой самостоятельной технологической операции является достаточно сложной задачей, включая модель сварного шва. При построении комплексных моделей, особую сложность представляет решение проблемы

передачи информации об изделии при переходе от одной операции к другой. Так как для моделирования технологических операций предлагаются специальные программные продукты, на этапе межоперационного перехода неизбежна потеря части информации. Проблема стоит особенно остро для передачи информации между технологическими процессами, отличающимися по физическому характеру воздействий на материал исходной заготовки [18].

При моделировании процесса 3DMP-синтеза и процесса ВДУ программные модули ANSYS должны постоянно (послойно) обмениваться информацией. В такой комплексной постановке, применительно к указанным процессам, единая общая задача решается впервые.

5.1.1 Особенности разработки конечно-элементной модели комбинированных технологий сварки с ВДУ

Повышение прочности сварных швов является актуальной проблемой машиностроения. Необходимость дополнительного воздействия на сварное соединение после его получения связано со снижением прочностных свойств зоны термического влияния (сварного шва и околошовной зоны) из-за выгорания химических элементов металла, быстрого локального нагрева и охлаждения металла, и как следствие, появления значительных растягивающих напряжений [44, 207].

Для повышения долговечности металла в зоне термического влияния и снижения остаточных напряжений в основном металле и в сварных швах применяют различные технологические способы: термическая обработка, старение, поверхностное пластическое деформирование (ППД) и т.д.

Применение традиционных способов, для улучшения прочностных свойств зоны термического влияния – термической обработки и старения, характеризуется значительными временными и энергетическими затратами и имеет определенные ограничения, связанные с габаритными размерами обрабатываемого изделия.

Среди методов ППД, для обработки сварных швов и околошовных зон, применяются ультразвуковая и виброударная обработка, обкатывание и т.д.

Достаточно эффективным способом, для обработки сварных швов и околошовных зон, является метод ППД ВДУ.

Проведение натурного эксперимента всегда связано с трудностями его реализации, материальными затратами, требованиями к наличию соответствующего оборудования. Моделирование процесса с помощью средств современного инженерного анализа, основанных на методе конечных элементов, значительно ускоряет процедуру получения необходимой информации. Целью данной работы является исследование результата воздействия различных типов инструментов при ВДУ сварного шва компьютерным моделированием методом конечных элементов.

Подготовка модели

Разработка конечно-элементной модели процесса обработки сварных швов волной деформации состояла из двух этапов.

На первом этапе создавалась конечно-элементная модель сварного шва. Для этого в модуле «Transient Thermal», в разделе «Geometry» создавалась геометрия свариваемого образца, а сварной шов разбивался на лицевые и корневые элементы (рисунок 5.1) [18]. В разделе «Engineering Data» задавались свойства обрабатываемого материала, такие как: предел текучести, прочности, плотность, коэффициент термического расширения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, касательный модуль и др. Некоторые физико-механические свойства задавались в зависимости от температуры. Далее в сварной заготовке формировалась конечно-элементная сетка. Для решения тепловых задач, сетке присваивался тип «Explicit». Нагрев элементов сварного шва выполнялся с помощью теплового потока, задаваемого функцией «Heat Flow». Методика определения величины необходимого теплового потока при сварке, представлена в различных источниках, например [201]. Значение теплового потока присваивалось каждому элементу сварного шва. У лицевых и корневых

швов, величины теплового потока отличны, это связано со спецификой сварки материала толщиной более 10 мм. Затем, ко всем поверхностям сварной заготовки присваивалось граничное значение конвекции «Convection». Оно создавало условие соприкосновения всех поверхностей сварной заготовки со «стоячим» воздухом. Настройка задачи завершалась установкой параметров расчета – «Analysis Setting», в которых задавалось количество шагов расчета. В задаче каждый элемент сварного шва нагревался за один шаг расчета, также дополнительно к расчету добавлялось еще два шага. На них фиксировался процесс остановки нагрева, и задавалось время, в течение которого происходит остывание заготовки после сварки. Итогом расчета в модуле «Transient Thermal» являлось получение температурных полей нагрева и охлаждения сварной заготовки, которые затем передавались в модуль «Static Structural» для получения тепловых деформаций, возникающих в изделии после сварки [18].

В модуль «Static Structural» из модуля «Transient Thermal» передавалась геометрия сварного изделия, модель материала (рисунок 5.2). Заново формировалась конечно-элементная сетка. Торцам сварной заготовки присваивалось граничное условие «Fixed Support». Оно обеспечивает закрепление краев заготовки в пространстве. Граничное условие «Frictionless Support» прикладывалось к нижней части сварной заготовки для обеспечения ее нормального ограничения, со свободой по касательному направлению. Для импортирования температурных полей из модуля «Transient Thermal» использовалась функция «Imported Load». Настройка параметров расчета «Analysis Setting» выполнялась аналогичным образом, как в модуле «Transient Thermal», что необходимо для адекватной передачи и использования в расчете температурных полей во времени. После решения задачи в модуле «Static Structural», появилась возможность оценки напряжений и деформаций, возникающих в заготовке после сварки [18].

Второй этап, представлял собой объединение данных, полученных в результате моделирования сварного шва с моделью упрочнения волной

деформации в единую конечно-элементную модель процесса обработки сварных швов волной деформации. Для этого использовался модуль «Transient Structural». Импорт из предшествующих расчетов значений напряжений и деформаций, измененной в результате сварки геометрии заготовки, выполнялся с помощью модулей «External Data» и «Mechanical Model», соответственно (рисунок 5.1) [18].

В модуле «Transient Structural», к созданной ранее геометрии сварного шва, добавлено еще одно тело - стержневой ролик, через который энергия ударов сообщается обрабатываемой поверхности сварной заготовки. Подготовка к расчету модуля «Transient Structural» начиналась с настройки контакта в разделе «Connectoins», в котором определялся тип контакта, как «Frictional» и задавалась величина коэффициента трения. Для упрощения организации настроек контакта между телами, создавалась и включалась функция «Contact Tool». Непосредственная передача в модуль «Transient Structural» напряжений, полученных в процессе сварки, выполнялась с помощью функции «Imported Initial Stress». Ограничение перемещения ролика по одной из осей задавалось введением граничного условия Displacement. Закрепление краев сварной заготовки в пространстве обеспечивалось граничным условием «Frictionless Support», которое прикладывалось к торцам заготовки. Перемещение заготовки в процессе волнового деформационного упрочнения выполнялось с помощью функции «Velocity», которая обеспечивала задание кинематической скорости движения заготовки в выбранном направлении [18].

Закон деформирования роликом сварной заготовки задавался с помощью функции «Force», которая отражала изменение силы удара во времени. Вид зависимости определялся из ранее решенных контактных задач, основанных на конечно-элементной модели ударной системы с промежуточным звеном. В результате моделировался ударный импульс, форма которого описывалась зависимостью силы удара от времени. Получаемый ударный импульс имел фронты спада и нарастания, и, в зависимости от параметров ударной системы, мог обладать хвостовой частью, обеспечивающей более высокий КПД процесса удара. Таким

образом, с помощью ранее разработанной модели ударной системы с промежуточным звеном, на основании заданных параметров ударной системы и свойств обрабатываемого материала, определялся закон изменения силы для одного удара во времени. Полученная таким образом зависимость использовалась в дальнейшем в модуле «Transient Structural» для заданного числа ударов.

Настройка параметров расчета «Analysis Setting» сводилась к включению функции «Auto Time Stepping» и выбора принципа расчета шагов через заданное время, с указанием минимального и максимального времени расчета одного шага. После решения задачи, в модуле «Transient Structural» появляется возможность оценки напряжений, деформаций, перемещений, температур и т.д. При необходимости исследования каких-либо других параметров или их комбинаций, они активируются перед запуском расчета в разделе «Analysis Setting» или прописываются командной строкой [18].

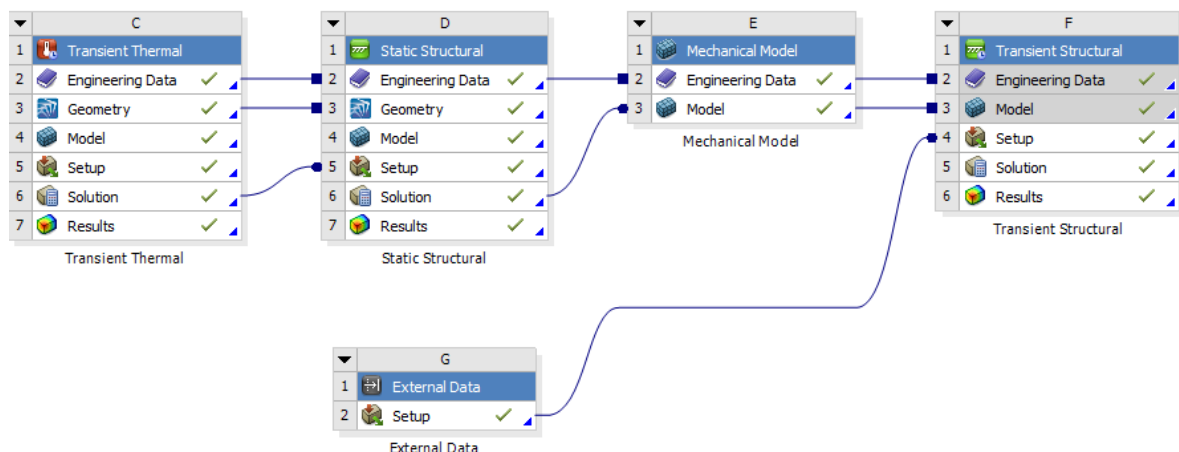


Рисунок 5.1 - Модульная схема модели

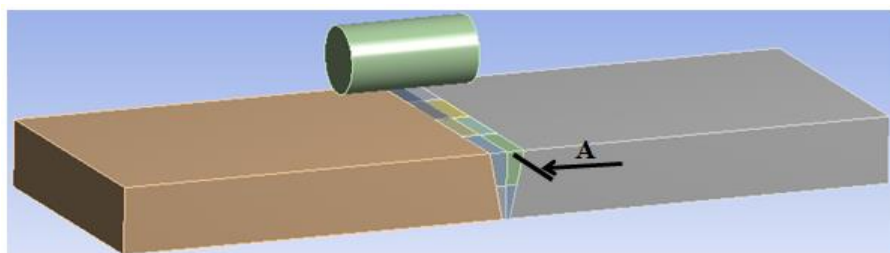


Рисунок 5.2 - Схема модели

На рисунках 5.3 и 5.4 представлено распределение остаточных напряжений в сварных швах до и после ВДУ. Полученные данные говорят о снижении величин растягивающих напряжений (данные со знаком «плюс») и переходе их в сжимающие (данные со знаком «минус»).

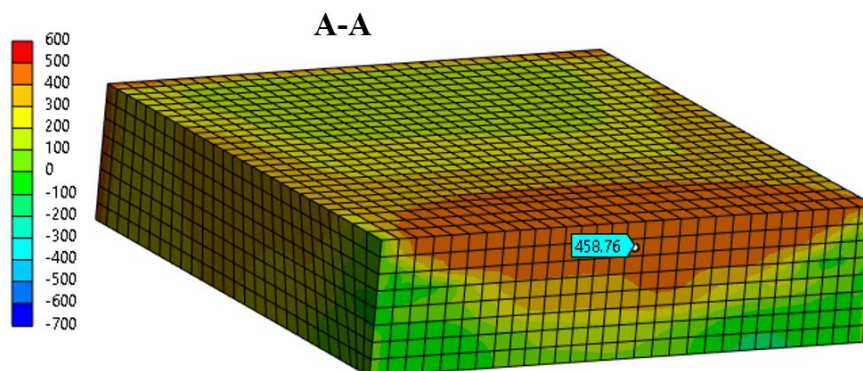


Рисунок 5.3 - Распределение остаточных напряжений в образце после сварки

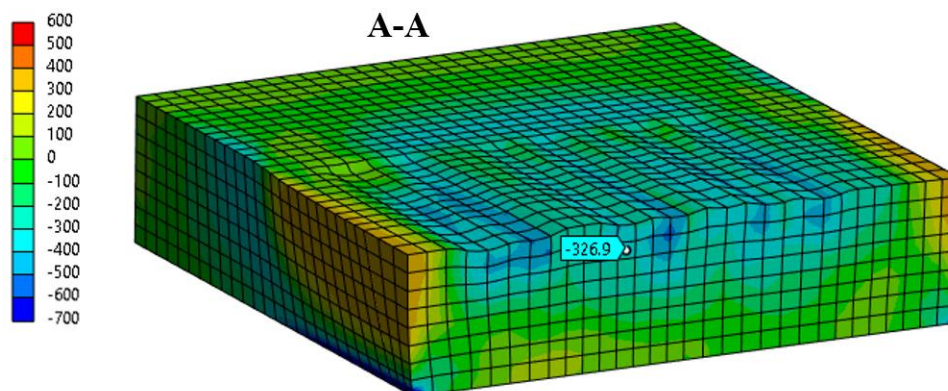
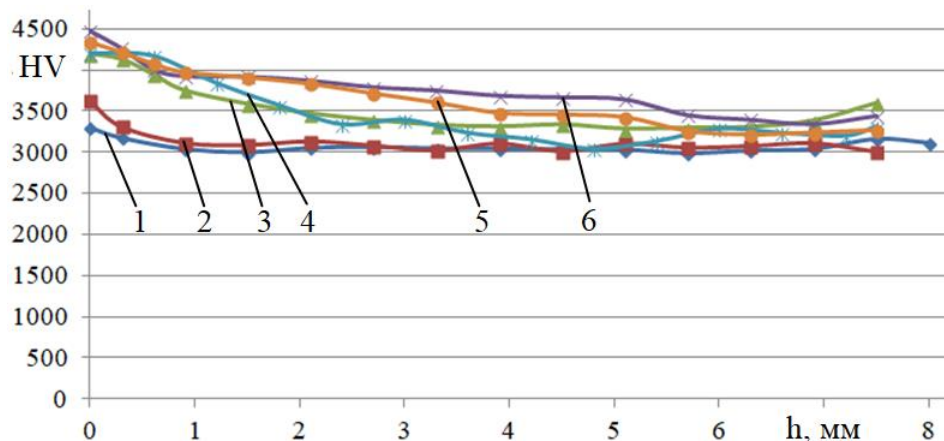


Рисунок 5.4 - Распределение остаточных напряжений в сварном образце после ВДУ

Для оценки адекватности разработанной конечно-элементной модели проводился предварительный натурный эксперимент. Для проведения исследований использовались пластины размерами 600*100*7 мм, изготовленные из стали 40Х. С помощью сварочного полуавтомата данные пластины сваривались встык и имели конечный размер 600*200*7 мм. ВДУ сварных швов проводилось с энергией 150 Дж с частотой ударов 10 Гц и с режимами, соответствующими коэффициентам перекрытия $K=0,3$ и $K=0,6$. В качестве инструмента при упрочнении использовался стержневой ролик диаметром 10 мм и шириной 40 мм. После обработки швов ВДУ, сварная пластина разрезалась на ленточной пиле

вдоль шва и в полученном сечении измерялась микротвердость с помощью твердомера. Сравнение данных моделирования и значений, полученных в результате натурного эксперимента, при одинаковых исходных условиях, выполнялось по карте микротвердости в сечении сварного шва [59]. Результаты сравнения представлены на рисунке 5.5.



1 - неупрочненного (данные эксперимента); 2 - неупрочненного (результаты моделирования); 3 - упрочненного с $K=0,3$ (данные эксперимента); 4 - упрочненного с $K=0,3$ (результаты моделирования); 5 - упрочненного с $K=0,6$ (данные эксперимента); 6 - упрочненного с $K=0,6$ (результаты моделирования)

Рисунок 5.5 - Распределение микротвердости (HV, МПа) по глубине (h , мм) сварного шва

Полученные теоретические данные по распределению микротвердости в поверхностном слое с удовлетворительной вероятностью (92%) соответствуют экспериментальным значениям. Полученные результаты можно считать значимыми [18].

5.1.2 Особенности разработки конечно-элементной модели комбинированных технологий наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ

Так как процесс WAAM очень похож на многопроходный способ сварки к его моделированию применяют общие подходы. Анализ существующих математических моделей электродуговой сварки условно можно разделить на три

группы: модель дуги [13, 42]; модель переноса металла при сварке [4, 41] и общие модели [34, 39]. К общим относятся модели, одновременно рассматривающие процессы первых двух групп и иные модели, учитывающие дополнительное воздействие на сварочную область после её формирования.

Анализ общих моделей показал отсутствие единых подходов к созданию комбинированных моделей наплавки и пост упрочняющих обработок. Как правило, большинство существующих моделей по созданию и исследованию процессов аддитивного синтеза созданы в специализированном ПО, не имеющим возможности моделирования других отличных от имеющихся по физическому воздействию операций.

Созданные на универсальной платформе, модели комбинированных процессов аддитивного синтеза с другими технологиями носят единичный сугубо специализированный характер, в большинстве случаев в фрагментной постановке на геометрических примитивах, в симметричной постановке. Это не позволяет в полной мере оценить протекание процессов в полноразмерном изделии и способствует накоплению ошибок в расчете из-за симметричных постановок и действия дополнительных граничных условий.

Новизна разрабатываемой гибридной модели АС-ВДУ заключается в применении согласованных подходов при решении тепловой и механической задач в трехмерной постановке, с учетом естественно движущихся тепловых потоков во всех моделируемых изделиях. Для создания гибридной модели АС-ВДУ в ANSYS использовались модули Transient Thermal и Transient [19].

Основным результатом исследования является предлагаемый оригинальный подход к математическому моделированию принципиально новых процессов синтеза и упрочнения широкой номенклатуры изделий, изготавливаемых из различных материалов в виде проволоки. Основная особенность подхода состоит в гибридизации расчетных моделей и может быть распространена на весь класс процессов аддитивного синтеза с периодической или постобработкой.

Отличительной особенностью гибридной модели АС-ВДУ является необходимость периодического обмена информацией о геометрических и температурных параметрах выращиваемых областей в конкретный момент времени. Предложена общая структура гибридной модели АС-ВДУ, при этом в отличие от известных решений, значительное внимание уделяется процессам обмена и передачи информации между моделями процессов аддитивного синтеза и упрочнения, применении согласованных подходов при решении тепловой и механической задач в трехмерной постановке, с учетом естественных динамических тепловых потоков в выращиваемом изделии.

Информация о распределении температурных полей необходима для выявления условий и момента начала волновой деформационной упрочняющей обработки, которая реализуется в заданном температурном диапазоне.

Эффект деформационного воздействия зависит как от температуры, при которой проводится обработка наплавленного материала, так и от времени нахождения материала локальных областей выращиваемого изделия в различных температурных интервалах, что является следствием перераспределения тепловых потоков от новых наплавленных слоев. Весьма важной информацией является объем материала и время его выдержки выше температуры рекристаллизации. Даже в условиях неизменности режимов наплавки, воздушного потока, температуры окружающей среды, геометрических размеров выращиваемого изделия необходимо выявить факторы, влияющие на перераспределение тепловых потоков, управлять градиентом изменения температур.

Подготовка модели

Разработка конечно-элементной модели комбинированных технологий наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ включает в себя поэтапное взаимосвязанное решение тепловой задачи (аддитивного синтеза) и механической (волнового деформационного нагружения выращенного материала) (рисунок 5.6).

На первом этапе решалась тепловая задача. Из нее установлена взаимосвязь между величиной теплового потока, формой выращиваемых изделий, величины объемов наплавочного материала, габаритами наплавочного стола.

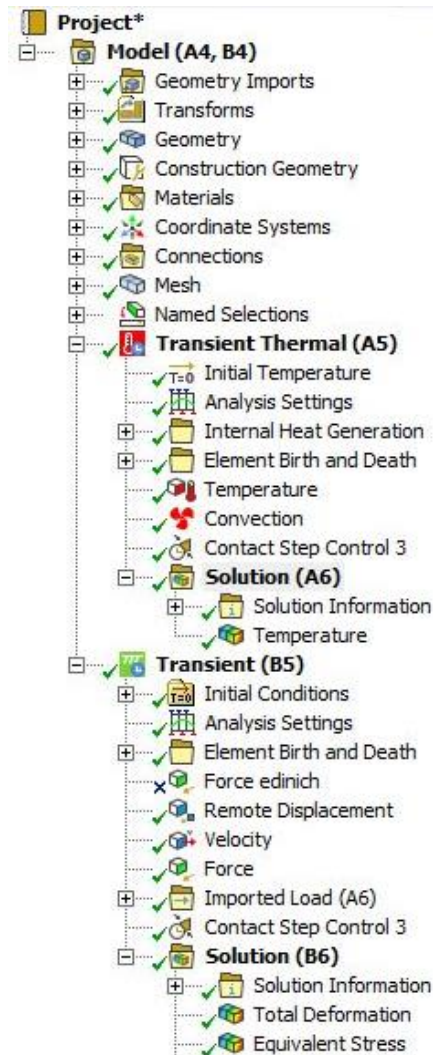
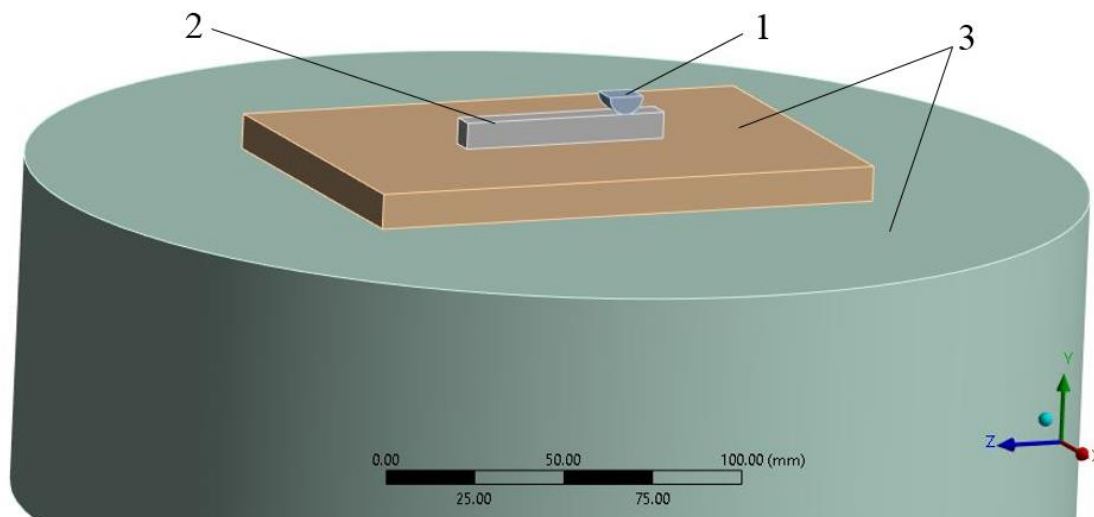


Рисунок 5.6 - Схема комбинированной модели

Работа с моделью начиналась с создания геометрии выращиваемого изделия, инструмента для упрочнения, наплавочного стола в графическом модуле Ansys Space Claim (рисунок 5.7). Там же выполнялось позиционирование созданных геометрических объектов друг относительно друга.

Тепловая задача по моделированию аддитивного синтеза выполнялась в модуле Transient Thermal. В нем созданным геометрическим элементам модели присваивались марки материалов. Модели марок материалов были созданы ранее с помощью заполнения моделей шаблонов материала данными из справочной литературы и результатов испытаний на разрыв реальных используемых

материалов [93, 116]. Далее в геометрических элементах модели генерировалась конечно-элементная сетка (рисунок 5.8, а). Для уменьшения времени расчета размеры конечно-элементной сетки имели разные величины.



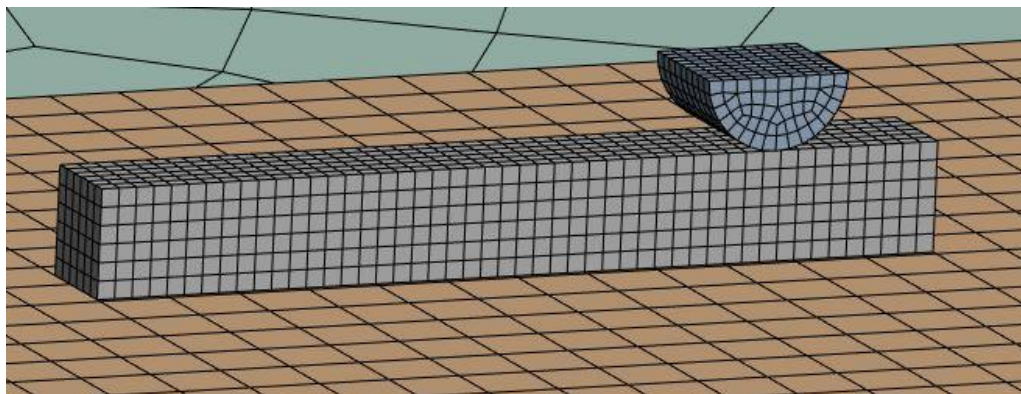
1 – инструмент для упрочнения; 2 – выращенный образец прямоугольной формы; 3 – наплавочный стол

Рисунок 5.7 - Пример комбинированной модели

Так, у наплавочного стола сетка была более крупная, а у выращенного изделия и инструмента для упрочнения максимально-допустимо мелкая, позволяющая с высокой точностью описывать моделируемые процессы без существенной нагрузки на вычислительные мощности.

На следующем этапе геометрия наплавленного изделия разбивалась на единичные наплавочные объемы, которые наплавляются наплавочной горелкой за 1 секунду её работы. Величины единичных наплавочных объемов определялись в ходе предварительных экспериментальных исследований. Для небольших выращиваемых изделий разбивку на элементарные наплавочные объемы можно провести вручную с использованием опции Named Selections (рисунок 5.8, б-г).

Для повышения точности моделирования каждый единичный наплавочный объем содержит сетку, состоящую из нескольких конечных элементов (рисунок 5.8, б). Разбиение более крупных выращенных деталей с помощью Named Selections можно автоматизировать, с помощью написанного на языке программирования Python скрипта, который запускается в разделе Automation – Scripting.



а)



б)



в)



г)

а - на конечные элементы, б - на первый, в - второй, г - последний единичные напластовочные объемы

Рисунок 5.8 - Пример разбиения КЭМ

В разделе Connections задавались условия контактов: 1) инструмента для ВДУ и наплавленным материалом и 2) наплавочным материалом и наплавочным столом. Для улучшения работы контактных групп использовался инструмент Contact Tool. Также всем телам участвующими в моделировании присваивалась величина конвекции функцией Convection.

Далее каждому сформированному наплавочному объему задавалась величина теплового потока, необходимая для моделирования условий расплавления единичного объема материала с помощью функции Internal Heat Generation (Вт/мм^3). Величина Internal Heat Generation определяется на основании предварительного экспериментального исследования. Процесс выращивания, то есть поэтапного появления наплавочного материала в ходе моделирования, выполнялся с помощью функции Element Birth and Death. Синхронизация процессов присвоения теплового потока, процессов «смерти» и «появления» Element Birth and Death единичных наплавочных объемов в едином временном потоке расчета выполнялось в разделе Analysis Settings. Ручная настройка становится весьма сложной уже после 10 таких элементов, а в небольших выращиваемых (рассматриваемых) деталях их как правило от 100 и выше (для цилиндрической оболочки: V1 - 220 шт; V2 - 390 шт; V3 - 570 шт). Для сокращения числа ошибок при синхронизации указанных процессов и его автоматизации был разработан ещё один скрипт. Он позволял не только выполнить синхронизацию процессов настройки – присвоения величин тепловых потоков единичных наплавочных объемов, начала появления каждого из них в расчете, но и учесть в едином временном потоке процесс ВДУ, время его начала, на каких слоях наплавленного материала необходимо проводить упрочнение, период действия одного ударного импульса и время между ними, паузу на переход между слоями при синтезе, коэффициент перекрытия и размер единичного отпечатка удара инструмента при ВДУ, время за которое происходит нагрев единичного теплового объема.

В разделе Solution теплового расчета задается функция Temperature, которая позволяет определять распределение тепловых полей в результате расчета.

Механическая задача – моделирование процесса волнового деформационного упрочнения должна решаться в едином информационном потоке с тепловой задачей для исключения потери информации на межоперационных переходах и учета действия тепловых процессов. Создание комбинированной модели комбинированных технологий наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ выполнялась добавлением в тепловой расчет модуля Transient, в котором выполнялось моделирование, упрочнения. Для этого копировались из теплового расчета настройки Analysis Settings, настройки функции Element Birth and Death, выполнялся импорт температурных полей функцией Imported Load.

Затем инструменту с помощью функции Force задавался закон ударов и требуемое их число необходимое для упрочнения. Каждый удар представил собой закон изменения силы во времени, протекающий в течении 10^{-5} секунду. Данный закон изменения силы во времени для одного удара определялся из ранее созданной модели ударного импульса (глава 3). Он учитывает формы, размеры, материал ударной системы (бойка и волновода), силы статического поджатия волновода к инструменту, формы и размер инструмента, размер и физико-механические свойства обрабатываемого материала. Число ударов за одну секунду также можно настраивать.

Для обеспечения смещения между ударами в процессе упрочнения использовалась функция Velocity (мм/с), которая прикладывалась к обрабатываемому материалу если он имеет прямоугольную форму. В случае упрочнения торцов цилиндрических поверхностей движение перемещения задавалось инструменту. Ограничение перемещения по осям и запрет вращения по осям инструменту задавалось граничным условием Remote Displacement. Появление контактных условий для инструмента в момент начала упрочнения контролировалось функцией Contact Step Control.

В разделе Solution выбирались параметры (напряжений, деформаций, перемещений и т.д.), которые необходимо оценить в процессе моделирования комбинированных технологий.

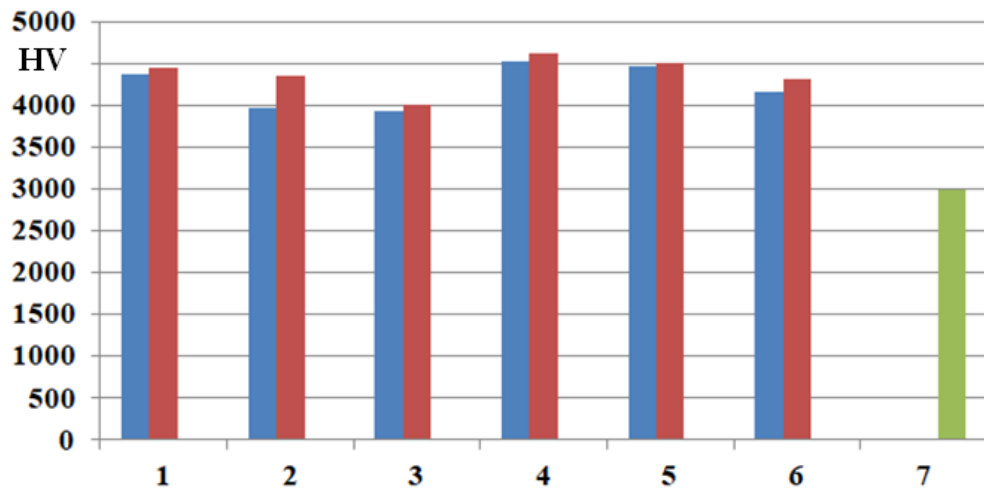
5.2 Результаты исследования комбинированной КЭМ технологии сварки с ВДУ

Для исследований воздействия различных типов инструментов для ВДУ на сварные швы пластин из стали 40Х моделировались задачи, в которых в качестве инструментов использовались: 1) стержневые ролики шириной 40 мм и диаметрами 10, 18 и 27 мм; 2) шары, диаметрами 18 и 27 мм; 3) стержни со сферическим торцом, диаметром 12 мм и высотой 18 мм. В случае получения глубоких отпечатков ударов инструмента в обрабатываемой заготовке и недопустимости из-за этого возможности дальнейшей обработки, выполнялась работа по составлению комбинаций из нескольких таких одновременно работающих инструментов по многоконтактной схеме ВДУ [36, 210].

В результате проведенных исследований установлено, что зоной термического влияния в сварной заготовке из стали 40Х являются области, расположенные слева и справа от оси сварного шва на расстоянии 18 мм. Таким образом, для воздействия на данную зону термического влияния, необходимо подвергнуть ВДУ участок шириной 40 мм. Другим условием проведения ВДУ является необходимость выполнения обработки за один проход инструмента. Выполнение данного условия необходимо для повышения производительности обработки, уменьшения риска появления краевых эффектов и наложения друг на друга краев упрочненных дорожек (исключение перенаклепа) в случае ВДУ зоны термического влияния за несколько проходов инструмента.

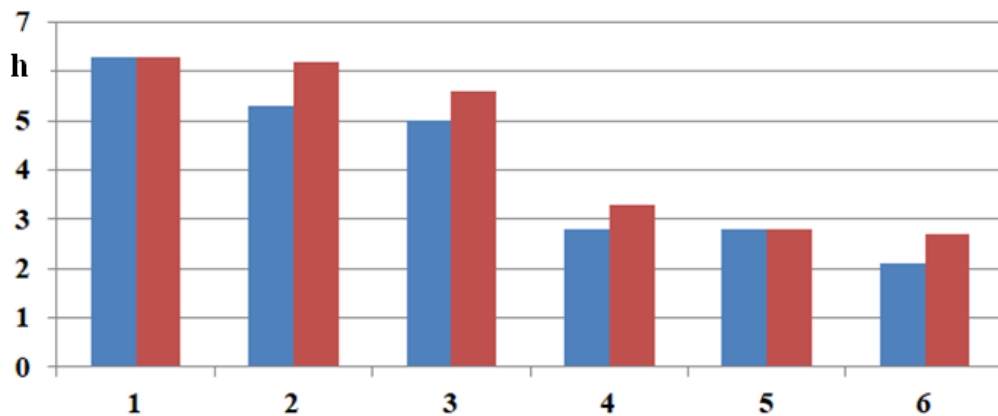
В результате исследований сварного шва без упрочнения установлено, что средняя твердость по толщине составила 3000 МПа. На упрочненной поверхности присутствуют растягивающие остаточные напряжения растяжения величиной 370

МПа, которые на глубине 6,5 мм начинают переходить в сжимающие, и на глубине 9,5 мм, достигают максимума -210 МПа (рисунок 5.9-5.12).



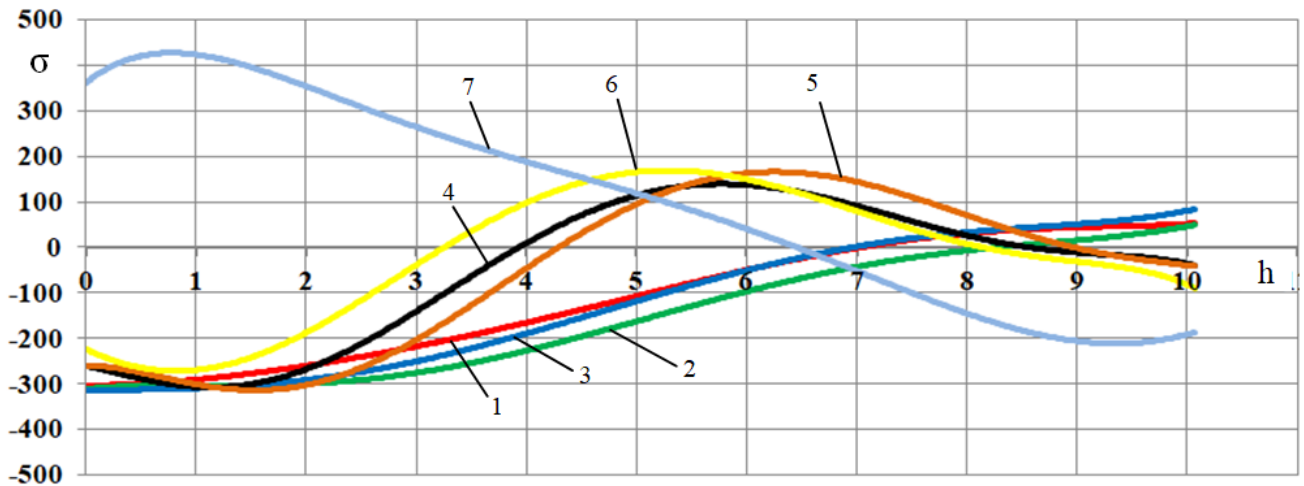
1 - Ролик Ø10 мм; 2 - ролик Ø 18 мм; 3 - ролик Ø 27 мм; 4 стержни со сферическим торцом Ø12 мм; 5 - шары Ø18 мм; 6 - шары Ø27 мм; 7 - сварной шов без упрочнения

Рисунок 5.9 - Максимальные значения микротвердости (HV, МПа)
полученные на поверхности сварного шва при его ВДУ с ■ - $K=0,3$; и с ■ - $K=0,6$



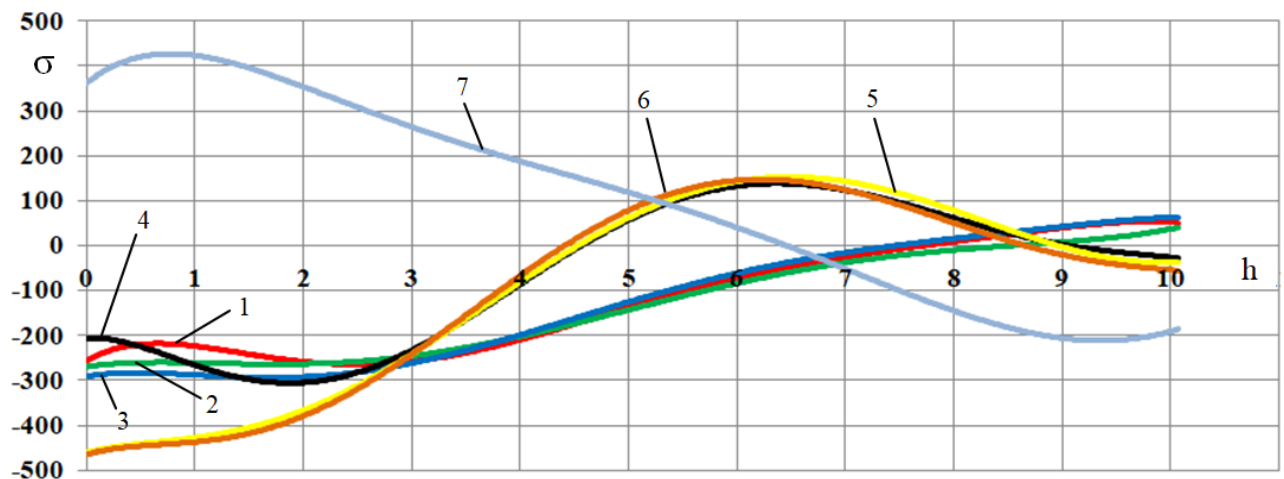
1- ролик Ø10 мм; 2- ролик Ø 18 мм; 3- ролик Ø 27 мм; 4- стержни со сферическим торцом Ø 12 мм; 5- шары Ø 18 мм; 6 - шары Ø 27 мм; 7 - сварной шов без упрочнения

Рисунок 5.10 - Максимальные значения глубин упрочнения (HV, МПа)
сварного слоя при его ВДУ с ■ - $K=0,3$; и с ■ - $K=0,6$



1 - ролик Ø 10 мм; 2 - ролик Ø 18 мм; 3 - ролик Ø 27 мм; 4 - стержни со сферическим торцом 12 мм; 5 - шары Ø 18 мм; 6 - шары Ø 27 мм; 7 - сварной шов без упрочнения

Рисунок 5.11 - Распределение остаточных напряжений (σ , МПа) по толщине сварного слоя (h , мм) при его ВДУ с $K=0,3$



1 - ролик Ø 10 мм; 2 - ролик Ø 18 мм; 3 - ролик Ø 27 мм; 4 - стержни со сферическим торцом 12 мм; 5 - шары Ø 18 мм; 6 - шары Ø 27 мм; 7 - сварной шов без упрочнения

Рисунок 5.12 - Распределение остаточных напряжений (σ , МПа) по толщине сварного слоя (h , мм) при его ВДУ с $K=0,6$

В результате ВДУ с $K=0,3$ роликами диаметрами 10, 18, 27 мм, по сравнению с неупрочненными сварными швами, микротвердость удалось повысить, соответственно, на 46; 32; 31%, и достичь глубины упрочнения 6,3; 5,3 и 5 мм (рисунок 5.9, 5.10).

В результате ВДУ с $K=0,3$ значения остаточных напряжений, на поверхности упрочнения шва, изменились с растягивающих $+370$ МПа на сжимающие -310 МПа (рисунок 5.11, 5.12). Применение роликов рассматриваемых диаметральных размеров не изменило величину полученных сжимающих напряжений на упрочненной поверхности шва. Переход сжимающих напряжений в растягивающие для роликов диаметрами 10 и 27 мм установлен на глубине 7 мм, а для роликов 18 мм – 8,2 мм. Максимум растягивающих остаточных напряжений $+50..70$ МПа, установленный с противоположной упрочнению стороны, также одинаков для всех роликов рассматриваемых диаметральных размеров.

При ВДУ сварных швов с $K=0,6$ роликами диаметрами 10, 18, 27 мм, по сравнению с $K=0,3$, микротвердость повысилась, соответственно, на 1,6; 9,5; 2%, а глубина упрочнения для ролика диаметром 10 мм осталась без изменений, а для остальных случаев повысилась, соответственно, на 17, и 12 %. Влияние рассматриваемых диаметральных размеров роликов при ВДУ с $K=0,6$ на остаточные напряжения практически не различимы и слились в одну линию на графике (рисунок 5.11). С упрочненной стороны величина остаточных напряжений сжатия составила $-250...-270$ МПа, что сравнимо со значениями, полученными при $K=0,3$. Переход в растягивающие напряжения расположен на глубине 7,5 мм, а максимум их значений $+40..50$ МПа расположен на поверхности, противоположной упрочняемой. Данные значения практически совпали с величинами остаточных напряжений, полученных при ВДУ с $K=0,3$ роликом диаметром 18 мм.

При заданных режимах ВДУ одним инструментом со сферическим торцом диаметром 12 мм, установлено его глубокое проникновение в упрочняемую поверхность, что делает невозможным реализацию процесса. Исходя из этого, для достижения принятой ширины упрочнения зоны термического влияния равной 40 мм, инструменты со сферическим торцом диаметром 12 мм устанавливались в два ряда в шахматном порядке в специальной оправке, в количестве 10 штук. За счет такого технического решения в результате ВДУ с заданными режимами, с $K=0,3$, удалось повысить по сравнению с неупрочненными сварными швами

микротвердость на 51%, и достичь глубины упрочнения 2,8 мм. Значения остаточных напряжений на упрочняемой поверхности шва, изменились с растягивающих +370 МПа на сжимающие -250 МПа. Максимальные величины остаточных напряжений -300 МПа находились на глубине 1...1,5 мм. В отличие от стержневых роликов, инструменты со сферическим торцом на глубине 4 и 8,5 мм наблюдается два перехода сжимающих напряжений в растягивающие. Значение остаточных напряжений сжатия на поверхности, противоположной упрочняемой, составило -40 МПа. Максимум растягивающих остаточных напряжений установлен на глубине 6 мм и составляет +130 МПа.

При ВДУ сварных швов с $K=0,6$ инструментами со сферическим торцом диаметром 12 мм, по сравнению с $K=0,3$, микротвердость повысилась, соответственно, на 1,8 %, а глубина упрочнения на 18 %. Распределение остаточных напряжений при ВДУ с $K=0,6$ по сравнению с $K=0,3$, отличается только вблизи упрочняемой поверхности. При ВДУ с $K=0,6$ по сравнению с $K=0,3$, остаточные напряжения сжатия уменьшились с -250 МПа до -210 МПа, а их максимум (-300 МПа) сместился с глубины 1...1,5 мм на глубину 1,5...2,2 мм.

При использовании для ВДУ инструментов – шаров, как и в случае инструментов со сферическим торцом, для обеспечения требуемой ширины упрочнения зоны термического влияния сварного шва, применялась их установка в шахматном порядке в специальной оправке. Шары диаметрами 18 и 27мм применялись в количестве 10 штук. Так, при ВДУ с $K=0,3$ шарами диаметрами 18 и 27 мм, по сравнению с неупрочненными сварными швами, удалось повысить микротвердость на 49 и 39%, и достичь глубины упрочнения 2,7 и 2,1мм, соответственно.

Благодаря применению при ВДУ в качестве инструментов шаров диаметрами 18 и 27 мм удалось изменить напряженное состояние: на упрочняемой поверхности вместо растягивающих остаточных напряжений +300 МПа формируются сжимающие, -260 МПа и -220 МПа, соответственно. Как и в случае применения инструментов со сферическим торцом, использование в качестве инструментов

шаров, так же привело в сечении шва к двойному переходу сжимающих напряжений в растягивающие. Такой переход у шаров диаметром 18 мм произошел на глубинах 4,3 и 9 мм, а у шаров диаметрами 27 мм – 3,3 и 8 мм. Значение остаточных напряжений сжатия на поверхности, противоположной упрочняемой, составило, для шаров 18 и 27 мм, соответственно, -45 и -95 МПа. Максимум растягивающих остаточных напряжений +180 МПа установлен для шаров 18 мм и 27 мм на глубине, соответственно, 6,3 и 5,2 мм.

При ВДУ сварных швов с $K=0,6$ шарами диаметрами 18 и 27мм, по сравнению с $K=0,3$, микротвердость повысилась, соответственно, на 1,1 и 3,7%, а глубина упрочнения выросла на 28,6% только для шаров диаметром 27 мм. При переходе с $K=0,3$ на $K=0,6$, характер кривой распределения остаточных напряжений по глубине сварного шва стал единым для рассматриваемых типоразмеров шаров. На поверхности упрочнения остаточные напряжения сжатия составили – 460 МПа. Двойной переход сжимающих напряжений в растягивающие в сечение сварного шва произошел на глубине 3,9 и 8,7 мм. Значение остаточных напряжений сжатия на поверхности, противоположной упрочняемой, составило для шаров 18 и 27 мм, соответственно, -45 и -55 МПа. Максимум растягивающих остаточных напряжений +140МПа обнаружен для шаров 18 мм и 27 мм на глубине 6,4 мм.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что:

- ВДУ можно использовать для повышения твердости, глубины упрочнения и обеспечения перехода растягивающих напряжений в сжимающие в сварных швах и околошовной зоне;

- 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 $K=0,6$;

- повышения прочности сварных швов толщиной до 10 мм без значительного снижения твердости (до 20%) после сварки, перспективно использовать стержневые ролики диаметром 10 мм и проводить ВДУ с $K=0,3-0,6$;

- если приоритетом является не повышение твердости, а получение в поверхностном слое сварного шва толщиной до 10 мм остаточных напряжений сжатия, необходимо использовать ролик диаметром 18-27 мм и применять ВДУ с $K=0,3$ [12].

5.3 Результаты исследования комбинированной КЭМ технологии наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ

5.3.1 Исследование закономерностей нагрева и охлаждения выращенных слоев, верификация тепловых потоков

Для контроля за происходящими тепловыми процессами необходимо выявить соответствие величин теплового потока в эксперименте и при моделировании. Для этого в рамках тепловой задачи необходимо провести исследование распределения тепловых полей в выращиваемых слоях, на примере материального примитива призматической формы, исходя из величины теплового потока.

Исследования проводились на стали 04X19H9. КЭМ создавалась по размерам экспериментально выращенного образца из выбранного материала. В КЭМ образец имеет длину 46 мм, ширину 22 мм, высоту 12 мм (рисунок 5.13, 5.14). Наплавка происходит за 6 слоёв. Согласно расчету 1 слой наплавляется за 23 секунды. Пауза между слоями 51 секунда. Перемещение фидстока между слоями – диагональное. Выращиваемый образец размещен на подложке и наплавочном столе. Для достижения цели исследований создано 5 моделей, с разным значением величин теплового потока: 10, 12, 14, 16, 18 Дж/мм³с. Сравниваются величины максимальной температуры на поверхности образца после завершения наплавки каждого слоя, после остановки работы наплавочной горелки.

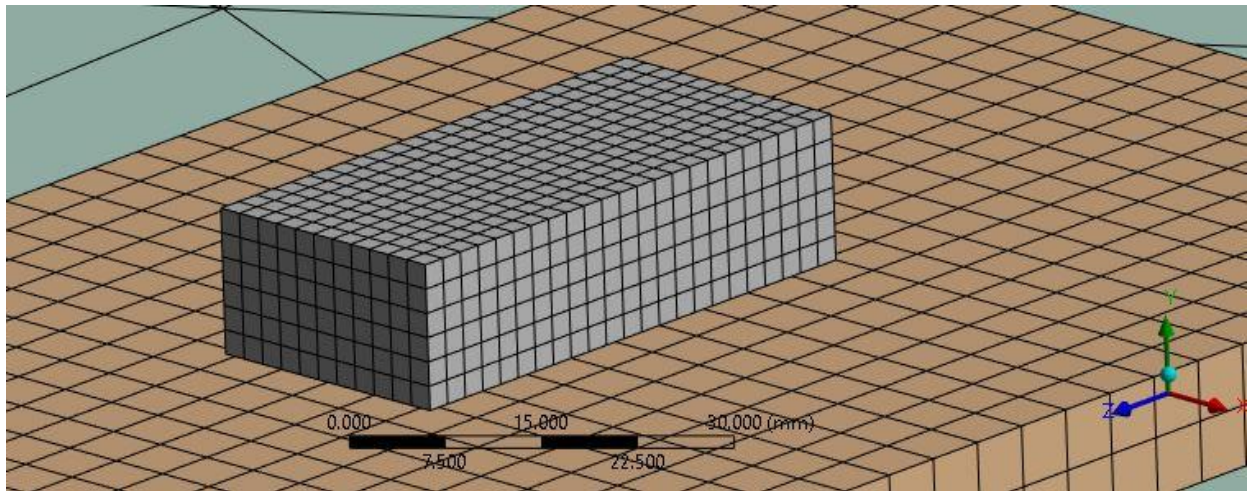


Рисунок 5.13 - Общий вид КЭМ призматического образца (сталь 04X19H9)

В результате моделирования определялось распределение температурных полей после остановки (паузы) работы наплавочной горелки, после синтеза каждого слоя призматического образца по ходу его наплавки (рисунок 5.15). Полученные в процессе моделирования значения величин максимальных температур на каждом слое сравнивались с экспериментальными значениями, установленными с применением тепловизора.

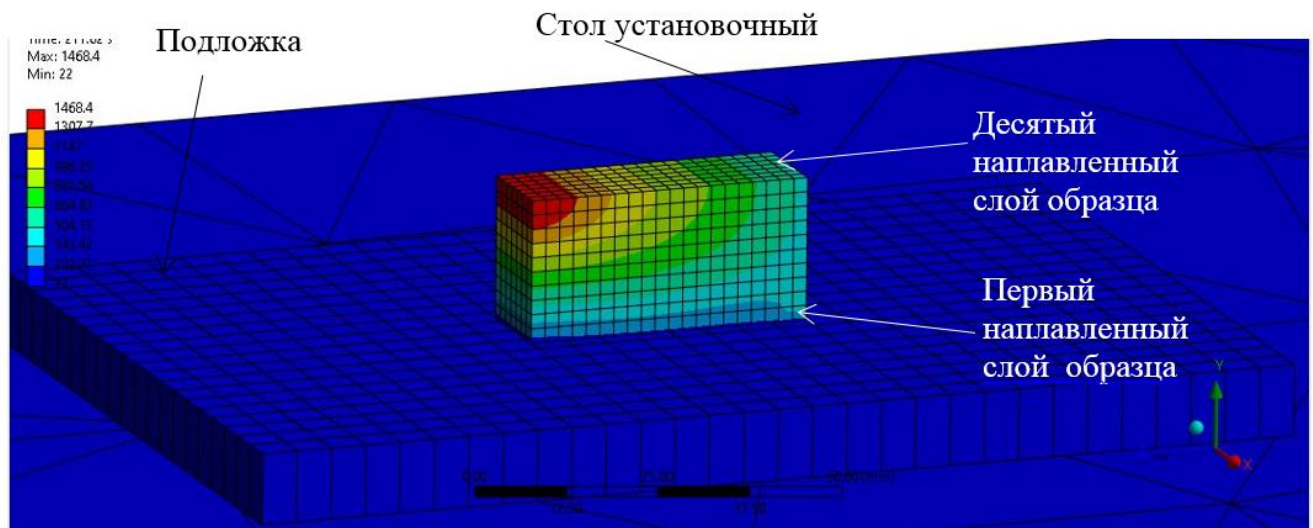


Рисунок 5.14 - КЭМ призматического образца после синтеза

На основании экспериментальных данных установлен объем единичной тепловой ячейки равный $87,4 \text{ мм}^3$. В КЭМ единичная тепловая ячейка имела размеры $22 \times 2 \times 2 \text{ мм}$.

Для того чтобы оценить какие величины тепловых потоков соответствуют реальным условиям эксперимента, полученные значения сравнены с данными реальных экспериментов, выполненных с применением тепловизора. Сравнение экспериментальных значений максимальных температур на каждом слое выращенного образца с данными моделирования, выполненных для стали 04X19H9 (пауза между слоями 51 секунда) представлены в таблице 5.1, 5.2.

Таблица 5.1

Временные рамки наплавки и паузы – охлаждения наплавленных слоев.

№	Время начала наплавки слоя, с	Время окончания наплавки слоя, с	Пауза наплавки до..., с
1 слой	0	23	74
2 слой	75	97	148
3 слой	149	171	222
4 слой	223	245	296
5 слой	297	319	370
6 слой	371	393	-

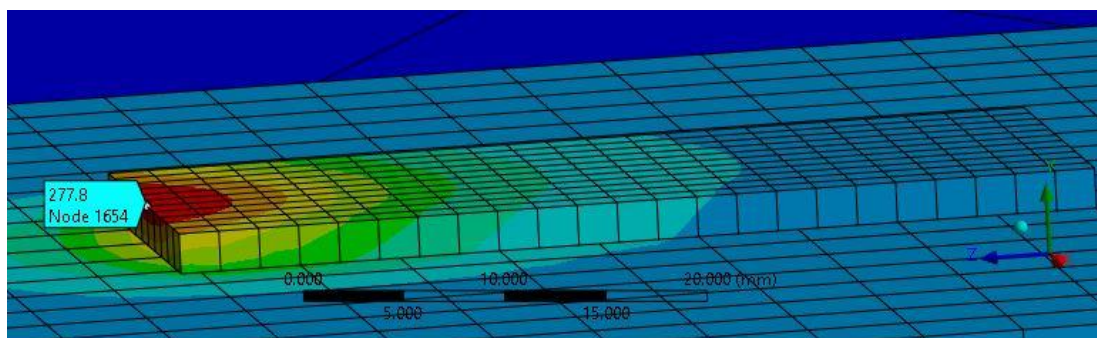
Таблица 5.2

Сравнение экспериментальных значений максимальных температур на каждом слое наплавленного образца с данными моделирования, выполненных для разных значений тепловых потоков (04X19H9), °C.

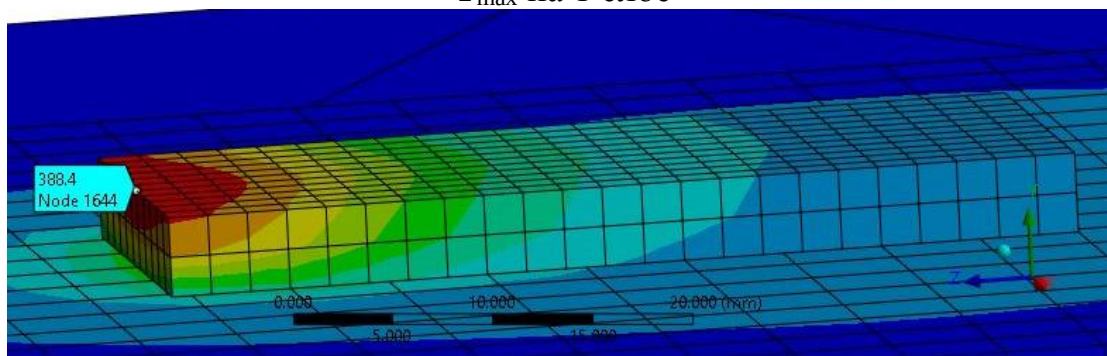
№ слоя	Экспер. значения	Моделируемые тепловые потоки, Дж/мм ³ с				
		10	12	14	16	18
1	258	233	277	321	383	427
2	390	338	388	438	489	541
3	482	392	451	507	562	616
4	512	481	553	626	698	773
5	580	524	608	698	772	855
6	580	531	614	698	784	871

Примеры распределения максимальных температур на поверхности наплавленных слоёв образца из стали 04X19H9 представлены на рисунке 5.16. В результате сравнения значений максимальных температур на каждом слое

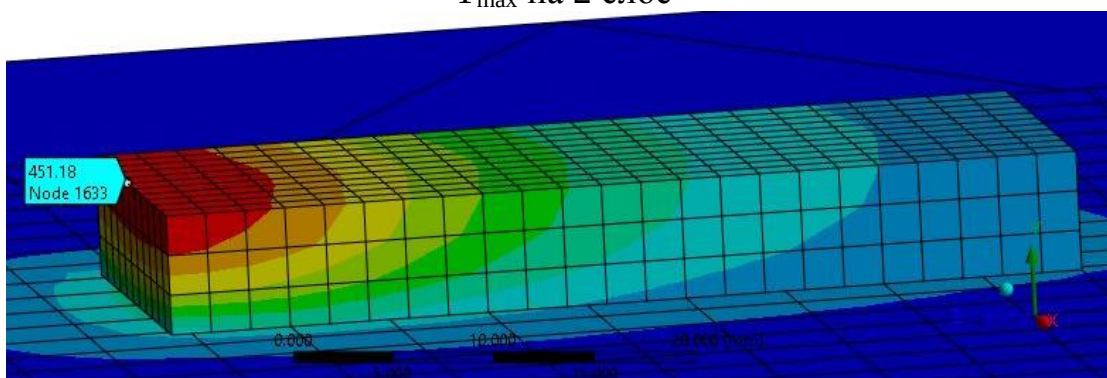
выращенного образца с данными моделирования, выполненных для разных значений тепловых потоков, установлено, что при моделировании тепловой поток 12 Дж/мм^3 является наиболее близким к экспериментальным данным, максимальная погрешность в единичных точках не превышала 10%. Тепловой поток 12 Дж/мм^3 будет в дальнейшем использоваться для проведения расчетов.



$T_{\max}$ на 1 слое

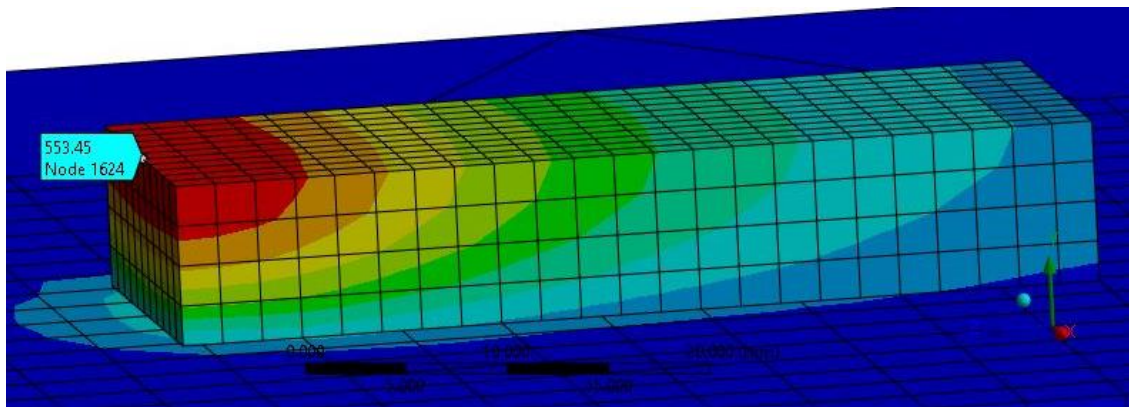


$T_{\max}$ на 2 слое

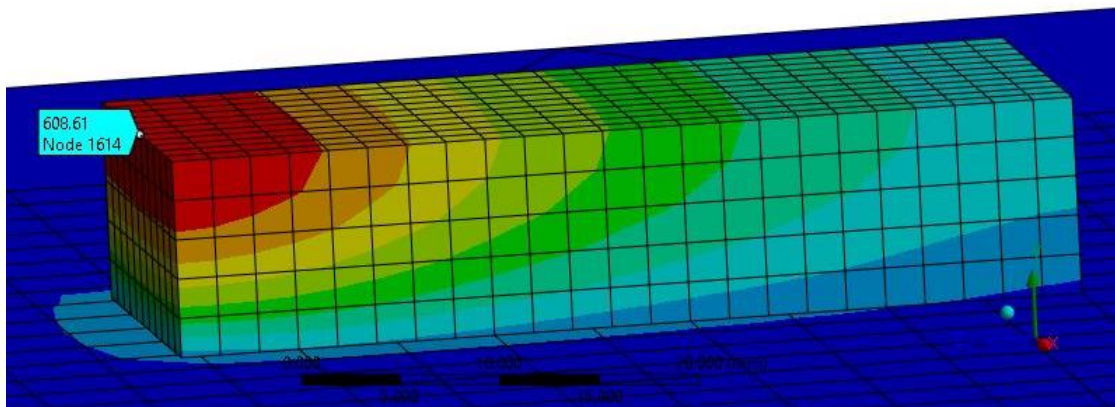


$T_{\max}$ на 3 слое

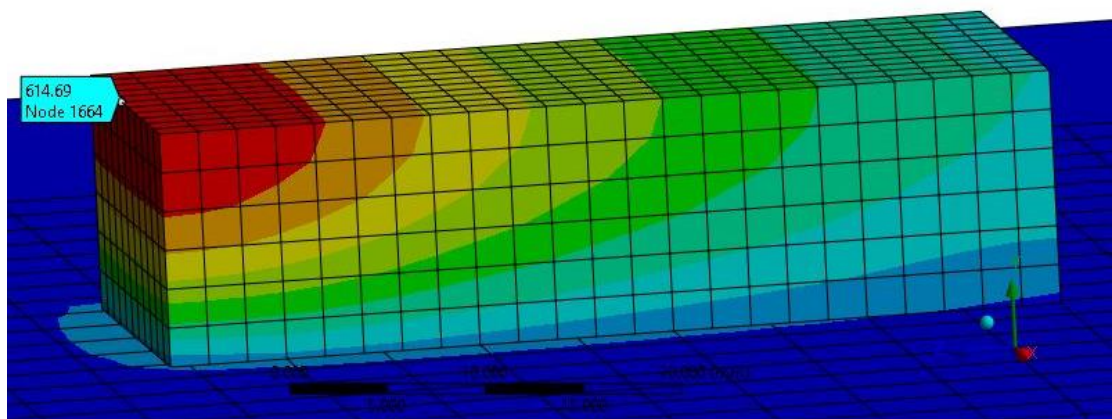
Рисунок 5.15 - Начало



$T_{\max}$ на 4 слое



$T_{\max}$ на 5 слое



$T_{\max}$ на 6 слое

Рисунок 5.15 - Примеры распределения максимальных температур ($T_{\max}$) стали 04X19Н9 после 51 секунды остановки работы фидстока на поверхности наплавленных слоёв, тепловой поток 12 Дж/мм³с

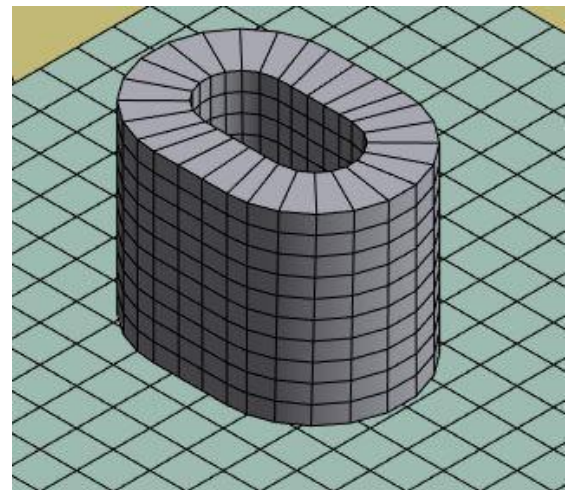
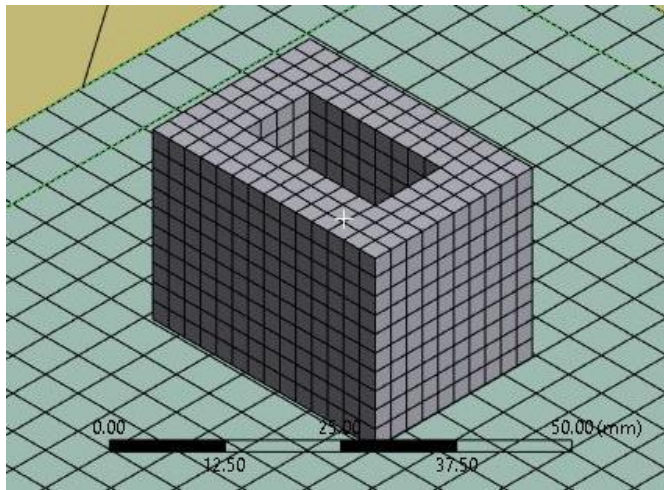
Тепловые потоки от 14 - 18 Дж/мм³ при синтезе создают на поверхности наплаваемого слоя температуры, превышающие температуру плавления стали 04X19Н9 - более 1500°C, что на практике сопровождается нарушением геометрии выращенного изделия по причине вытекания наплавленного материала. При тепловом потоке 10 Дж/мм³ не достигаются значения температур,

соответствующие температуре плавления. Поэтому данные значения не будут использованы для дальнейшего моделирования.

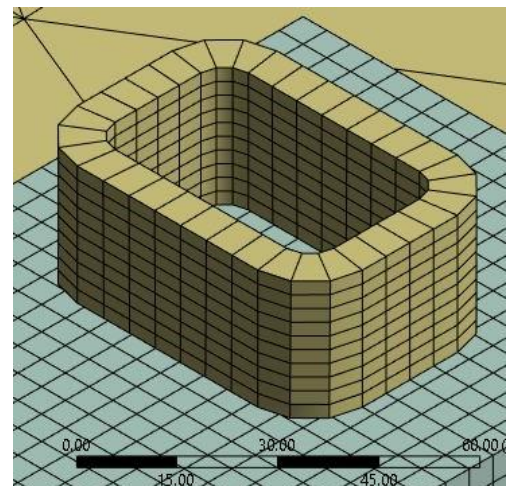
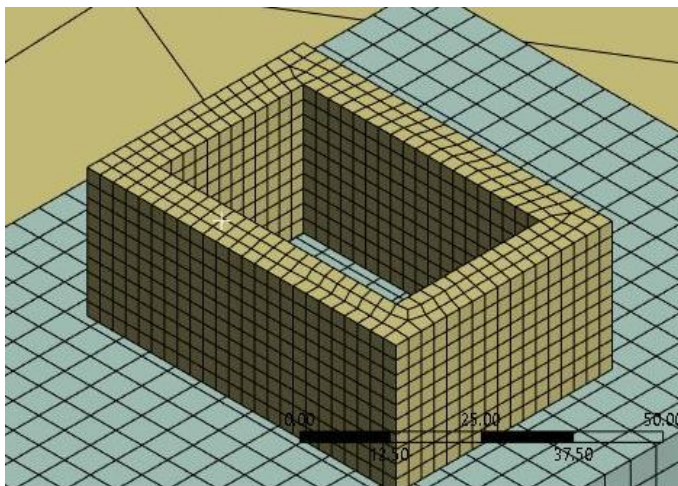
5.3.2 Исследование влияния формы выращенного изделия на распределение температурных полей

Исследование влияния формы выращенного изделия на распределение температурных полей проводились на примере коробчатых и цилиндрических оболочек отличных по объему наплавляемого материала: $V_1=15$ тыс. мм³; $V_2=30$ тыс. мм³; $V_3=45$ тыс. мм³. Исследования проводились на стали 04X19H9. Все КЭМ имели одинаковую высоту 25 мм и толщину стенки 7 мм. Производилась наплавка десяти слоёв. Пауза между наплавкой слоев составляла 1 секунду. Данные по величинам единичного наплавочного объема (87 мм³) и величине теплового потока (12 Дж/мм³) взяты из пункта 5.3.1.

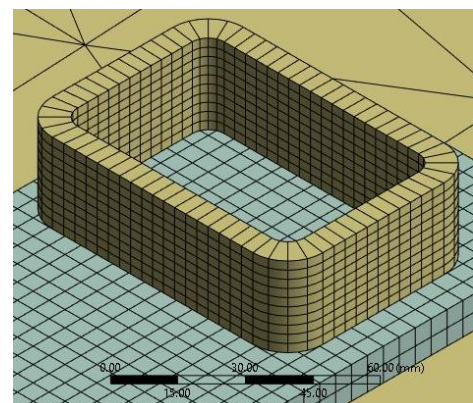
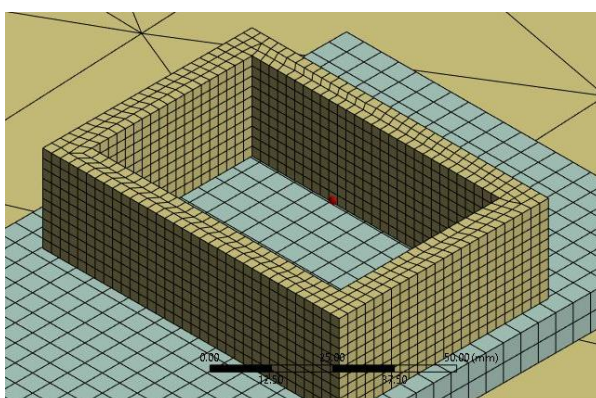
Для исследований использовались оболочки (образцы) цилиндрических и коробчатых форм. В результате эксперимента было создано 18 конечно-элементных моделей с разными объёмами наплавляемых материалов и их марок (рисунок 5.17-5.20). Примеры распределения температурных полей в цилиндрических и коробчатых оболочках представлены на рисунках 5.17 и 5.18. Для равномерной разбивки и последующего нагрева конечно-элементной сетки во внутренних и внешних углах коробчатых оболочек созданы радиусные элементы. Коробчатые оболочки с радиусными элементами и без них представлены на рисунке 5.17. В результате моделирования оценивалось распределение температурных полей при синтезе цилиндрических и коробчатых оболочек разных объемов, при этом для одного и того же материала значение задаваемого теплового потока было постоянным. Это позволило оценить распределение максимальных и минимальных температур по наплавляемым слоям и высоте выращенного изделия, а также оценить время нахождения элементарных объемов материала в различных температурных диапазонах в каждом выращенном слое.



a)



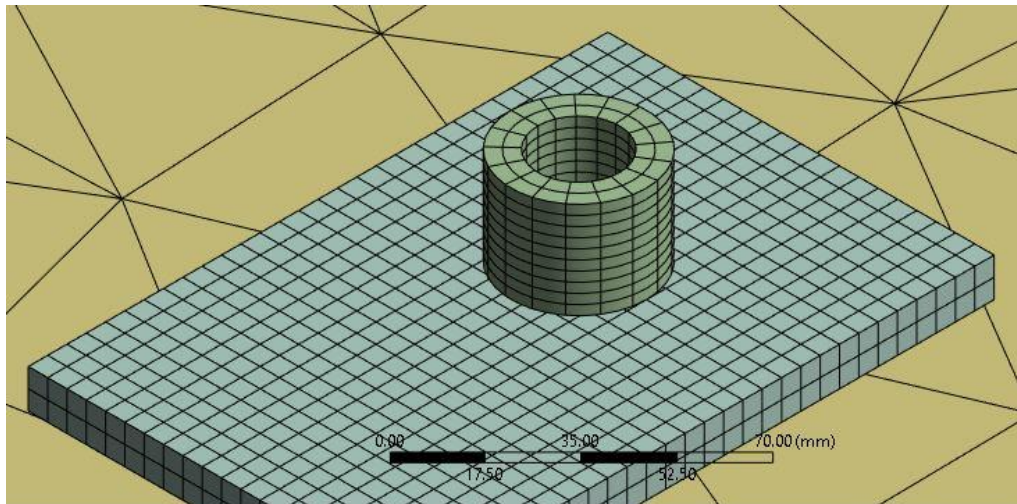
б)



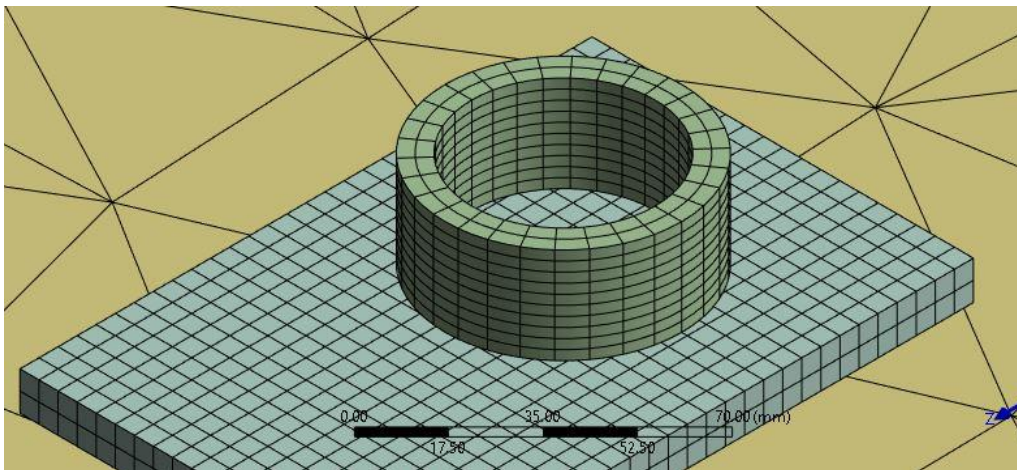
в)

$a - V1 = 15 \text{ тыс } \text{мм}^3$; $б - V2 = 30 \text{ тыс } \text{мм}^3$;
 $в - V3 = 45 \text{ тыс } \text{мм}^3$

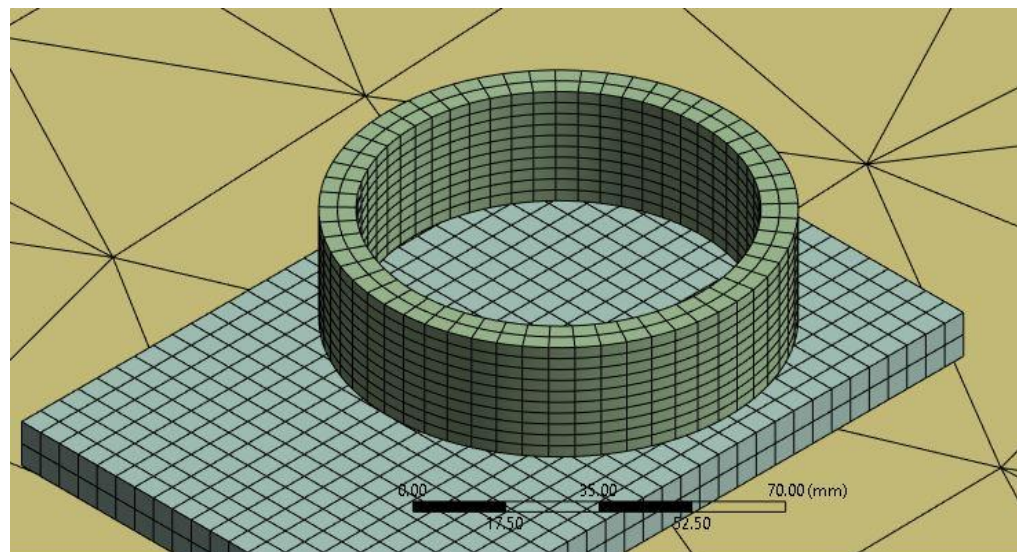
Рисунок 5.17 – Примеры коробчатых оболочек (стали 04X19Н9) наплавленных объемов материала



а)



б)



в)

а - $V1=15$ тыс мм^3 ; б - $V2=30$ тыс мм^3 ; в - $V3=45$ тыс мм^3

**Рисунок 5.18 – Примеры цилиндрических оболочек (стали 04X19Н9),
направляемых объемов материала**

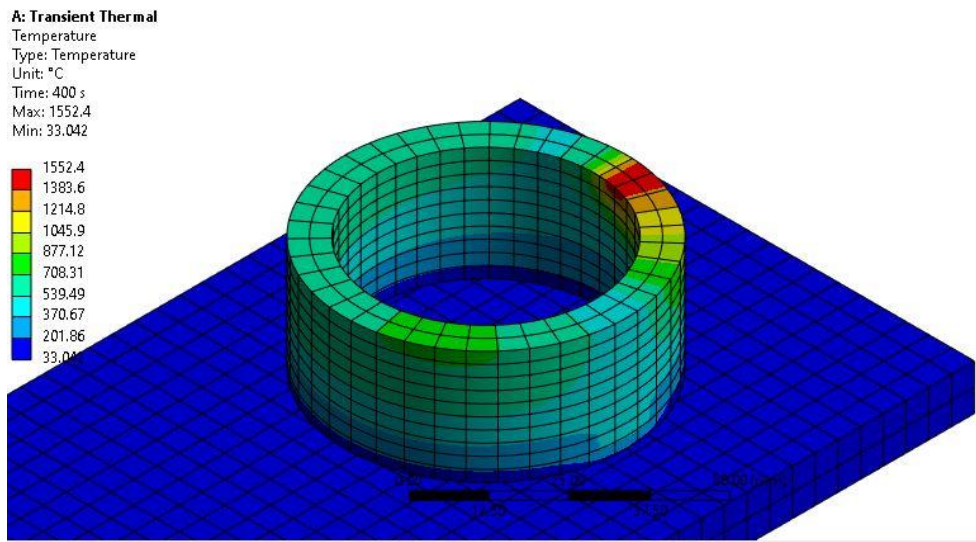


Рисунок 5.19 – Пример распределения температурных полей в цилиндрической оболочке объемом $V_2=30$ тыс. мм³ на последней секунде работы наплавочной горелки

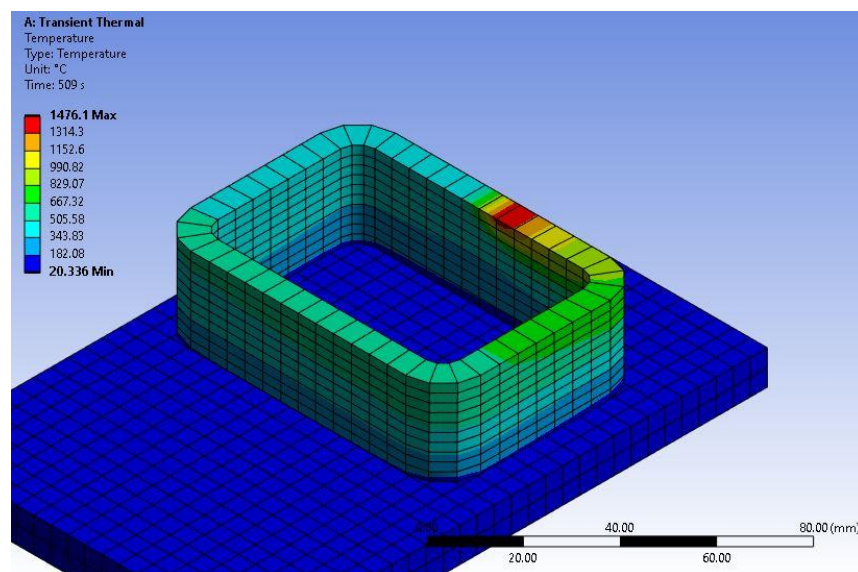


Рисунок 5.20 - Распределение температурных полей в коробчатой оболочке объемом $V_3=45$ тыс. мм³ на последней секунде работы наплавочной горелки

Определение величин максимальных температур позволяет выявить условия существования наплавленного материала в жидкой фазе, так как при ее достижении происходит стекание жидкого металла с наплавляемой поверхности и нарушение геометрической точности образца.

Определение минимальной температуры позволяет оценить скорость охлаждения и выявить объемы материала, находящиеся в той или иной стадии остывания в зависимости от высоты выращенного изделия.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Отвод тепла происходит не только позади, но и перед движущимся источником тепла. Такой характер перераспределения тепла соответствует неподвижному источнику или источнику со сравнительно малой скоростью перемещения.

2. Установлено, что увеличение объемов наплавляемого материала в 3 раза приводит к снижению среднего значения максимальной температуры на последнем наплавляемом слое ($T_{\max}$), соответственно, у цилиндрических и (коробчатых) оболочек: из стали 04X19H9 на 382°C (509°C).

3. Установлено, что для стальных образцов из 04X19H9 цилиндрическая форма оболочки по сравнению с коробчатой приводит к снижению $T_{\max}$ для: V1 на 323°C для; V2 на 250°C ; V3 на 196°C .

4. Исходя из того, что температура плавления 04X19H9 составляет $1450\text{--}1500^{\circ}\text{C}$, установлена возможность «стекания» наплавленных объемов материала у цилиндрических оболочек на объемах V1 и V2; на коробчатых – на всех рассматриваемых материалах с V1 и V2.

5. Скорость охлаждения и, соответственно, интенсивность отвода тепла всегда выше при синтезе нескольких первых слоев вследствие высокого температурного градиента между расплавленным металлом и подложкой. На этом этапе принудительное охлаждение не дает положительного эффекта, а на материалы с максимально высокой теплопроводностью действует отрицательно. В процессе последующего синтеза и увеличения количества слоев температурные градиенты уменьшаются, температуры выравниваются, а тепловые потоки стабилизируются. На этом этапе принудительное охлаждение наиболее эффективно. Дальнейший рост образца для сохранения оптимального градиента

температур требует либо увеличения интенсивности охлаждения, либо пауз в синтезе слоев. Если такая возможность не предусмотрена, выращенный металл, вследствие эффекта накопления тепла, перегревается, растекается, нарушая заданную геометрическую точность образца, вплоть до катастрофического вытекания больших объемов наплавленного металла по всей высоте стенки.

5.3.3 Исследование влияния размеров установочного стола на температурные поля при синтезе оболочек разных размеров

Для количественной оценки влияния размеров установочного стола на формируемые температурные поля в выращенном изделии использовалось отношение объемов установочного стола (V_c) и выращенного изделия (V_i).

При проведении исследований данное отношение V_c/V_i взято в диапазоне от 10 до 300, а за базовый диаметр установочного стола взят равным 500мм (рисунок 5.21). Затем проводилась оценка влияния диаметра установочного стола (при постоянстве его объема в выбранных диапазонах) на распределение температурных полей (рисунок 5.22-5.23) в выращенном изделии в диапазоне от 250мм до 750мм (рисунок 5.24).

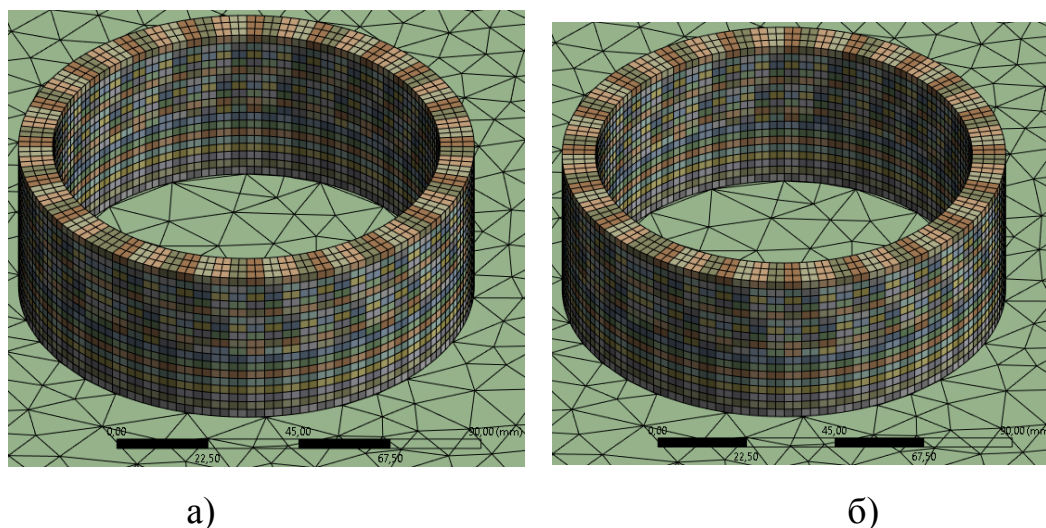


Рисунок 5.21 - Конечно-элементная модель синтеза изделия «кольцо»

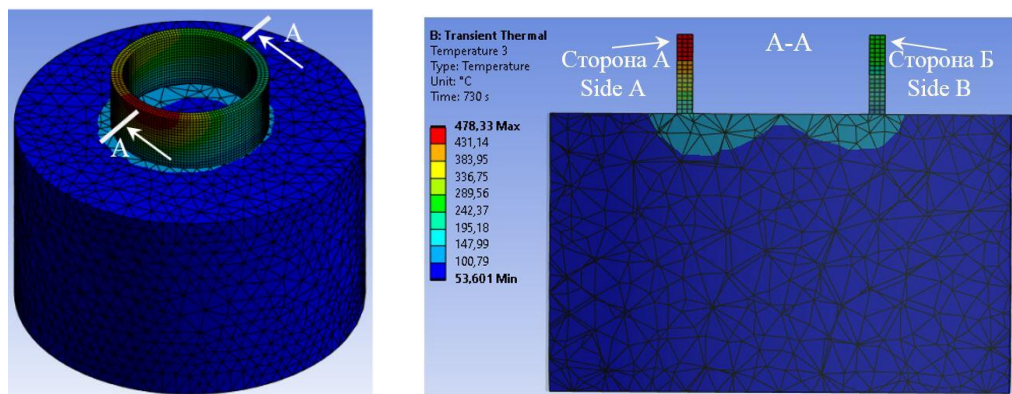
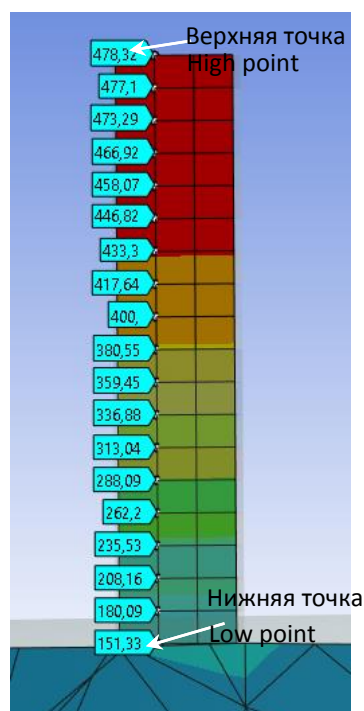
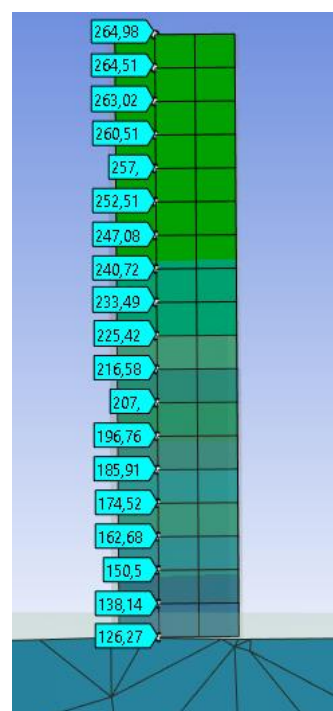


Рисунок 5.22 - Сечение А-А КЭМ

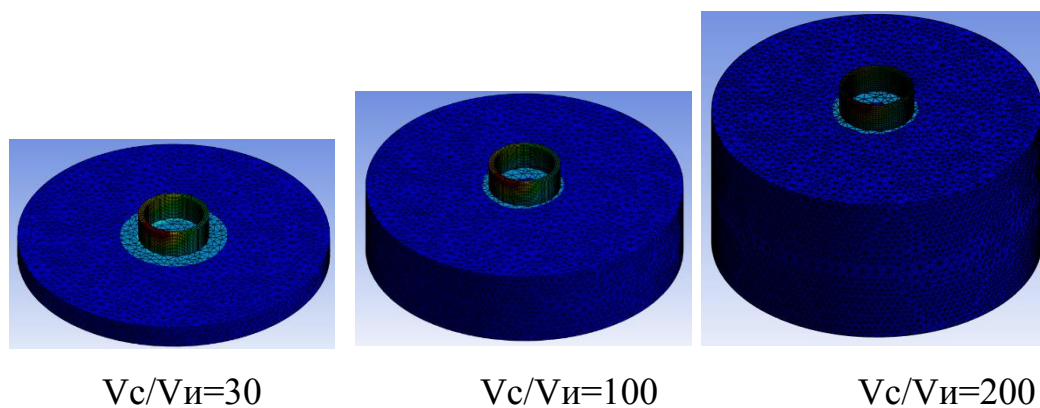


Сторона А Side A



Сторона Б Side B

Рисунок 5.23 - Стороны сечения А-А со значениями распределения температур, °С

Рисунок 5.24 - Примеры отношений $V_c/V_{и}$ (стола Ø500мм)

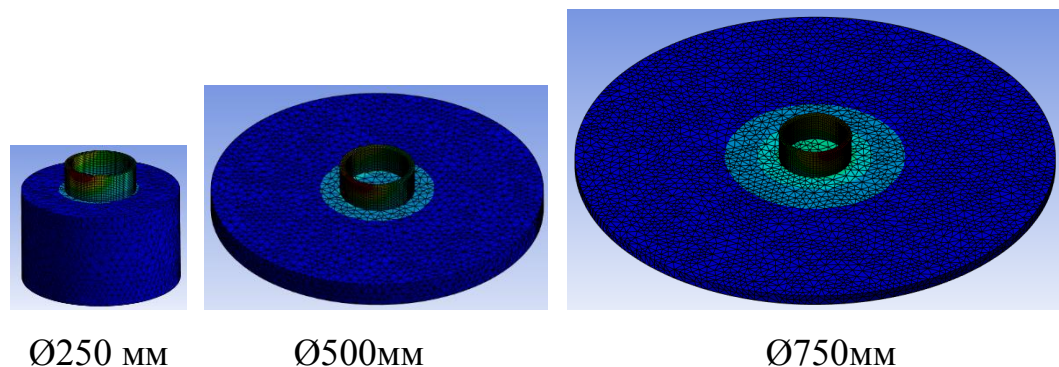


Рисунок 5.25 - Пример разных диаметров установочных столов при $V_c/V_{и}=30$

На первом этапе исследовалось влияние отношения объемов установочного стола (V_c) и выращенного изделия ($V_{и}$) в диапазоне от 10 до 300. В результате моделирования, по значимости влияния на распределение температурных полей, отношение $V_c/V_{и}$ можно разделить на три диапазона: 1) $10 \leq V_c/V_{и} \leq 30$; 2) $30 \leq V_c/V_{и} \leq 75$; 3) $75 \leq V_c/V_{и} \leq 300$.

В первом диапазоне $10 \leq V_c/V_{и} \leq 30$ уменьшение отношения объемов $V_c/V_{и}$ значительно повлияло на распределение температур по высоте выращенного изделия, например, в верхней точке: на стороне А ~ со 710°C до 520°C , на стороне Б ~ со 500°C до 300°C .

Во втором диапазоне $30 \leq V_c/V_{и} \leq 75$ установлено менее значимое влияние отношения $V_c/V_{и}$ на распределение температурных полей по высоте наплавленного изделия, например, для верхней точки стороны А ~ со 520°C до 470°C , стороны Б ~ со 300°C до 260°C .

В третьем диапазоне распределение температурных полей $75 \leq V_c/V_{и} \leq 300$ по высоте наплавленного изделия практически не отличались друг от друга, например, в верхней точке: на стороне А со 470°C до 460°C , на стороне Б со 260°C до 255°C . Данные значения говорят о том, что диапазон отношений $75 \leq V_c/V_{и} \leq 300$ в полном объеме поглотил тепловой поток от наплавленного изделия, а полученное распределение температурных полей можно считать за базовое и в дальнейшем использовать для сравнения.

Для более наглядного представления о влиянии отношения $V_c/V_{и}$ на распределение температурных полей необходимо установить их взаимосвязь с распределением температур в крайних точках по высоте выращенного изделия рассматриваемых сторон А и Б. Для этого взяты отношения температур крайней верхней точки и крайней нижней точки. Затем вычисленные отношения стороны А отнесены к значениям стороны Б и таким образом получен безразмерный коэффициент X . Зависимость коэффициента X от отношения $V_c/V_{и}$ представлена на рисунке 5.27. Данный график позволяет установить допустимые верхние и нижние границы коэффициента X .

Так, верхней границей можно считать $X=1,3$, так как при значении отношений $75 \leq V_c/V_{и} \leq 300$ не повлияло на распределение температурных полей. Поэтому, при синтезе рассматриваемой детали не целесообразно использовать столы с отношением $V_c/V_{и}$ более 75-100 это сильно завышает металлоемкость, вес, стоимость, габариты установочного стола.

Нижней границей является значение $X=1$, соответствующее $V_c/V_{и}=30$. Данное ограничение связано с получением на стороне Б (месте начала упрочнения) температуры 300°C , которая рекомендована для начала процесса волнового деформационного упрочнения большинства сталей и не связана с началом рекристаллизации, что положительно влияет на эффективность деформационной обработки.

Для определения влияния диаметральных размеров стола на температурные поля проведены исследования, в которых взяты значения крайних точек $X=1$ и $X=1,3$ и соответствующие им отношения $V_c/V_{и}=30$ и $V_c/V_{и}=100$, а для расширений рассматриваемого диапазона и подтверждения незначимости отношения $V_c/V_{и}>100$ на процесс распределения температурных полей, взято отношение $V_c/V_{и}=200$ (которое также соответствует $X \sim 1,3$). Для выбранных отношений $V_c/V_{и}$ ($V_c=\text{const}$) созданы столы диаметрами 250, 500 и 750мм. В результате синтеза установлены следующие распределения температурных полей по высоте изделия исходя из диаметра установочного стола.

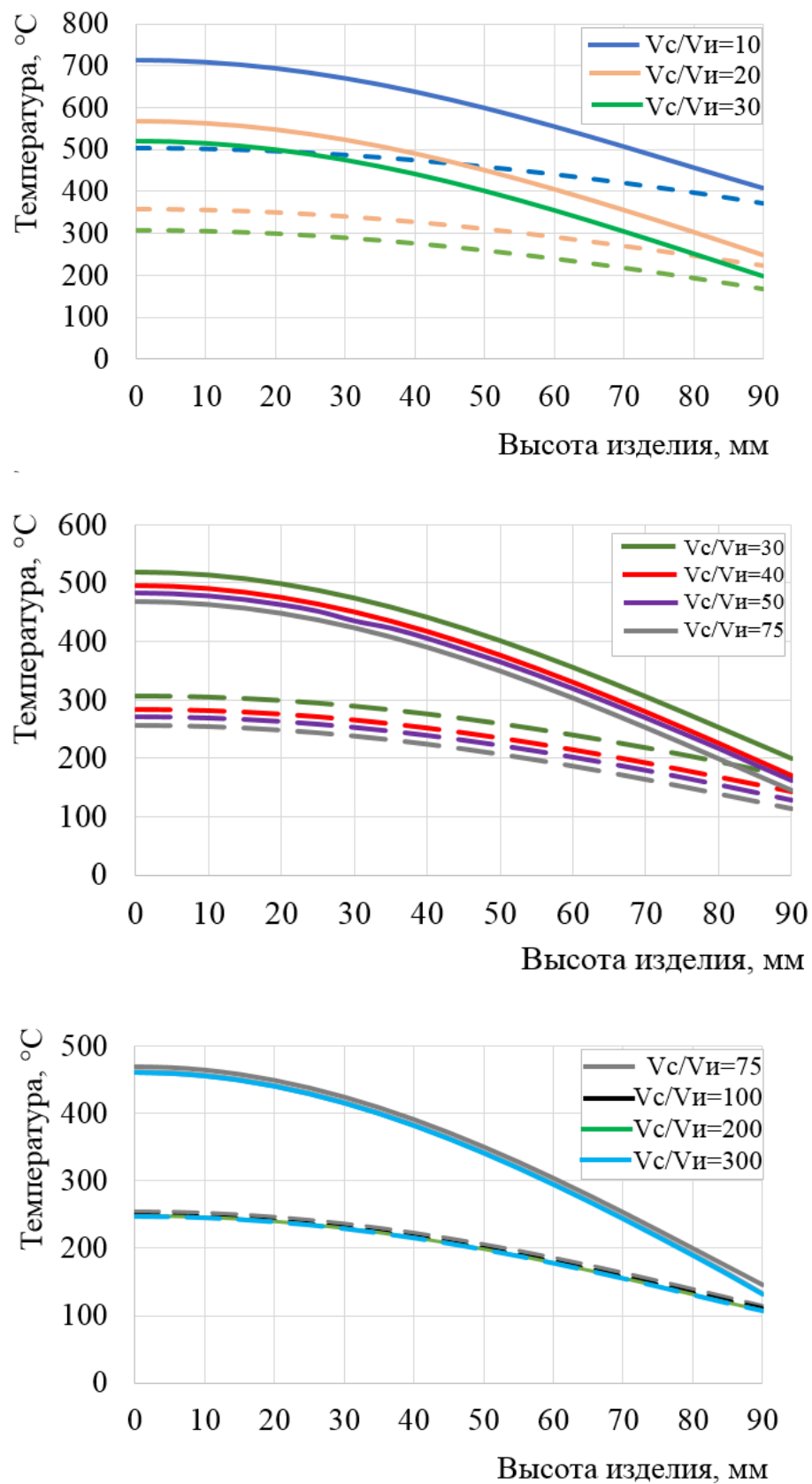


Рисунок 5.26 – Распределение температурных полей в выращенном изделии исходя из отношения $V_c/V_{и}$

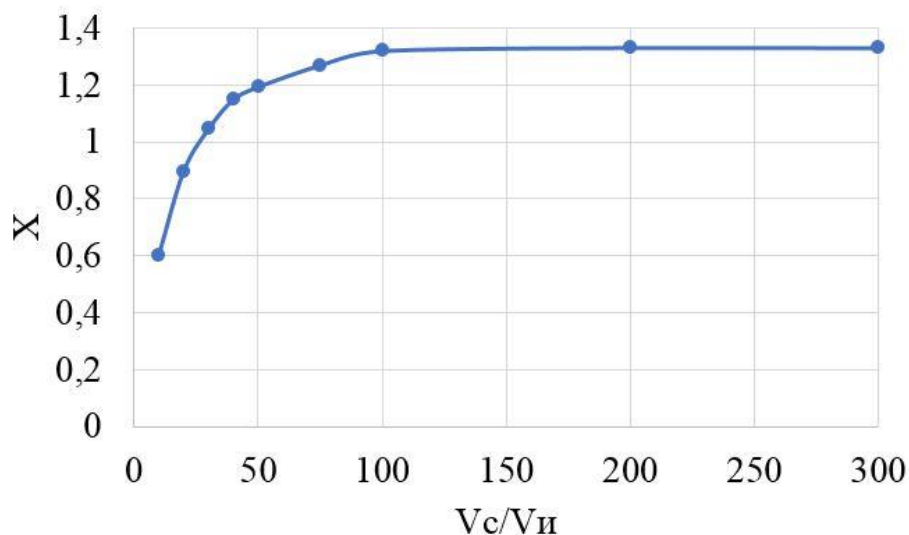


Рисунок 5.27 - Зависимость коэффициента X от отношения $V_c/V_{и}$

При $V_c/V_{и}=30$ уменьшение диаметра стола с 500 до 250 мм привело к уменьшению температуры в крайней верхней точке: с 520°C до 480°C (сторона А) и с 300°C до 270°C (сторона Б). При этом увеличение диаметра с 500 до 750 мм привело к росту температуры в верхней точке с 520°C до 640°C (сторона А) и с 300°C до 430°C (сторона Б) (рисунок 5.28).

При $V_c/V_{и}=100$ и 200 изменение диаметров в тех же диапазонах мало повлияло на изменение температур, всего на 10-20°C на сторонах А и Б.

Таким образом, в диапазоне $V_c/V_{и}=30$ при неизменном объеме установочного стола, увеличение его диаметра с 500 до 750 мм приводит к повышению температур на 120-130°C в верхней точке выращенного изделия, а уменьшение диаметра с 500 до 250 мм приводит к снижению температуры на 30-40°C. Это позволяет сделать вывод, что тепловые потоки при синтезе изделия более интенсивно отводятся по глубине и менее интенсивно в диаметральном направлении установочного стола.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложен параметр X и выявлена зависимость, описывающая взаимосвязь распределения температурных полей по высоте выращиваемого изделия и отношения объемов установочного стола и выращенного изделия.

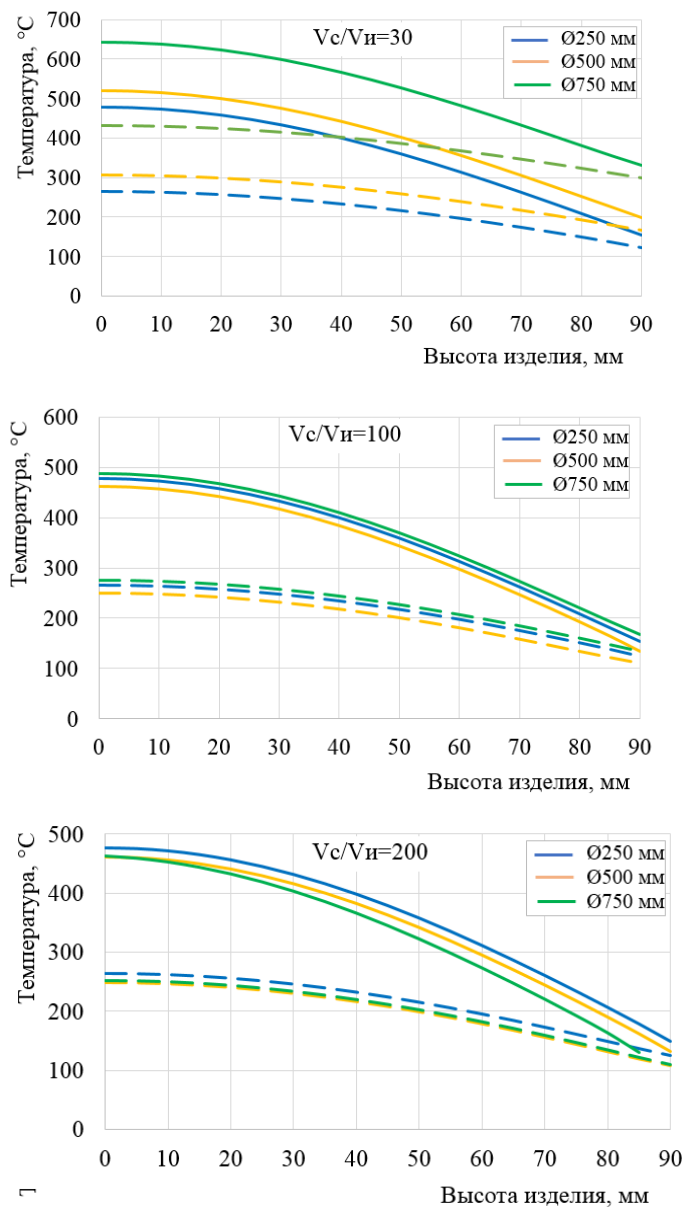


Рисунок 5.28 – Распределения температурных полей по высоте выращенного изделия исходя из диаметра установочного стола и отношения V_c/V_h

2. На основании разработанной методики оптимизации габаритных размеров установочного стола при аддитивном синтезе изделий методом WAAM/3DMP определены отношения $30 \leq V_c/V_h \leq 100$, позволяющие выращивать изделие без его дополнительного охлаждения и завышения габаритов стола.

3. Установлено, что в диапазоне $V_c/V_h=30$ при неизменном объеме установочного стола, увеличение его диаметра с 500 до 750 мм приводит к

повышению температур на 120-130°C в верхней точке наплавленного изделия, а уменьшение диаметра с 500 до 250 мм приводит снижению температуры на 30-40°C. Это позволяет сделать вывод, что тепловые потоки от выращенного изделия более интенсивно отводятся по глубине и менее интенсивно в диаметральном направлении установочного стола.

4. Установлено, что в диапазоне $V_c/V_{и} > 100$ изменение диаметра установочного стола практически не повлияло (10-20°C) на изменение тепловых потоков в выращенном изделии [98].

5.3.4 Определение влияния остановки работы наплавочной горелки на время начала ВДУ в процессе межслойного перехода при синтезе

Известно, что при синтезе изделий методом 3DMP температура при выращивании изделия не должна, с одной стороны, быть больше температуры плавления, так как это может привести к формированию на созданной поверхности ванны жидкого металла, которой в дальнейшем за счет вытекания способен разрушить выращиваемую стенку. С другой стороны, в случае применения комбинированной технологии – наплавки и последующего деформационного упрочнения, необходимо обеспечить формирование общей температуры в наплавленном изделии не превышающей температуру начала рекристаллизации для сохранения эффекта от применения волнового деформационного упрочнения.

Ранее установлено, что на распределение температурных полей, кроме размеров наплавочного стола, объема наплавленного материала так же может оказывать влияние время остановки работы наплавочной горелки (технологических пауз T_p) при переходе с одного слоя на другой.

Целью исследований является установить влияние времени технологических пауз на распределение температурных полей и выявление допустимых температурных и временных условий для проведения ВДУ выращенного изделия.

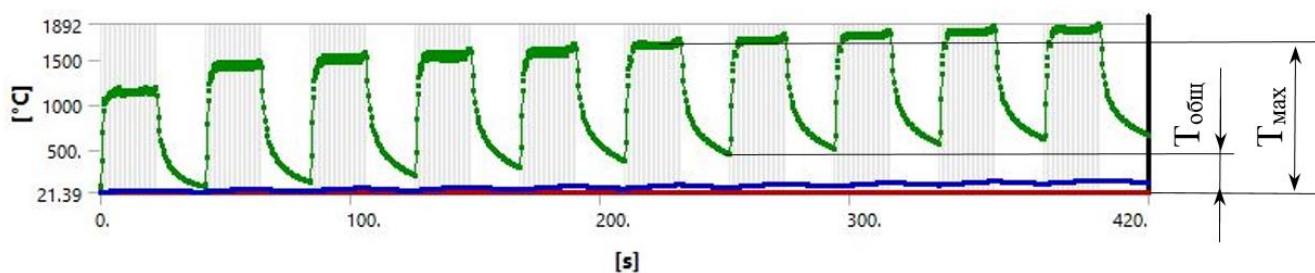
Исследования проводились с использованием разработанной КЭМ (тепловая задача). Выращиванию подвергались оболочки цилиндрической формы из

материала стали 04X19H9, имеющей три разных объема выращиваемого материала: $V1=15$ тыс. мм³ ($\varnothing_{\text{нар}} 35$ мм); $V2=30$ тыс. мм³ ($\varnothing_{\text{нар}} 62$ мм); $V3=45$ тыс. мм³ ($\varnothing_{\text{нар}} 90$ мм). Все КЭМ имели одинаковую высоту 25 мм и толщину стенки 7 мм. Производилась наплавка десяти слоёв. Данные по величинам единичного наплавочного объема (87 мм³) и величине теплового потока (12 Дж/мм³) взяты из пункта 5.3.1. При синтезе, на стадии перехода между слоями выполнялась технологическая пауза – остановка наплавочной горелки. Время T_p варьировалось в диапазоне от 5 до 90 (150) секунд. В ходе исследований оценивались: максимально достижимая температура; общая температура нагрева выращенного изделия (оставшаяся температура в наплавляемом слое изделия после прекращения работы наплавочной горелки); максимальная температурная вспышки в одной и той же точке на каждом слое после прохождения наплавочной горелки; время, в течении которого после прохождения горелки, на поверхности каждого слоя держится температура более 400°C.

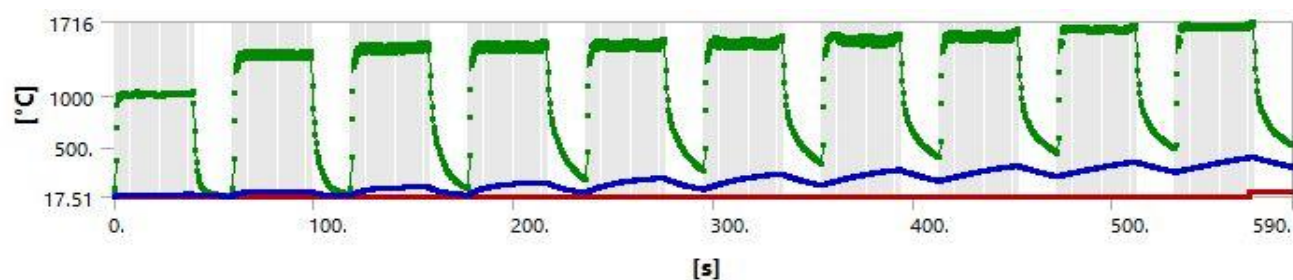
Так как температура плавления стали 04X19H9 составляет 1450-1500°C, то данный диапазон будет являться ограничением значений максимально достижимой температуры при нагреве ($T_{\text{мах}}$). Вторым ограничивающим критерием является накопленная в изделии в процессе синтеза температура ($T_{\text{общ}}$), которая для сохранения эффекта от ВДУ не должна превышать температуру начала рекристаллизации для выбранной марки стали 400°C.

Пример распределения тепловых потоков после синтеза 10 слоёв и паузой между слоями 20 секунд в изделиях для разных наплавочных объемов представлен на рисунке 5.29.

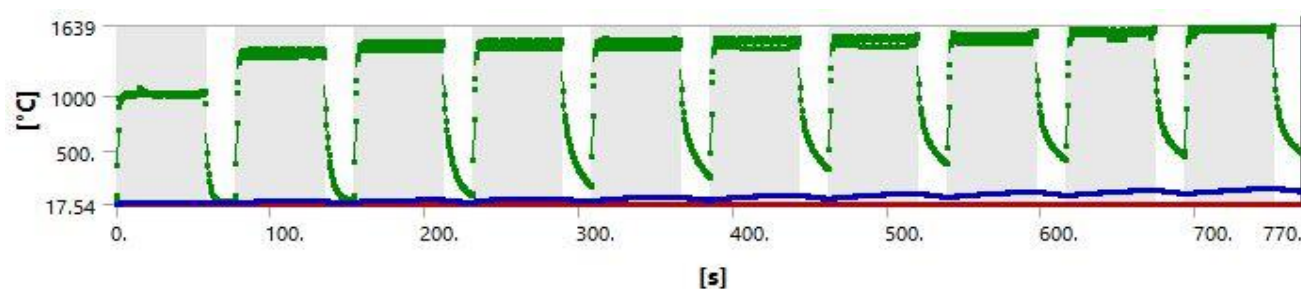
На рисунке 5.30. показаны точки (Temperature Probe) определения на модели времени действия и величин температурных вспышек в наплавленных слоях выращенного изделия после прохождения по ним (над ними) наплавочной горелки.



а)



б)



в)

а - объемом $V1=15$ тыс. мм^3 ; б - $V2=30$ тыс. мм^3 ; в - $V3=45$ тыс. мм^3

Рисунок 5.29 - Графики распределения тепловых потоков после синтеза 10 слоёв и паузой между слоями 20 секунд в изделиях

Результаты исследования распределения максимально достижимых значений температур (T_{max}) и величин общего нагрева ($T_{\text{общ}}$) слоёв наплавленного изделия для трех рассматриваемых объёмов материала представлены в таблицах 5.2-5.4. На основании анализа результатов моделирования установлено, что при синтезе время технологической паузы (остановки работы наплавочной горелки) при межслойном переходе оказывает значимое влияние на T_{max} и $T_{\text{общ}}$. Так, для $V1$ при $T_p = 5$ секунд превышение температуры 1500°C происходит уже после окончания выращивания 2 слоя, для $V2$ – четвертого слоя, для $V3$ – пятого слоя. Для

уменьшения роста максимальной температуры с одной стороны можно равномерно увеличить время T_p для всех слоёв и добиться выполнения двух ограничений $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$, но в этом случае значительно упадет производительность синтеза.

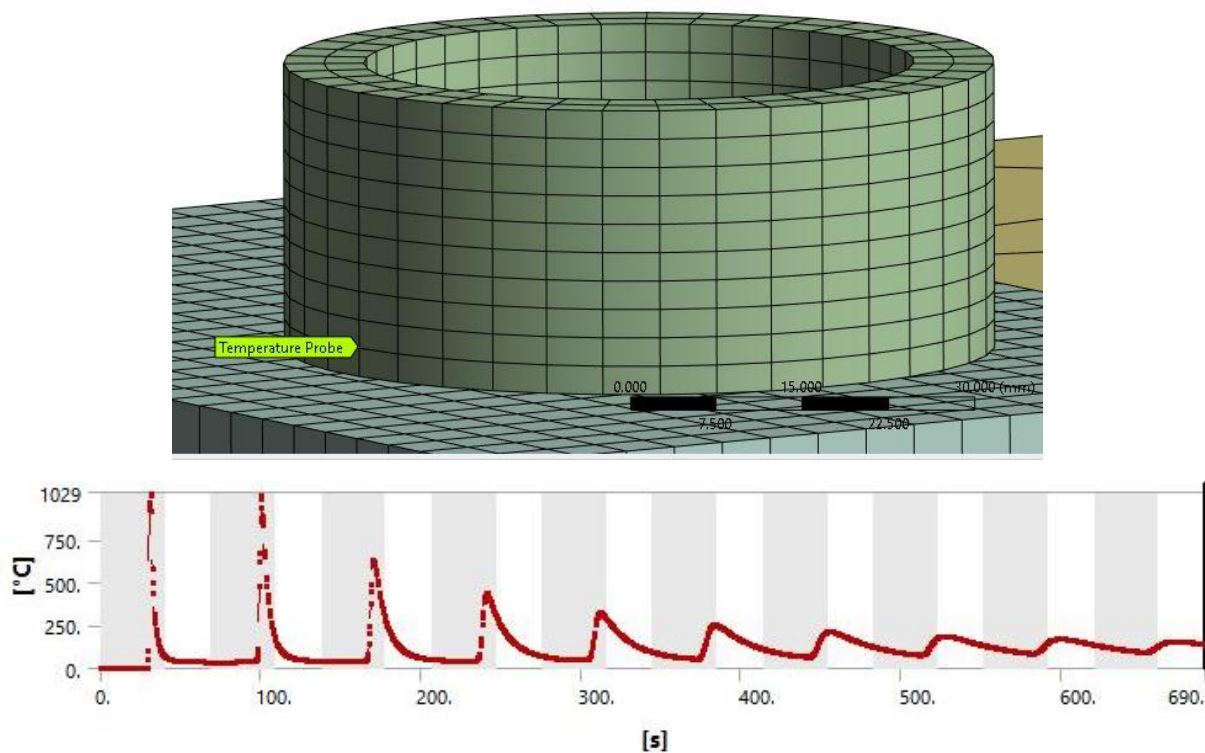


Рисунок 5.30, а - (начало)

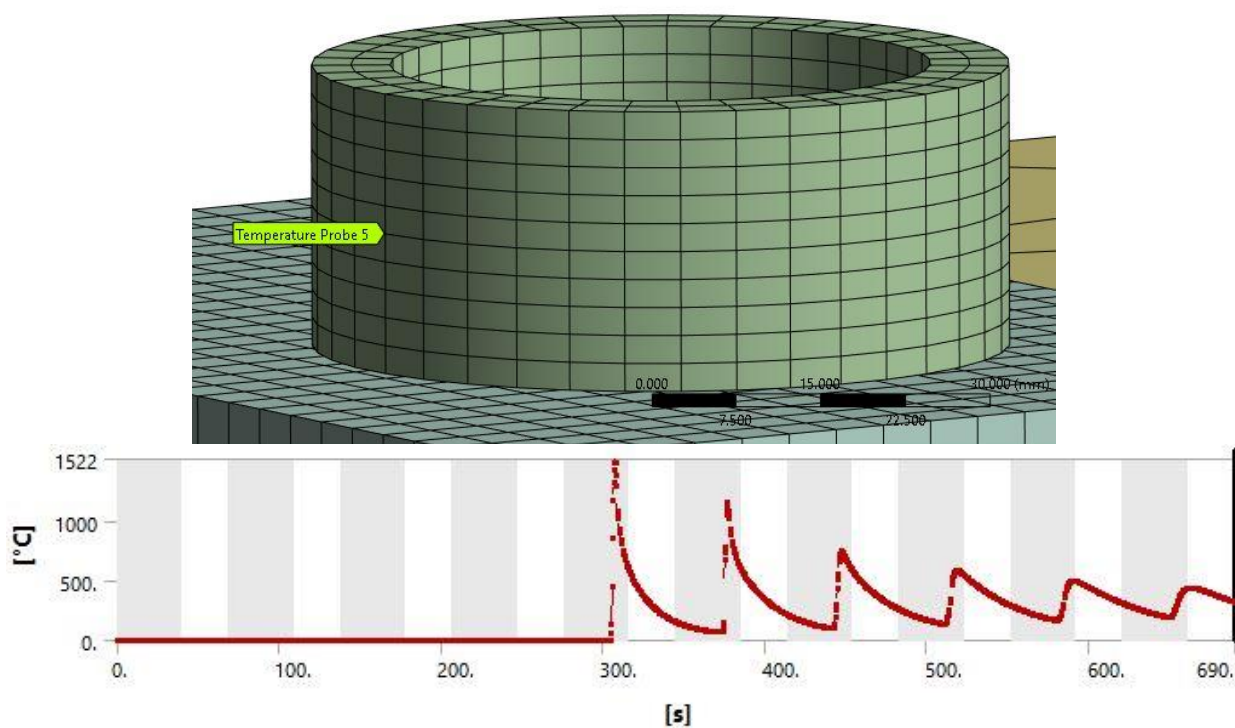
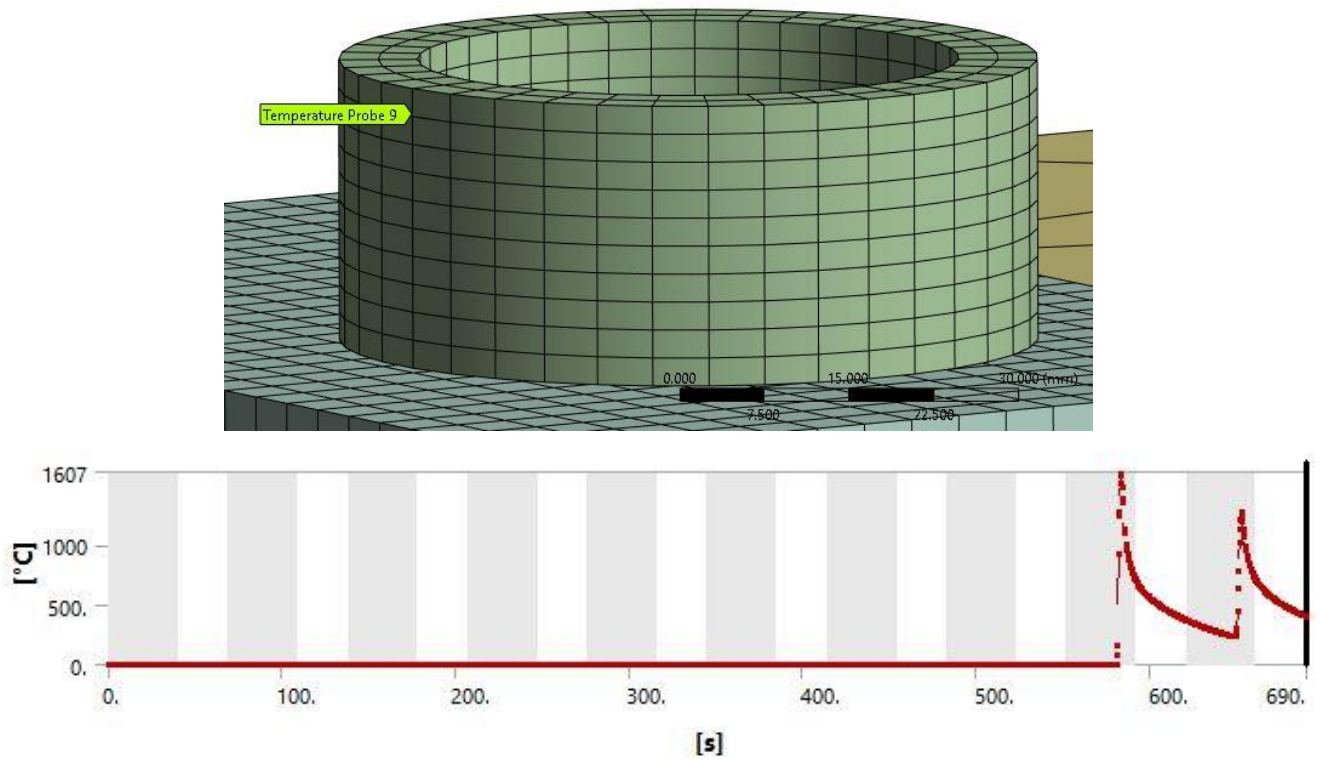


Рисунок 5.30, б - (начало)



в)

а - 1 слой; б - 5 слой; в - 9 слой

Рисунок 5.30 - Пример времени действия и величин температурных всплеск в наплавленных слоях выращенного изделия (V2, пауза между слоями 30 секунд) после прохождения наплавочной горелки

Так, при синтезе цилиндрических оболочек выполнение критериев $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$ обеспечивается для объемов: V1 с T_r 150 (время наплавки 1720 сек); V2 с T_r 90 (1290 сек); V3 с T_r 80 (1370 сек).

Так как синтез выполняется на оборудовании с ЧПУ, то имеется возможность точного программирования времени T_r , и предлагается ввести неравномерное, ступенчатое увеличение пауз между слоями. На основании анализа данных моделирования представленных в таблицах 5.3-5.5, предлагается следующая временная стратегия по выдерживанию пауз между слоями для выполнения критериев $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$ и обеспечения максимальной производительности технологии. Предлагаемое время T_r между выращенными слоями в зависимости от величин наплаваемых объемов материалов в таблицах 5.3-5.5 выделен серым маркером.

Таблица 5.3

Значения температур $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$ при синтезе цилиндрической оболочки объемом $V_1=15$ тыс. мм³.

№ слоя	$C, ^\circ$	Время паузы между слоями (T_p), сек															
		5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
1	$T_{\max}$	1155	1106	1106	1158	1155	1153	1164	1144	1153	1156	1153	1154	1156	1155	1158	1156
	$T_{\text{общ}}$	338	185	83	51	39	34	31	30	29	28	27	26	26	25	25	25
2	$T_{\max}$	1459	1450	1439	1457	1434	1433	1430	1429	1430	1433	1428	1428	1429	1427	1428	1427
	$T_{\text{общ}}$	475	284	137	81	56	44	38	34	32	30	29	28	27	27	26	26
3	$T_{\max}$	1582	1517	1496	1498	1492	1489	1487	1485	1484	1483	1483	1482	1482	1481	1481	1481
	$T_{\text{общ}}$	606	394	210	127	85	62	49	42	37	34	32	30	29	28	27	27
4	$T_{\max}$	1633	1583	1542	1522	1512	1504	1500	1497	1495	1494	1493	1492	1491	1491	1491	1490
	$T_{\text{общ}}$	713	495	292	188	128	93	71	56	47	41	37	34	32	30	29	28
5	$T_{\max}$	1691	1646	1603	1550	1532	1518	1510	1505	1501	1499	1497	1496	1495	1494	1494	1493
	$T_{\text{общ}}$	808	582	369	253	181	134	102	81	66	55	48	42	38	35	33	31
6	$T_{\max}$	1806	1725	1648	1617	1560	1537	1526	1516	1510	1505	1502	1500	1498	1496	1495	1494
	$T_{\text{общ}}$	877	660	440	316	235	180	141	112	91	76	64	56	49	44	40	37
7	$T_{\max}$	1841	1775	1687	1642	1608	1564	1546	1532	1523	1517	1511	1506	1503	1501	1499	1497
	$T_{\text{общ}}$	958	734	503	374	288	226	181	148	122	102	86	81	65	57	51	46
8	$T_{\max}$	1952	1838	1752	1684	1643	1608	1568	1552	1541	1530	1523	1517	1512	1508	1505	1503
	$T_{\text{общ}}$	1036	805	561	427	337	271	221	183	154	131	112	97	84	74	66	59
9	$T_{\max}$	1992	1893	1792	1720	1673	1632	1593	1572	1556	1543	1534	1524	1518	1514	1509	1506
	$T_{\text{общ}}$	1109	862	614	475	381	312	259	218	186	161	138	120	106	93	83	75
10	$T_{\max}$	2015	1926	1810	1737	1685	1650	1619	1584	1565	1552	1541	1533	1525	1518	1516	1508
	$T_{\text{общ}}$	1215	934	662	516	419	347	292	248	213	185	161	142	125	112	100	90

Таблица 5.4

Значения температур $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$ при синтезе цилиндрической оболочки объемом $V_2=30$ тыс. мм³.

№ слоя	$C, ^\circ$	Время паузы между слоями (T_p), сек									
		5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	$T_{\max}$	1024	1016	1019	1026	1024	1020	1024	1019	1014	1018
	$T_{\text{общ}}$	98	46	38	35	33	31	30	29	28	27
2	$T_{\max}$	1037	1409	1420	1404	1407	1403	1406	1402	1401	1404
	$T_{\text{общ}}$	296	115	50	42	38	36	34	32	31	30
3	$T_{\max}$	1467	1476	1474	1472	1472	1471	1468	1468	1468	1470
	$T_{\text{общ}}$	492	255	97	74	45	40	37	35	33	32
4	$T_{\max}$	1498	1523	1488	1486	1483	1482	1480	1481	1478	1480
	$T_{\text{общ}}$	598	383	181	101	67	51	43	39	36	34
5	$T_{\max}$	1514	1525	1497	1491	1487	1485	1483	1482	1481	1480
	$T_{\text{общ}}$	654	466	268	165	110	78	60	50	43	39
6	$T_{\max}$	1543	1535	1514	1502	1495	1490	1487	1485	1483	1482
	$T_{\text{общ}}$	692	523	340	231	162	119	90	72	59	50
7	$T_{\max}$	1596	1592	1543	1523	1510	1501	1496	1491	1487	1485
	$T_{\text{общ}}$	730	573	397	289	215	165	128	102	83	70
8	$T_{\max}$	1654	1664	1578	1551	1532	1518	1508	1501	1496	1492
	$T_{\text{общ}}$	788	621	445	340	265	208	167	136	113	94
9	$T_{\max}$	1710	1678	1628	1576	1552	1533	1520	1510	1502	1497
	$T_{\text{общ}}$	839	660	488	381	307	248	204	170	143	122
10	$T_{\max}$	1735	1702	1652	1615	1571	1570	1535	1523	1513	1502
	$T_{\text{общ}}$	934	719	529	418	342	283	237	202	171	146

Так, ступенчатый синтез, с выполнением критериев $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$, необходимо проводить для V_1 при T_p после 1 слоя - 5 сек, 2 - 10 сек, 3 - 20 сек, 4 - 70 сек, 5 - 100 сек, 6 - 130 сек, 7 - 140 сек, 8 - 150 сек, 9 - 150 сек (время наплавки 1145 сек). Для V_2 при T_p после 1 слоя - 5 сек, 2, 3 - 10 сек, 4,5 - 20 сек, 6 - 40 сек, 7 - 60 сек, 8 - 80 сек, 9 - 90 сек (время наплавки 815 сек). Для V_3 при T_p после 1,2 слоя - 5 сек, 3 - 10 сек, 4,5,6 - 20 сек, 7 - 40 сек, 8 - 60 сек, 9 - 70 сек (время наплавки 980 сек).

Таким образом, в случае применения неравномерного T_p для выбранных объемов наплавляемых материалов при обеспечении критериев $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$ по сравнению с равномерной паузой между слоями T_p позволит повысить производительность при синтезе: V_1 – в 1,5 раза; V_2 – в 1,58 раза; V_3 – в 1,39 раза.

Таблица 5.5

Значения температур $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$ при синтезе цилиндрической оболочки объемом $V_3=45$ тыс. мм³.

№ слоя	$C, ^\circ$	Время паузы между слоями (T_p), сек									
		5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	$T_{\max}$	1025	1021	1027	1027	1021	1032	1025	1025	1025	1027
	$T_{\text{общ}}$	101	46	42	39	37	35	33	32	31	30
2	$T_{\max}$	1404	1406	1403	1416	1402	1403	1401	1402	1403	1402
	$T_{\text{общ}}$	299	115	51	47	43	40	38	36	34	33
3	$T_{\max}$	1471	1470	1469	1468	1468	1466	1467	1464	1467	1464
	$T_{\text{общ}}$	490	261	96	55	47	43	41	36	36	35
4	$T_{\max}$	1485	1503	1481	1480	1474	1477	1478	1476	1475	1474
	$T_{\text{общ}}$	593	382	179	99	65	50	43	40	38	37
5	$T_{\max}$	1492	1490	1486	1483	1482	1481	1480	1478	1478	1478
	$T_{\text{общ}}$	633	457	264	163	108	77	60	50	43	39
6	$T_{\max}$	1508	1502	1494	1489	1486	1483	1481	1480	1479	1478
	$T_{\text{общ}}$	653	504	330	226	160	117	90	71	59	51
7	$T_{\max}$	1534	1524	1510	1501	1494	1490	1486	1484	1483	1480
	$T_{\text{общ}}$	681	540	380	274	210	161	126	101	83	70
8	$T_{\max}$	1569	1570	1534	1518	1508	1500	1494	1490	1487	1484
	$T_{\text{общ}}$	716	572	418	323	254	202	164	134	112	94
9	$T_{\max}$	1595	1582	1573	1534	1520	1511	1502	1495	1491	1486
	$T_{\text{общ}}$	746	598	452	359	291	239	198	167	141	120
10	$T_{\max}$	1637	1619	1591	1569	1554	1524	1513	1505	1499	1494
	$T_{\text{общ}}$	835	644	485	392	323	270	228	195	167	145

Для оценки времени повышения температуры свыше 400°C (t_p) и величины максимальной температуры ($T_{\max}$) после прохождения наплавочной горелки в поверхностном слое и подповерхностных слоях использовались результаты моделирования цилиндрических оболочек, в которых анализировались области минимальных и максимальных значения T_p каждого рассматриваемого объема наплавляемого материала. Так как в созданной КЭМ наплавленных 10 слоёв, то, например, в условной точке, выбранной на первом слое будет фиксироваться 10 температурных вспышек после выращивания каждого выше расположенного слоя.

Установленные значения t_p и $T_{\max}$ для каждого слоя выбранных наплавочных объемов представлены в таблицах 5.5-5.10, где бежевым маркером выделены диапазоны, в которых температура превышает 400°C и ниже данного значения больше не опускается, а голубым маркером выделены диапазоны, в которых температура в процессе синтеза не поднимается выше 400°C.

На основании анализа таблиц 5.6-5.11 установлено, что температурные вспышки, возникающие в ниже лежащих слоях, могут достигать 1150-1451С, а локальное время повышения температуры свыше 400С в слое может составлять для объемов: V1 до 29,5 секунд; V2 до 43,51 секунд; V3 до 37 секунд.

Таким образом, можно сделать вывод, что в случае применения чередующихся технологий синтеза и волнового деформационного упрочнения при выращивании изделия и выдерживания критериев $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$, возникающие температурные вспышки в слоях с учетом времени их действия, не могут вызвать существенных структурно фазовых изменений микроструктуры, приводящих к отпуску и тем самым повлиять на сформированное деформационное упрочнение нижележащих наплавленных слоёв. На основании полученных данных по времени технологической паузы (T_p), времени повышения температуры свыше 400°C (t_n) установлено, что в зависимости от поставленных задач ВДУ рассматриваемых выращиваемых объемов металла можно выполнять в процессе реализации T_p любого слоя.

Таблица 5.6

Оценка t_p и T_{max} для V1, T_p 5 сек

[illegible]

Таблица 5.7

Оценка t_p и T_{max} для $V1$, T_p 150 сек

№ слоя		Очередность температурных всплесков при синтезе								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	тп, сек	6,1	9,3	9,5	6,7	Тобщ<400С				
	Тmax,С	1150	1049	646	578					
2	тп, сек	9,5	13	13,5	11,3	Тобщ<400С				
	Тmax,С	1451	1133	699	502					
3	тп, сек	13	16,5	16,5	14,3	3,8	Тобщ<400С			
	Тmax,С	1510	1150	711	517	404				
4	тп, сек	16,5	19,5	19,5	16,9	7,8	Тобщ<400С			
	Тmax,С	1521	1151	715	524	415				
5	тп, сек	20	22,5	22,5	18,9	10,2				
	Тmax,С	1524	1155	718	530	422				
6	тп, сек	22,5	25	24,3	20,5	12,3				
	Тmax,С	1525	1158	723	536	430				
7	тп, сек	25	26,5	25,8	22,2					
	Тmax,С	1528	1163	728	524					
8	тп, сек	27	28,5	27,3						
	Тmax,С	1533	1167	733						
9	тп, сек	28,5	29,5							
	Тmax,С	1536	1170							
10	тп, сек	30,3								
	Тmax,С	1528								

Таблица 5.8
Оценка t_p и T_{max} для V2, T_p 5 сек

№ слоя		Очередность температурных всплеск при синтезе								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	тп, сек	3,5	6	6,5	4,3	Тобщ<400С				
	Tmax,C	1028	1026	634	445					
2	тп, сек	7	10	11,3	10,2	6	Тобщ<400С			
	Tmax,C	1432	1131	707	522	423				
3	тп, сек	10,8	14	15,3	15,5	23,8	11,5	2		
	Tmax,C	1509	1156	738	572	485	432	400		
4	тп, сек	14,8	18	20,3	21,9	22,9	23,5	8,8		
	Tmax,C	1525	1177	772	620	541	492	457		
5	тп, сек	18,9	23	26,3	20,3	32,3	11,9			
	Tmax,C	1544	1212	816	668	593	543			
6	тп, сек	23,8	28,8	33,6	38,5	13,9				
	Tmax,C	1579	1259	864	716	639				
7	тп, сек	29,3	35,8	41,9	15,5					
	Tmax,C	1625	1323	915	759					
8	тп, сек	36,3	43,1							
	Tmax,C	1691	1357							
9	тп, сек	Тобщ>400С								
	Tmax,C									
10	тп, сек									
	Tmax,C									

Таблица 5.9

Оценка $t_{п}$ и $T_{мах}$ для V2, T_p 90 сек

№ слоя		Очередность температурных всплесков при синтезе								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$t_{п}$, сек	3,5	6	6,3	3,5	Тобщ<400С				
	$T_{мах}$,С	1028	1021	625	429					
2	$t_{п}$, сек	6,9	9,6	10,5	8,3	Тобщ<400С				
	$T_{мах}$,С	1428	1122	693	495					
3	$t_{п}$, сек	10,8	13,5	14	22,4	2,3	Тобщ<400С			
	$T_{мах}$,С	1469	1142	709	516	402				
4	$t_{п}$, сек	14,3	17	17,5	15,3	7,3	Тобщ<400С			
	$T_{мах}$,С	1511	1145	712	523	415				
5	$t_{п}$, сек	18,3	20,5	20,5	17,9	11				
	$T_{мах}$,С	1512	1146	716	531	426				
6	$t_{п}$, сек	15,3	23,5	23	20,5	13,9				
	$T_{мах}$,С	1514	1149	722	540	439				
7	$t_{п}$, сек	24,3	26	25,8	23,2					
	$T_{мах}$,С	1517	1155	729	551					
8	$t_{п}$, сек	26,8	28	27,8						
	$T_{мах}$,С	1523	1162	739						
9	$t_{п}$, сек	29,3	30,5							
	$T_{мах}$,С	1529	1171							
10	$t_{п}$, сек	31								
	$T_{мах}$,С	1538								

Таблица 5.10

Оценка $t_{п}$ и $T_{мах}$ для V3, T_p 5 сек

№ слоя		Очередность температурных всплесков при синтезе								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$t_{п}$, сек	3	6	6,3	4	Тобщ<400С				
	$T_{мах}$,С	1027	1019	627	437					
2	$t_{п}$, сек	6,1	9,7	10,5	8,9	Тобщ<400С				
	$T_{мах}$,С	1425	1123	699	507					
3	$t_{п}$, сек	9,8	13,5	14,5	13,7	10	Тобщ<400С			
	$T_{мах}$,С	1500	1146	720	540	441				
4	$t_{п}$, сек	13,8	17,5	18,8	18,5	16,6	11,7			
	$T_{мах}$,С	1514	1155	736	569	480	425			
5	$t_{п}$, сек	17,5	21,3	23,3	24	24,3	21,8			
	$T_{мах}$,С	1522	1170	761	602	517	463			
6	$t_{п}$, сек	21,5	25,6	28,5	30,5	30,8				
	$T_{мах}$,С	1537	1196	791	637	552				
7	$t_{п}$, сек	25,8	31,3	34,7	32,5					
	$T_{мах}$,С	1562	1240	825	668					
8	$t_{п}$, сек	31	36,9	33,5						
	$T_{мах}$,С	1609	1261	854						
9	$t_{п}$, сек	37	33,8							
	$T_{мах}$,С	1625	1302							
10	$t_{п}$, сек	33,8								
	$T_{мах}$,С	1669								

Таблица 5.11

Оценка $t_{п}$ и T_{max} для V_3 , T_p 90 сек

№ слоя		Очередность температурных всплесков при синтезе								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$t_{п}$, сек	3	6	6,3	3,2	Тобщ<400С				
	T_{max} , С	1027	1016	621	426					
2	$t_{п}$, сек	6,1	9,5	10,3	8,3	Тобщ<400С				
	T_{max} , С	1421	1116	690	492					
3	$t_{п}$, сек	9,8	13,3	13,7	11,8	Тобщ<400С				
	T_{max} , С	1493	1137	706	513					
4	$t_{п}$, сек	13,5	16,7	17	14,6	6	Тобщ<400С			
	T_{max} , С	1505	1140	710	520	411				
5	$t_{п}$, сек	17	20	20	17	8,7				
	T_{max} , С	1507	1141	914	526	419				
6	$t_{п}$, сек	20,1	22,7	22,3	19,1	11,5				
	T_{max} , С	1508	1144	716	532	429				
7	$t_{п}$, сек	22,8	25	24,3	21					
	T_{max} , С	1510	1148	721	541					
8	$t_{п}$, сек	25	27	26,2						
	T_{max} , С	1515	1122	730						
9	$t_{п}$, сек	27	28,6							
	T_{max} , С	1518	1160							
10	$t_{п}$, сек	29,8								
	T_{max} , С	1526								

Это связано с тем, что время подвода – настройки модуля для проведения ВДУ составляет не более 30-40 секунд, а время на проведение ВДУ одного слоя с частотой ударов 10 Гц, при твердости наплавленного материала $HV = 1900$ МПа занимает всего лишь для $V_1 = 3,3$ сек, $V_2 = 7,5$ сек, $V_3 = 11,9$ сек.

Так как одной из особенностей технологии ВДУ является обеспечение глубокого упрочнения, то послойное упрочнение каждого слоя рассматриваемых цилиндрических оболочек толщиной 2,5 мм не имеет смысла, так как это в разы снизит производительность ВДУ и повысит трудоёмкость проводимых операций, а дальнейшее установление взаимосвязи между режимами ВДУ и обеспечения эффективной глубины упрочнения в процессе синтеза нужно вести с учетом температуры обрабатываемого материала.

5.3.5 Исследование взаимосвязи между режимами ВДУ, температурой упрочняемого материала и формируемыми параметрами упрочнения наплавленного материала

Известно, что при синтезе материалов методом Wire Arc Additive Manufacturing электродуговой сваркой, наплавленный слой имеет недостаточную твердость и прочность, связанную с особенностями процесса наплавки. Для повышения механических свойств наплавленного материала достаточно перспективным представляется применение дополнительной деформационной упрочняющей обработки наплавленных слоёв. Так как ВДУ за счет большого числа управляемых технологических параметров может обеспечить глубокое упрочнение и легко адаптироваться для обработки поверхностей разной ширины и твердости, то его применение в составе комбинированной технологии ВДТУ может быть перспективным.

Так как температура начала рекристаллизации рассматриваемой стали 04Х19Н9 составляет 400°С, а упрочнение ВДУ можно проводить не только при комнатной температуре, то для повышения производительности комбинированной технологии ВДТУ, упрочнение выращенного материала можно начинать как только его температура снизится до 400°С.

Целью исследований является установление взаимосвязи между режимами ВДУ, температурой упрочняемого материала и формируемыми параметрами упрочнения наплавленного материала.

Для проведения исследований использовалась созданная КЭМ комбинированной технологии аддитивного синтеза и ВДУ (ВДТУ). В качестве объекта моделирования взят фрагмент стенки наплаваемых ранее оболочек в форме параллелепипеда размерами 7*7,5*60 (ш*в*д) мм. Материал сталь 04Х19Н9. Данные по величинам единичного наплавочного объема (87 мм³) и величине теплового потока (12 Дж/мм³) взяты из пункта 5.3.1. Моделировались условия наплавки трех слоёв и последующего упрочнения поверхности третьего слоя. Для исследования влияния температуры нагрева на параметры упрочнения, ВДУ

проводилось при температуре выращенного материала $+24^{\circ}\text{C}$ и $+300^{\circ}\text{C}$, что обеспечивалось в КЭМ за счет выдержки времени паузы после синтеза перед началом упрочнения. Температура начала ВДУ $+300^{\circ}\text{C}$ выбрана из расчета не допустить начала упрочнения в реальных условиях выше температуры начала рекристаллизации ($+400^{\circ}\text{C}$) из-за быстроты остывания выращенного изделия (например, выращенный параллелепипед остывает с: $+500^{\circ}\text{C}$ до $+400^{\circ}\text{C}$ за 1,8 секунды; $+400^{\circ}\text{C}$ до $+300^{\circ}\text{C}$ за 2 секунды).

Для оценки влияния величины удара на параметры упрочнения обработка велась с энергией 30, 35, 40, 45 Дж. Упрочнение проводилось с коэффициентом перекрытия отпечатков $K=0,4$, так как он хорошо зарекомендовал себя для повышения ряда эксплуатационных свойств. В качестве инструмента использовался стержневой ролик $\varnothing 10$ мм. Ширина ролика превышала ширину обрабатываемого материала на 2 мм. В КЭМ моделировалась только часть ролика, что связано с необходимостью создания на нём дополнительной поверхности для приложения граничных условий. Моделирование упрочнения выполнялось в два этапа. На первом этапе определялась ширина (δ) отпечатков единичных ударов инструмента (рисунок 5.31) при температурах обрабатываемого материала $+24^{\circ}\text{C}$ и $+300^{\circ}\text{C}$. Данные по ширине отпечатков необходимы для расчета скорости перемещения обрабатываемого изделия и обеспечения требуемого перекрытия ударов инструмента.

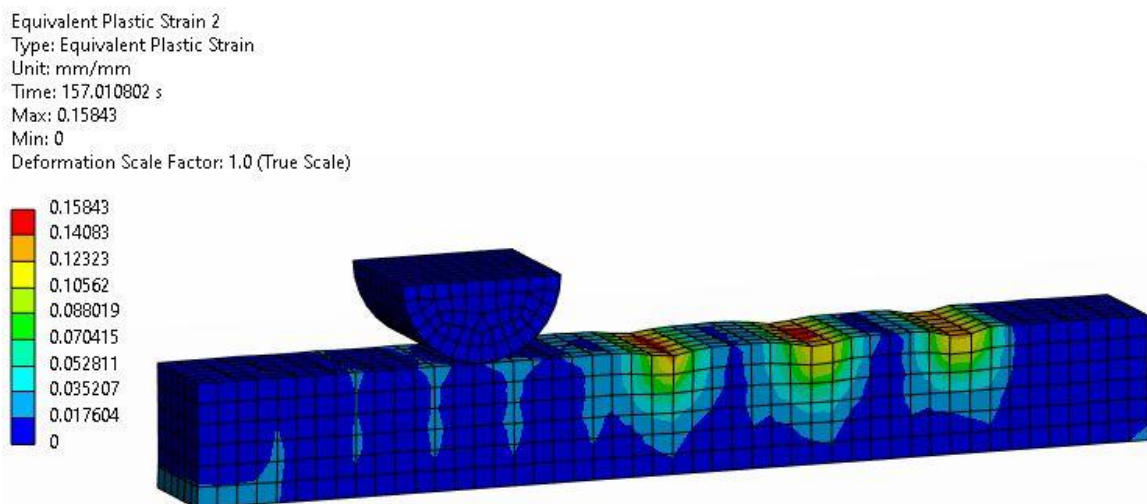


Рисунок 5.31 - Единичные отпечатки ударов инструмента после ВДУ

Для оценки адекватности полученных значений δ , результаты моделирования сравнивались с данными натурального эксперимента, полученных при одинаковых условиях: сила удара 40 Дж, ролик Ø10 мм, наплавляемый материал сталь 04Х19Н9, размеры образца 7*7,5*60 мм. В результате установлено, что погрешность ширины отпечатка при моделировании составила при температуре +24°C 8%, а при +300°C 11%.

Размеры единичных отпечатков, полученные при моделировании ударов с различной энергией и температурой обрабатываемого материала представлены в таблице 5.12.

На втором этапе моделирования упрочнения инструменту задавалась импульсная нагрузка, состоящая из серии ударных импульсов и силы статического поджатия между ударами, обеспечивающая нанесение по выращенной поверхности ударов с требуемым перекрытием, за счет точной скорости смещения обрабатываемого материала относительно инструмента (рисунок 5.32).

Таблица 5.12

Размеры единичных отпечатков.

Т, С	Энергия ударов, А (Дж)				
	20	25	30	35	40
+24	2,18	2,8	3,41	4,1	4,4
+300	2,45	2,87	3,57	4,3	4,9

В результате моделирования под упрочненной областью исследовались: глубина и степень упрочнения. Начало фиксации глубины упрочнения в обработанном изделии начинается после превышения степени упрочнения 10%. При моделировании, также определялись величины коробления (деформации) боковой стенки упрочняемого призматического образца после ударов инструмента (рисунок 5.33).

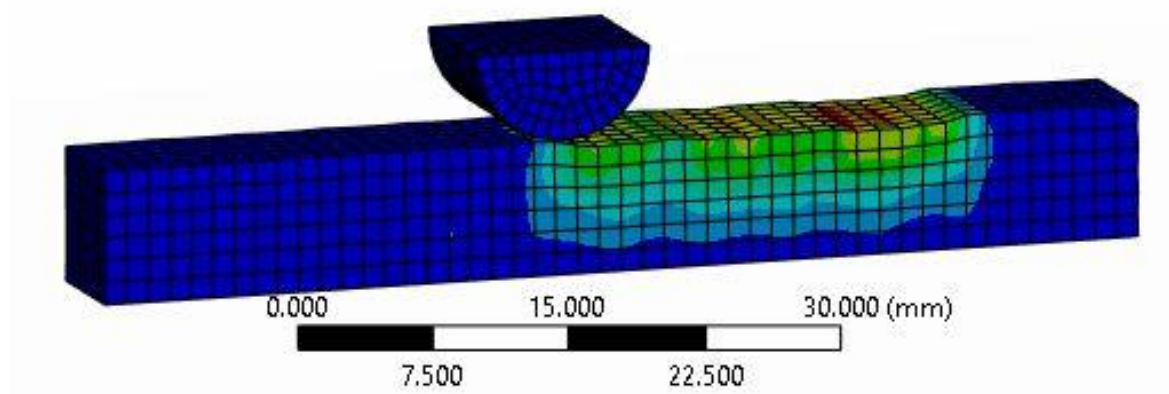


Рисунок 5.32 - Процесс ВДУ трех наплавленных слоев при температуре $+300^{\circ}\text{C}$ с равномерностью упрочнения $K=0,4$

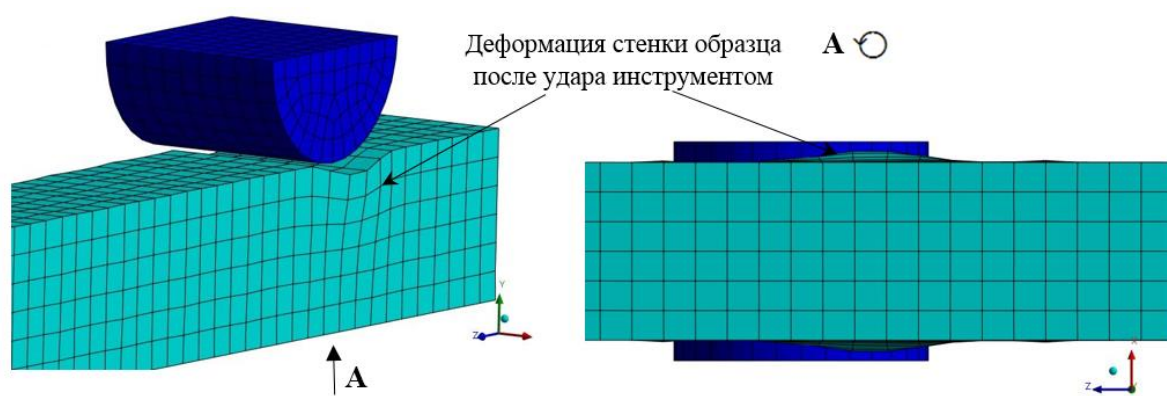


Рисунок 5.33 - Пример коробления (деформации) стенки призматического образца после удара инструментом с энергией удара 40 Дж

Сравнение параметров упрочнения, полученных при разной энергии ударов и температуре обработки выращенного материала представлены на рисунке 5.34.

На основании результатов моделирования установлено, что нагретый материал до $+300^{\circ}\text{C}$ по сравнению с $+24^{\circ}\text{C}$ позволяет получить большую глубину (h) и степень упрочнения (ΔHV), так при ВДУ с: $A=20\text{Дж}$ h на 10%, ΔHV на 14%; $A=25\text{Дж}$ h на 20%, ΔHV на 3,2%; $A=30\text{Дж}$ h на 12,7%, ΔHV на 1,5%; $A=35\text{ Дж}$ изменения h и ΔHV не установлены; $A=40\text{Дж}$ ΔHV на 2%, установлено сквозное упрочнение.

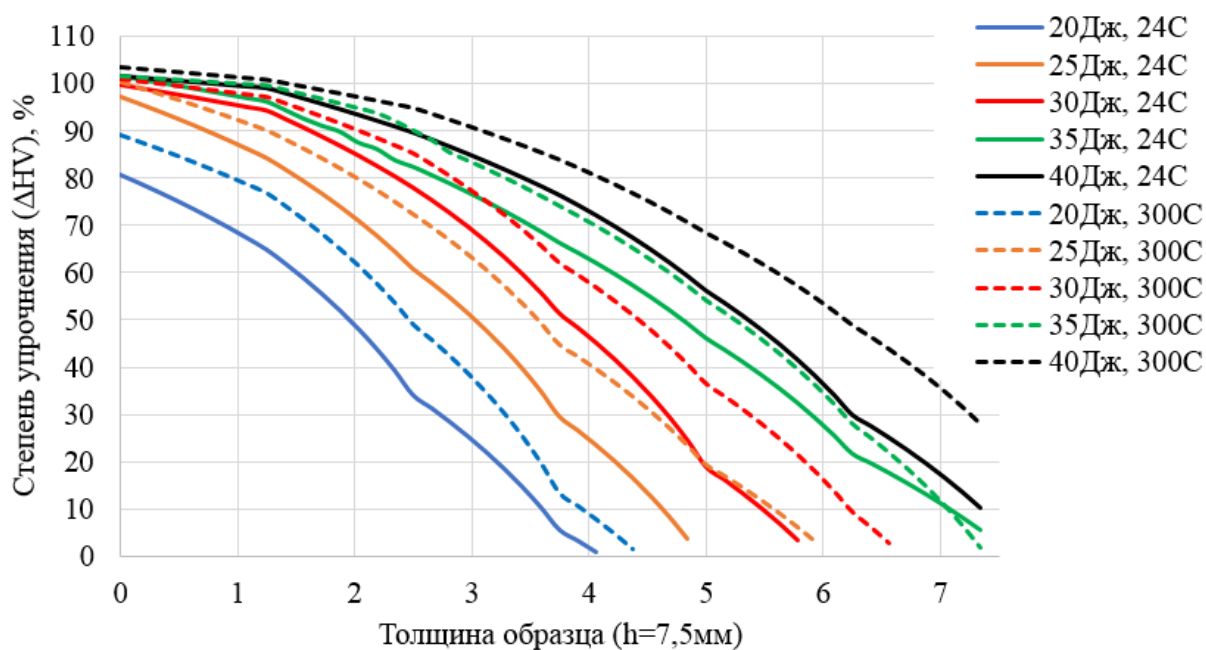


Рисунок 5.34 - График распределения степени упрочнения в поверхностном слое материала при его ВДУ с разной энергией (Дж) и температурой нагрева (С)

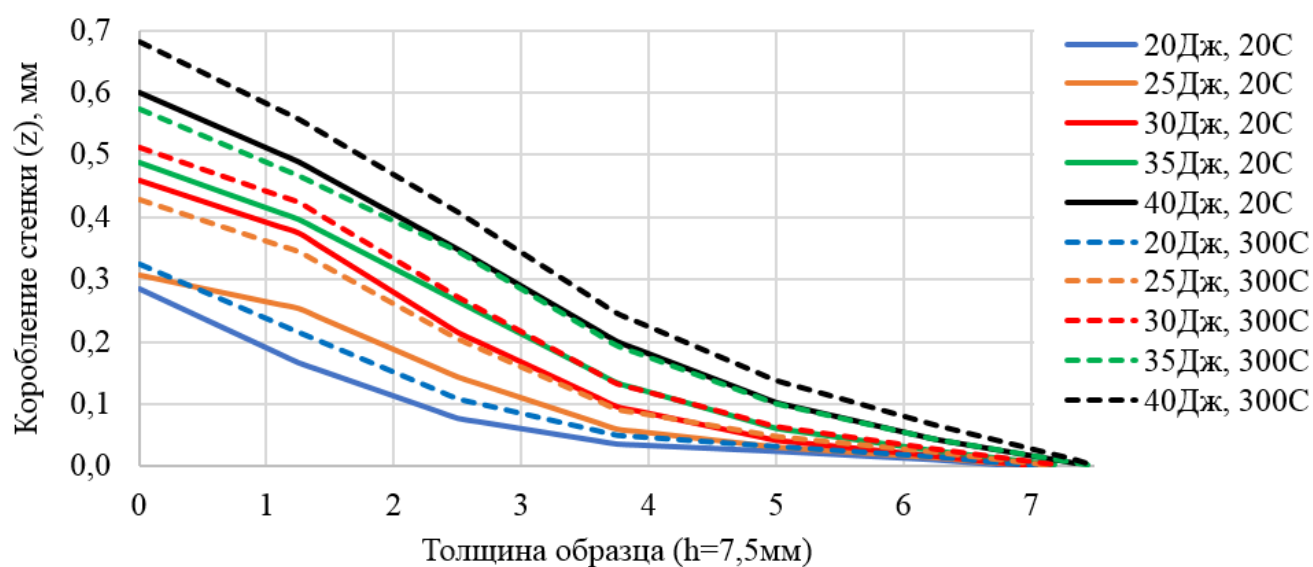


Рисунок 5.35 - Распределение величин коробления (деформации) боковой стенки образца, в зависимости от энергии ударов и температуры, при которой началась обработка

Установлено, что для упрочнения с энергией удара A более 25 Дж при температуре обрабатываемого материала $+300^{\circ}\text{C}$, по сравнению с $+24^{\circ}\text{C}$, для

достижения примерно равных характеристик упрочнения (h , ΔHV), можно использовать на 5 Дж меньшую энергию ударов (рисунок 5.34).

Так как толщина одного выращиваемого слоя составляет 2,5 мм, то при ВДУ с энергией ударов $A=20$ Дж, при температуре упрочняемого материала (T) $+24^{\circ}\text{C}$ и $+300^{\circ}\text{C}$ и $A=25$ Дж, $T+24^{\circ}\text{C}$ – для обеспечения полного (сквозного) упрочнения, обработке нужно подвергать каждый выращиваемый слой. При этом максимальное коробление поверхности обрабатываемого материала в месте контакта с инструментом составит 0,28-0,32 мм (рисунок 5.35). Одновременное ВДУ двух слоев возможно за счет упрочнения с $A=25$ Дж ($T+300^{\circ}\text{C}$), $A=30$ Дж ($T+24^{\circ}\text{C}$; $+300^{\circ}\text{C}$). При этом максимальное коробление упрочненной поверхности в месте контакта с инструментом составит 0,43-0,51 мм. Упрочнение сразу трех слоёв, общей толщиной 7,5 мм возможно при их ВДУ в условиях $A=35-40$ Дж ($T+24^{\circ}\text{C}$, $+300^{\circ}\text{C}$). Максимальное коробление стенки составило 0,48 мм для $A=35$ ($T+24^{\circ}\text{C}$) и 0,57-0,68 мм для $A=35$ ($T+300^{\circ}\text{C}$), $A=40$ Дж ($T+24^{\circ}\text{C}$, $+300^{\circ}\text{C}$).

Дальнейшее увеличение энергии ударов (более 40 Дж) привело к формированию в месте контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью напряжений, превышающих предел прочности используемого материала, что с большой вероятностью, в условиях реального эксперимента, привело бы к образованию эффекта перенаклепа (образованию микротрещин в обрабатываемой поверхности) и появлению коробления стенки более 1 мм. Исходя из этого ограничения, дальнейшее моделирование упрочнения при больших энергиях ударов в рамках рассматриваемого обрабатываемого материала не проводилось.

5.4 Исследование влияния температурного фактора - температуры материала при ВДУ и температуры испытаний на механические свойства

Так как в результате моделирования установлено значимое влияние температуры упрочняемого материала на степень и глубину упрочнения, то для расширения технологических возможностей ВДУ и получения необходимой информации для моделирования комбинированных технологий сварки и

аддитивного синтеза с применением ВДУ, экспериментально исследовалось влияние температурного фактора - температуры упрочняемого материала в диапазоне 20...500°C. Выполнено исследование технологических возможностей термомодеформационного процесса в плане обеспечения высоких механических и эксплуатационных свойств изделий, работающих при низких и повышенных температурах. Исследовалось влияние температуры эксплуатации изделий в диапазоне минус 60...+ 300°C на механические свойства нескольких видов сталей после их ВДУ при различных температурах [156].

Эксперимент проводился при следующих условиях: энергия удара 150 Дж; ударная система $L1/L2=3$, $L1/d1=5$; $K=0,4$; инструмент - стержневой ролик ($\varnothing$ 10 мм и длиной 60 мм); температуры материала перед ВДУ: +20; +200; +400; +500°C; температуры при которых определялись механические свойства: -60°C; +20°C; +300°C. Прочностные характеристики определялись на универсальной электромеханическая машина с компьютерным управлением Time WDW-100E, а используемый её модуль Timeyd-120 higt low temperature chamber для нагрева (до +350°C) и охлаждения (до -120°C). Исследования проводились на сталях, широко применяемых для сварки и синтеза изделий: 12X18H10T, 10XCHД, 30XГСА, 40X.

Результаты исследований показаны на графиках, описывающих установленную взаимосвязь между температурой испытаний, температурой упрочняемого ВДУ материала, пределом текучести и прочности, глубиной и степенью упрочнения (рисунок 5.36). На графиках, значения пределов прочности (σ_B) и текучести (σ_T), ударной вязкости (Ψ) и относительного удлинения (δ) показаны в виде относительных величин, полученных сравнением данных упрочненного (упр) и неупрочненного (0) материалов [154].

В результате испытаний образцов из стали 12X18H10T установлено, что при температуре обрабатываемого материала +200°C, по сравнению с другими рассматриваемыми значениями, относительно неупрочненного материала наблюдается рост: пределов текучести в 1,52 и 1,56 раза и пределов прочности в 1,1 и 1,14 раза определенных при разрыве образцов при температурах +20°C и +300°C,

соответственно; повышение степени упрочнения до 51%, а глубины упрочнения до 5,8 мм (рисунок 5.36, а). Также отмечено, что при температуре материала перед ВДУ $+200^{\circ}\text{C}$ обеспечивается снижение относительного удлинения с 0,59 до 0,41 раза и ударной вязкости с 0,97 до 0,74 раза, по сравнению со значениями, полученными при температуре обрабатываемого материала $+20^{\circ}\text{C}$. При испытаниях в условиях -60°C отмечено отсутствие эффекта от предварительного нагрева материала перед ВДУ, но при этом установлен, по сравнению с неупрочненным материалом, дополнительный рост после ВДУ предела текучести в 1,35 раза, при неизменных значениях предела прочности и относительного удлинения.

В результате испытаний образцов из стали 30ХГСА установлено, что при температуре обрабатываемого материала $+200^{\circ}\text{C}$, по сравнению с другими рассматриваемыми значениями, относительно неупрочненного материала наблюдается рост: предела текучести в 1,31; 1,28; 1,29 раза, определенного при разрыве образцов при $T+20^{\circ}\text{C}$, $+300^{\circ}\text{C}$, -60°C , соответственно; степени упрочнения до 41%, а глубины упрочнения до 4,2 мм (рисунок 5.36, б). Отмечено отсутствие влияния температуры нагрева перед ВДУ на изменение ударной вязкости образцов из стали 30ХГСА при $T+300^{\circ}\text{C}$ и предела прочности при $T+20^{\circ}\text{C}$, $+300^{\circ}\text{C}$. Также установлено резкое снижение ударной вязкости при испытаниях при $T-60^{\circ}\text{C}$, в случае использования предварительного нагрева перед ВДУ.

В результате испытаний образцов из стали 10ХСНД установлено, что при температуре обрабатываемого материала $+400^{\circ}\text{C}$, по сравнению с другими рассматриваемыми значениями, относительно неупрочненного материала наблюдается рост: пределов текучести в 1,4 и 1,45 раза и пределов прочности в 1,12 и 1,06 раза определенных при разрыве образцов при температурах $+20^{\circ}\text{C}$ и -60°C , соответственно; повышение степени упрочнения до 60%, а глубины упрочнения до 7,5 мм (рисунок 5.36, в). Также отмечено, отсутствие влияния температуры предварительного нагрева перед ВДУ на изменение предела текучести и прочности при T испытаний $+300^{\circ}\text{C}$.

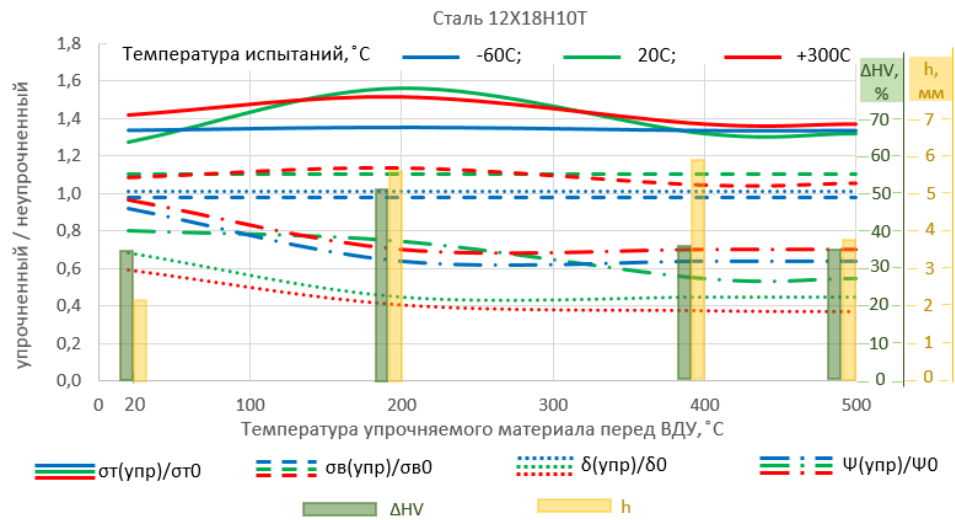


Рисунок 5.36, а (начало)

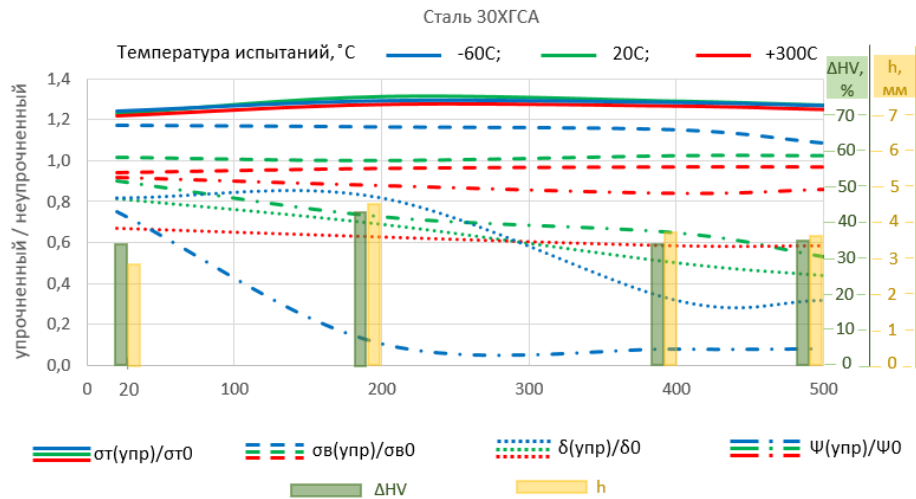


Рисунок 5.36, б (начало)

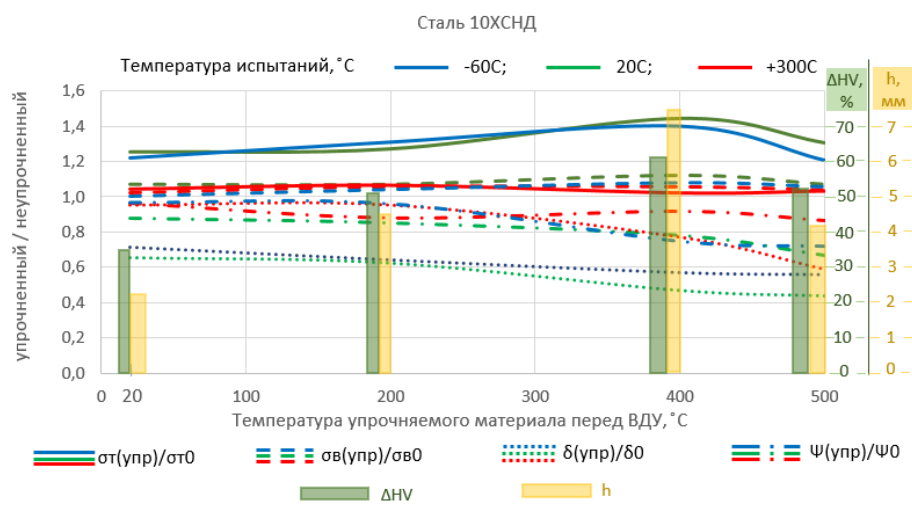
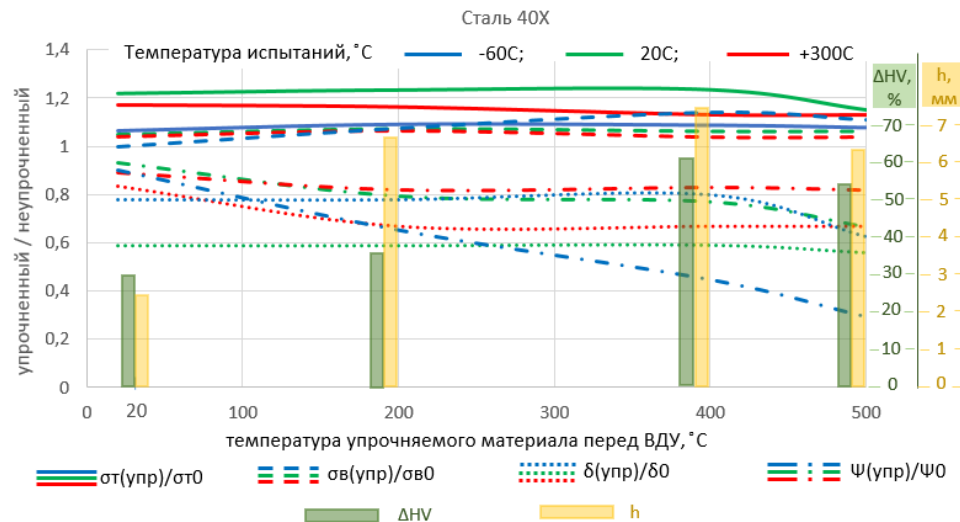


Рисунок 5.36, в (начало)



г)

Рисунок 5.36 - Зависимость влияния температуры ВДУ и температуры испытаний на механические свойства

Установлено, что при температуре материала перед ВДУ +400°C обеспечивается снижение относительного удлинения с 0,66 до 0,47; с 0,95 до 0,77; с 0,71 до 0,57 раза и ударной вязкости с 0,88 до 0,78; с 0,97 до 0,92; с 0,97 до 0,75 раза определенного при $T+20^\circ\text{C}$, $+300^\circ\text{C}$, -60°C , соответственно, по сравнению со значениями, полученными при температуре обрабатываемого материала $+20^\circ\text{C}$.

В результате испытаний образцов из стали 40X установлено, что при температуре обрабатываемого материала $+400^\circ\text{C}$, по сравнению с другими рассматриваемыми значениями, относительно неупрочненного материала наблюдается рост: пределов текучести в 1,23; 1,13; 1,04 раза и пределов прочности в 1,06; 1,04; 1,14 раза определенных при разрыве образцов при температурах при $T+20^\circ\text{C}$, $+300^\circ\text{C}$, -60°C , соответственно; повышение степени упрочнения до 54%, а глубины упрочнения до 7,4 мм (рисунок 5.36, г). Установлено, что при температуре стали 40X перед ВДУ $+400^\circ\text{C}$ обеспечивается снижение ударной вязкости с 0,93 до 0,77; с 0,89 до 0,83; с 0,9 до 0,45 раза определенного при $T+20^\circ\text{C}$, $+300^\circ\text{C}$, -60°C , соответственно, по сравнению со значениями, полученными при температуре обрабатываемого материала $+20^\circ\text{C}$.

Таким образом, установлено, что предварительный нагрев упрочняемого материала перед ВДУ, по сравнению с упрочнением материала комнатной температуры, позволяет повысить в среднем 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 вида материала и температуры эксплуатации изделия, (°С) 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%, даны рекомендации по температурам нагрева перед ВДУ (таблица 5.13).

Для наглядного представления о взаимосвязи между формируемыми прочностными характеристиками в упрочненном материале при разных температурах эксплуатации рекомендуемого диапазона температур нагрева его перед ВДУ созданы графики, изображенные на рисунке 5.37.

Таблица 5.13

Рекомендуемый диапазон температур нагрева его перед ВДУ в зависимости от вида материала и температуры эксплуатации изделия, °С

Сталь	Температура эксплуатации изделия		
	-60°С	+20°С	+300°С
12Х18Н10Т	20	200	200
10ХСНД	400	400	400
30ХГСА	20	20	20
40Х	400	400	400

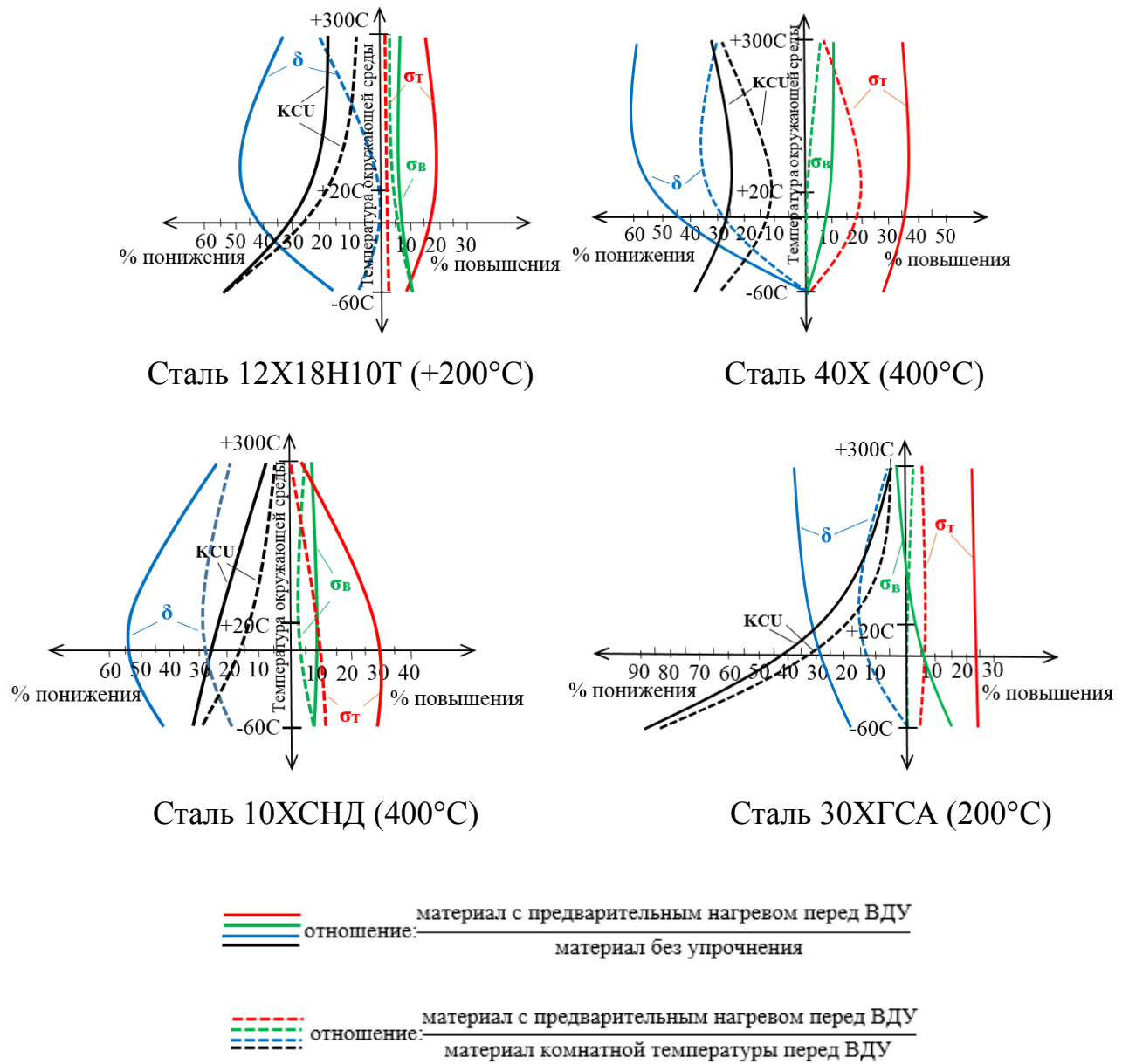


Рисунок 5.37 - Зависимость влияния температуры ВДУ и температуры испытаний на механические свойства

ВЫВОДЫ ПО 5 ГЛАВЕ

На основании исследований процессов, протекающих при реализации комбинированных технологий сварки, наплавки - аддитивного синтеза (WAAM/3DMP) с ВДУ, сформулированы следующие выводы и рекомендации.

1. Выявлена целесообразность использования ВДУ для повышения твердости, глубины упрочнения и обеспечения плавного перехода растягивающих напряжений в сжимающие в сварных швах и зоне термического влияния.

2. 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 $K=0,6$;

3. 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 $K=0,3-0,6$.

4. Установлено, что, если приоритетом является не повышение твердости, а получение в поверхностном слое сварного шва толщиной до 10 мм максимально возможных остаточных напряжений сжатия, необходимо использовать ролик диаметром 18-27 мм и применять ВДУ с $K=0,3$.

5. Установлено, что снижение перегрева изделия ($V_{и}$) и предотвращения стекания наплавленного материала, возможно за счет отвода тепловых потоков при синтезе через объем установочного стола ($V_{с}$). На примере цилиндрической оболочки установлен значимый диапазон отношений $30 \leq V_{с}/V_{и} \leq 100$, которые обеспечивают требуемое распределение тепловых потоков в выращенном изделии без завышения габаритов установочных столов.

6. Установлено, что увеличение объемов наплавленного материала в 3 раза приводит к снижению среднего значения максимальной температуры на последнем

наплавляемом слое ($T_{\max}$), соответственно, у цилиндрических и (коробчатых) оболочек: из стали 04X19H9 на 382°C (509°C).

7. Установлено, что для стальных образцов из 04X19H9 цилиндрическая форма оболочки по сравнению с коробчатой приводит к снижению $T_{\max}$ для: наплавляемого объема V1 на 323°C для; V2 на 250°C; V3 на 196°C.

8. Установлено, что при ВДУ материала температурой +300°C, по сравнению с +24°C, можно использовать на 5 Дж меньшую энергию ударов для получения аналогичных результатов упрочнения.

9. Установлено, что на распределение температурных полей может оказывать время остановки работы наплавочной горелки (технологических пауз T_p) при переходе с одного слоя на другой. Так, в случае применения неравномерного T_p для выбранных объемов наплавляемых материалов при обеспечении критериев $T_{\max}$ и $T_{\text{общ}}$ по сравнению с равномерной паузой между слоями T_p позволит повысить производительность при синтезе: V1 – в 1,5 раза; V2 – в 1,58 раза; V3 – в 1,39 раза.

10. Установлено, что для получения сквозного упрочнения призматического образца, выращенного из стали 04X19H9, в случае необходимости обработки каждого слоя, упрочнение нужно проводить с энергией ударов (A) 20Дж, при температуре упрочняемого материала (T) +24°C и +300°C, и с A=25Дж при T+24°C. ВДУ каждого второго слоя, с получением сквозного упрочнения, нужно проводить с A=25Дж (T+300°C), A=30Дж (T+24°C; +300°C). Одновременное упрочнение трех слоев возможно при ВДУ с A=35-40 Дж (T+24°C, +300°C).

11. 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 12X18H10T, ВДУ при температуре 200°C; 43% и 71% для стали 10XCHД, ВДУ при температуре 400°C; 22% и 33% для стали 30XГСА, ВДУ при температуре 200°C; 44% и 70% для стали 40X, ВДУ при температуре 400°C.

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

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВДУ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА. ОБЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

6.1 Исследование возможностей ВДУ по созданию гетерогенной структуры в обрабатываемом изделии

Достаточно большой интерес для современной промышленности представляют материалы, сочетающие в себе несколько несопоставимых для обычных материалов свойств, например, твердость и вязкость. Такие материалы называются гетерогенными или материалами с гетерогенной структурой. В отличие от композиционных материалов они имеют одинаковый химический состав, а гетерогенные свойства задаются в гомогенном материале путем применения термообработки (ТО) или химико-термической обработки (ХТО). Так, при изменении режимов лазерной закалки были получены сочетания различной твердости на поверхностных выступах и впадинах резьбы. Созданная гетерогенная структура позволила повысить усталостную долговечность на 30...50 % [180]. Полученная гетерогенная структура после ХТО за счет нанесения лаковых масок на рабочие поверхности зубчатых колес позволила увеличить их контактную выносливость в 2...3 раза [81].

Применение поверхностного пластического деформирования для создания гетерогенной структуры стало возможным с появлением ВДУ. Данный способ, в отличие от известных методов ППД, позволяет обеспечить требуемый закон распределения твердых и вязких участков на большой глубине. Кроме того, применение деформационного упрочнения для получения гетерогенной структуры представляется более перспективным по сравнению с ТО и ХТО. Это связано с тем, что ППД позволяет создавать плавный переход от участков с повышенной твердостью к участкам с низкой исходной твердостью, исключая возможность зарождения между ними микротрещин и дальнейшего разрушения.

Однако на сегодняшний момент технология машиностроения не дает технологических рекомендаций по режимам упрочнения и тем более по

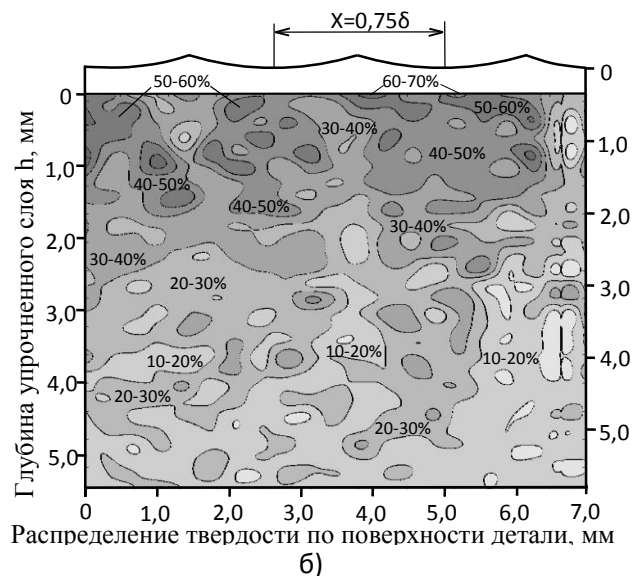
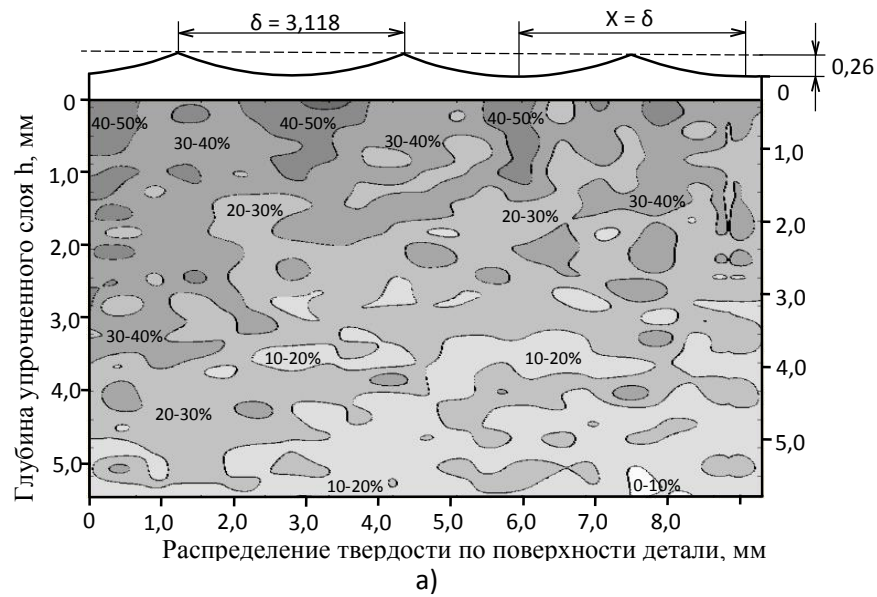
необходимой картине распределения в поверхностном слое твердых и вязких участков, обеспечивающих повышение долговечности. Это связано с малой изученностью процесса гетерогенного упрочнения и с отсутствием методики оценки формируемых твердо-вязких структур в поверхностном слое. Все это сдерживает более широкое распространение в промышленности предлагаемой технологии гетерогенного деформационного упрочнения [99]. Целью проводимых исследований является изучение возможностей ВДУ по созданию гетерогенной структуры в материале.

6.1.1 Экспериментальные исследования равномерности поверхностного слоя после ВДУ

Для экспериментальных исследований наклепанной структуры с различной равномерностью на плоских образцах из стали 45 с исходной твердостью $HV_0 = 2000$ МПа, были получены упрочненные участки в виде дорожек, представляющих собой совокупность пластических вмятин, нанесенных с различным коэффициентом перекрытия $0 \leq K \leq 0,9$ при энергиях удара $A = 56$ Дж и 70 Дж с частотой ударов $f = 8$ Гц и с подачей, соответствующей изменению коэффициента перекрытия. В качестве инструмента при упрочнении использовался стержневой ролик диаметром $D_p = 10$ мм и шириной $b = 15$ мм.

По результатам измерений микротвердости построены графики, характеризующие распределение степени упрочнения по глубине и вдоль поверхности образцов (рисунок 6.1, рисунок 6.2.). Анализ графиков показал, что упрочненный поверхностный слой состоит из твердых и мягких участков различных размеров.

Более крупные твердые участки расположены ближе к поверхности и при большом перекрытии отпечатков ($0,5 < K \leq 0,9$) могут сливаться друг с другом, образуя достаточно равномерно упрочненный поверхностный слой, при этом максимально достигаемая твердость была получена при $K = 0,9$ и составила $HV = 3720$ МПа (степень упрочнения $\Delta HV = (HV - HV_0) / HV_0 = 86 \%$).



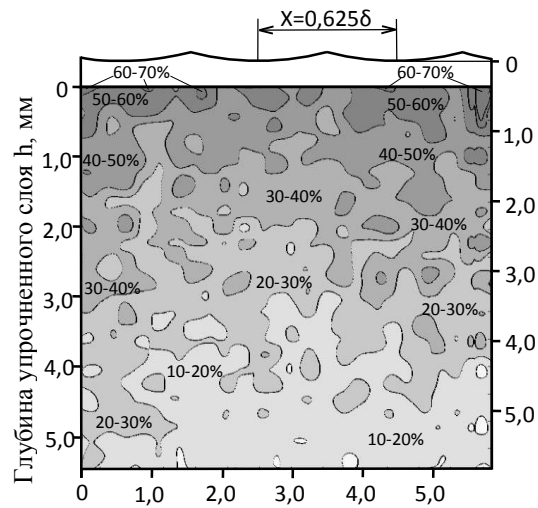
Значения твердости HV, МПа (степень упрочнения ΔHV , %)

2000-2200 (0-10%);	2200-2400 (10-20%);	2400-2600 (20-30%);
2600-2800 (30-40%);	2800-3000 (40-50%);	3000-3200 (50-60%);
3200-3400 (60-70%);	3400-3600 (70-80%);	< 3600 (<80%);

(сталь 45, исходная твердость $HV_0=2000$ МПа)

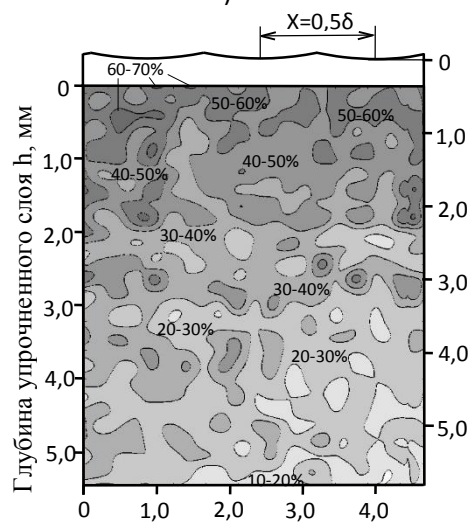
a - $K=0$; *б* - $K=0,25$; *в* - $K=0,375$; *г* - $K=0,5$; *д* - $K=0,7$; *е* - $K=0,9$

Рисунок 6.1 - Влияние коэффициента перекрытия отпечатков K на равномерность упрочнения ВДУ (энергия удара $A=56$ Дж, δ - размер единичных отпечатков, X – расстояние между центрами отпечатков, сталь 45, исходная твердость $HV_0=2000$ МПа)



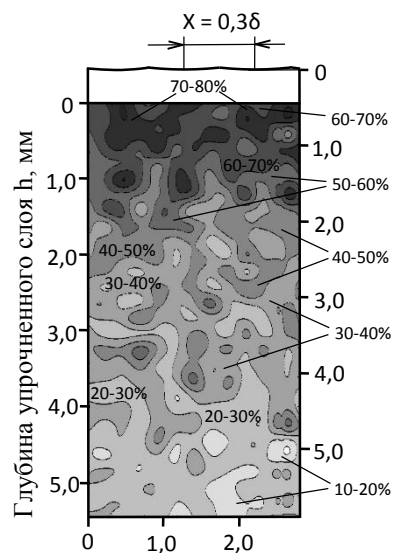
Распределение твердости по поверхности детали, мм

в)

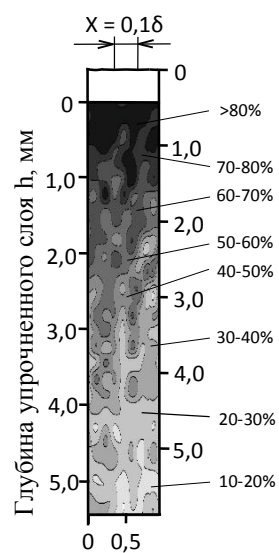


Распределение твердости по поверхности детали, мм

г)

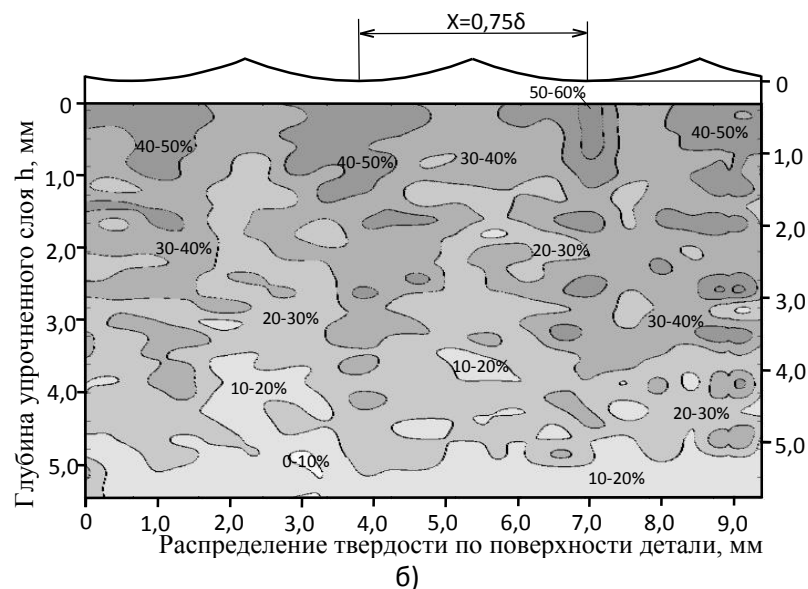
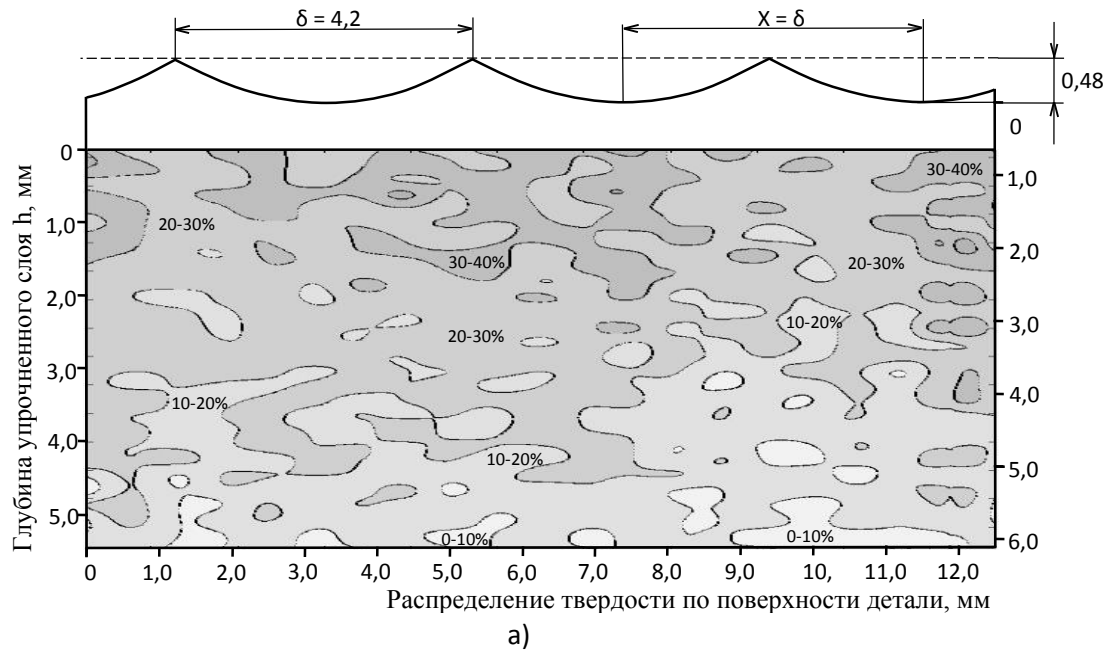
Распределение твердости
по поверхности детали, мм

д)

Распределение твердости
по поверхности детали, мм

е)

продолжение рис.6.1.



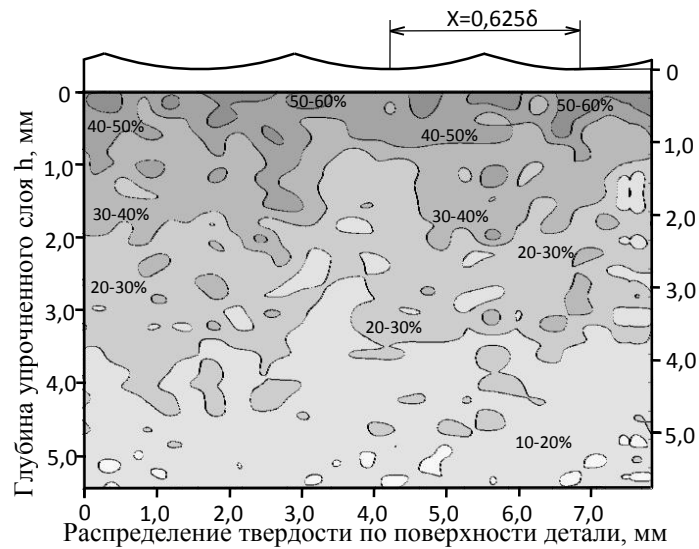
Значения твердости HV, МПа (степень упрочнения ΔHV , %)

2000-2200 (0-10%);	2200-2400 (10-20%);	2400-2600 (20-30%);
2600-2800 (30-40%);	2800-3000 (40-50%);	3000-3200 (50-60%);
3200-3400 (60-70%);	3400-3600 (70-80%);	< 3600 (<80%);

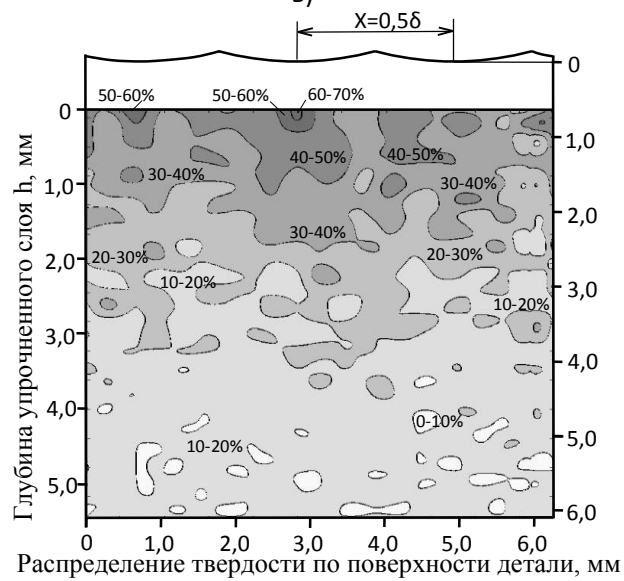
(сталь 45, исходная твердость $HV_0=2000$ МПа)

$a - K=0$; $b - K=0,25$; $в - K=0,375$; $г - K=0,5$; $д - K=0,7$; $e - K=0,9$

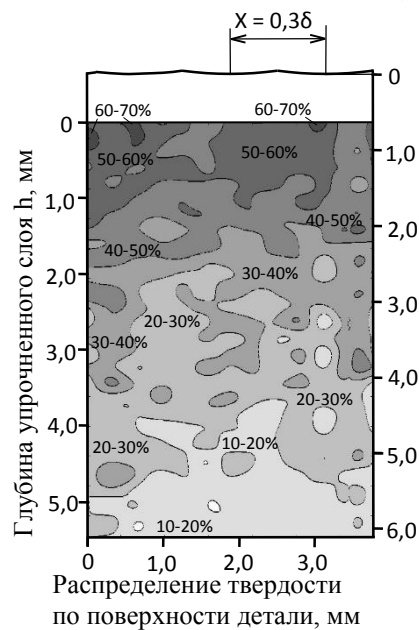
Рисунок 6.2 - Влияние коэффициента перекрытия отпечатков K на равномерность упрочнения ВДУ (энергия удара $A=70$ Дж, δ - размер единичных отпечатков, X – расстояние между центрами отпечатков, сталь 45, исходная твердость $HV_0=2000$ МПа)



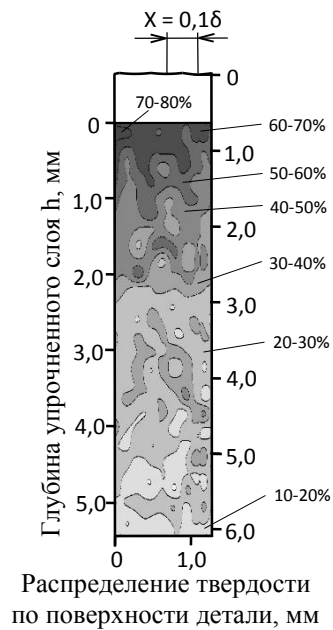
в)



г)



д)



е)

продолжение рис.6.2

Явно выраженная гетерогенно упрочненная структура была получена при перекрытии отпечатков $0 \leq K \leq 0,5$. При режиме $K = 0$, когда перекрытие отпечатков отсутствует, максимальная степень упрочнения достигает 50 % (рисунок 6.1, а). Участки со степенью упрочнения 40...50 % расположены на глубине до 1,5 мм, где преобладающей (основной) является степень упрочнения $\Delta HV = 30...40$ % и чередуются с более мягкими, имеющими $\Delta HV = 20...30$ %, в соответствии с шагом отпечатков x . При энергии ударов 56 Дж – $x = 3,12$ мм, при 70 Дж – $x = 4,2$ мм (рисунок 6.2, а). Ниже 1,5 мм степень упрочнения падает, а упрочненный слой становится более равномерным: до глубины 4 мм, основной является степень упрочнения 20...30 %, на которой располагаются относительно небольшие участки со степенью упрочнения 30...40 % и 10...20 %; ниже глубины 4 мм основной становится степень упрочнения 10...20 % с отдельными участками, имеющими степень упрочнения 0...10 %.

При $K = 0$ твердые участки имеют малые размеры и не большую степень упрочнения.

При $K = 0,25$ происходит небольшое перекрытие отпечатков, что приводит к увеличению степени упрочнения до 60 %. Участки с $\Delta HV = 50...60$ % расположены на глубине до 1 мм, имеют небольшие размеры и находятся на значительном расстоянии друг от друга, в 3...5 раз превышающем их размеры. Ниже глубины 1 мм степень упрочнения уменьшается, чередующиеся вдоль упрочненной поверхности участки с $\Delta HV = 40...50$ % становятся больше, а участки с $\Delta HV = 20...30$ % – меньше, по сравнению с поверхностным слоем, полученным при $K = 0$.

При энергии ударов 56 Дж, $K = 0$ и при 70 Дж, $K = 0,25$ шаг отпечатков x почти одинаковый, соответственно 3,12 мм и 3,15 мм, но твердые участки полученные при 70 Дж имеют значительно большие размеры (рисунок 6.2, б).

При $K = 0,375$ перекрытие отпечатков увеличивается. Это приводит к тому, что на глубине до 1 мм образуются достаточно крупные участки со степенью упрочнения 50...60 %, причем ближе к поверхности степень упрочнения достигает более 60 % (рисунок 6.1, б). Расстояние между такими участками значительно

(3...5 раз) меньше, чем их размер. В отличие от поверхностного слоя, полученного при перекрытии отпечатков с $K \leq 0,25$, непосредственно на поверхности отсутствуют достаточно мягкие участки со степенью упрочнения 30...40 %. Ниже 1 мм степень упрочнения снижается до 20...40 %, размеры твердых и мелких участков уменьшаются, равномерность упрочнения увеличивается.

При энергии ударов 56 Дж, $K = 0,25$ и при 70 Дж, $K = 0,375$ шаг отпечатков x соответственно 2,34 мм и 2,63 мм, при этом твердые участки, полученные при 70 Дж, имеют значительно большие размеры и меньшее расстояние между собой (рисунок 6.2, в).

Твердые участки расположены на небольшом расстоянии друг от друга. Более мягкая основа, в которой располагаются твердые участки, имеет достаточную степень упрочнения (не менее половины максимальной степени упрочнения), распространяется на значительную глубину (до 4 мм и более).

При $K = 0,5$ (рисунок 6.1, г) пластические отпечатки перекрываются наполовину. Твердые участки со степенью упрочнения 50...60 % становятся более крупными, расстояние между ними еще более уменьшается и в некоторых местах они сливаются в одну область.

При $K = 0,7$ (рисунок 6.1, д) на глубине до 1 мм основной является область со степенью упрочнения 60...70 % на которой расположены большие участки со степенью упрочнения до 80 %, практически максимальной для данной стали, и незначительное количество мелких участков со степенью упрочнения 50...60 %. Ниже, на глубине 1...2 мм, расположены достаточно крупные участки со степенью упрочнения 50...60 % чередующиеся с участками, имеющими степень упрочнения 30...40 %, за которыми (ниже 2 мм) следует достаточно равномерная структура, степень упрочнения которой изменяется от 20...40 %.

При режиме $K = 0,9$ (рисунок 6.2, е) на глубине до 0,5 мм основной является степень упрочнения 80...86 % с небольшими отдельными участками со степенью упрочнения 70...80 %. Ниже, на глубине 0,5...1 мм, располагаются крупные участки со степенью упрочнения 70...80 %. За ними на глубине 1...2 мм участки со степенью упрочнения 60...70 %, чередующиеся с участками, имеющими степень

упрочнения 50...60 %. На глубине 2...3 мм располагаются участки со степенью упрочнения 50...60 % чередующиеся с участками со степенью упрочнения 30...40 %. На глубине ниже 3 мм сформирована достаточно равномерная структура, степень упрочнения которой составляет 20...40 % и постепенно убывает по глубине.

Анализ твердых и мягких участков упрочненного слоя полученного с перекрытием $K \leq 0,7$ показывает, что при удалении вглубь, относительно равномерно упрочненного верхнего слоя, имеющего степень упрочнения 70% и более, до участков со степенью упрочнения 50...60 % и ниже может быть получена структура, похожая на структуру полученную при $K < 0,5$.

6.1.2 Разработка параметров для описания гетерогенно-упрочненной структуры

Различная равномерность упрочнения поверхностного слоя будет зависеть от размеров и количества полученных твердых и мягких участков. Для характеристики размеров твердых и мягких участков и шага их чередования введены параметры гетерогенности упрочненного поверхностного слоя: относительная опорная твердость $L_{\Delta H}^h$ и относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$.

Относительная опорная твердость $L_{\Delta H}^h$ представляет собой отношение суммы длин участков с одной определенной степенью упрочнения на рассматриваемой глубине к базовой длине, на которой проводится измерение (рисунок 6.3)

$$L_{\Delta H}^h = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\Delta H}^h} L_{\Delta H j}^h}{L}, \quad (6.1)$$

где h - глубина уровня на котором определяется относительная опорная твердость, мм; ΔH - степень упрочнения участков для которых определяется относительная опорная твердость, %; $L_{\Delta H j}^h$ - длина j -го участка со степенью упрочнения ΔH на рассматриваемом уровне, мм; L - базовая длина, т.е. расстояние вдоль упрочненной поверхности, на котором определяется относительная опорная твердость, мм; $n_{\Delta H}^h$ -

количество локальных упрочненных участков, шт; j – порядковый номер участка со степенью упрочнения ΔH , ($j=1 \dots n_{\Delta H}^h$).

Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$ представляет собой отношение количества локальных упрочненных участков $n_{\Delta H}^h$ со степенью упрочнения ΔH к базовой длине L , на которой производится измерение

$$N_{\Delta H}^h = \frac{n_{\Delta H}^h}{L}. \quad (6.2)$$

Параметр $L_{\Delta H}^h$ позволяет оценить относительную длину всех твердых участков на определенном уровне глубины упрочненного слоя, а параметр $N_{\Delta H}^h$ оценить их количество на базовой длине.

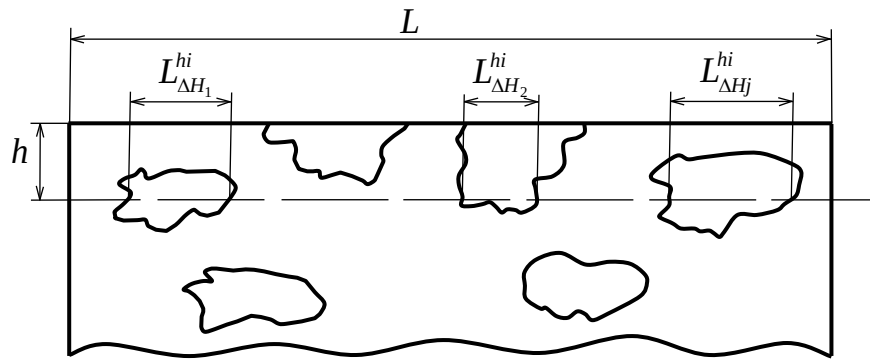


Рисунок 6.3 - Схема определения относительной опорной твердости $L_{\Delta H}^h$

Если с помощью параметров $L_{\Delta H}^h$ и $N_{\Delta H}^h$ описывать более твердые участки упрочненного поверхностного слоя, то характеристика неравномерности упрочнения будет выглядеть следующим образом. Так, если, при неизменном значении параметра $L_{\Delta H}^h$, будет увеличиваться $N_{\Delta H}^h$, то это означает, что на данном уровне упрочненный поверхностный слой будет состоять из более мелких твердых участков расположенных на более близком расстоянии друг от друга и неравномерность упрочнения такой структуры повышается. Если при неизменном значении $N_{\Delta H}^h$ будет увеличиваться $L_{\Delta H}^h$, то это означает, что на данном уровне упрочненного поверхностного слоя размеры твердых участков будут увеличиваться, а расстояние между ними уменьшаться и упрочненная структура будет более равномерной.

Параметры гетерогенности описывают характер чередования твердых участков имеющих одинаковую степень упрочнения. Глубина уровня h , на котором определяется относительная опорная твердость, может изменяться в пределах всего упрочненного поверхностного слоя.

Для определения параметров гетерогенности для всех степеней упрочнения на полученных в результате экспериментальных исследований эпюрах распределения микротвердости (рисунок 6.1, 6.2) уровни измерения наносились по глубине упрочненного слоя через интервал 0,1 мм. На этих уровнях в программе Компас оценивались длины $L_{\Delta H j}^h$ и относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $n_{\Delta H}^h$ для различных степеней упрочнения, на основании которых, используя зависимость (6.1 и 6.2), определялись $L_{\Delta H}^h$ и $N_{\Delta H}^h$

Например, при измерении относительной опорной твердости со степенью упрочнения $\Delta H_{\mu}=40\dots 50\%$, (рисунок 6.5) на базовой длине $L=9,45$ мм на глубине $h=0,4$ мм длина участков с заданной степенью упрочнения будет $L_{\Delta H 1}^h=0,96$ мм, $L_{\Delta H 2}^h=1,78$ мм, $L_{\Delta H 3}^h=0,76$ мм, $L_{\Delta H 4}^h=1,29$ мм их количество, соответственно $n_{\Delta H}^h=4$ шт, их сумма $\sum_{j=1}^{N_{\Delta H}^h} L_{\Delta H j}^h=(0,96+1,78+0,76+1,29)=4,79$ мм, а значения, согласно (3.1 и 3.2), $L_{\Delta H}^h=50,7\%$ и $N_{\Delta H}^h=0,42$ шт/мм.

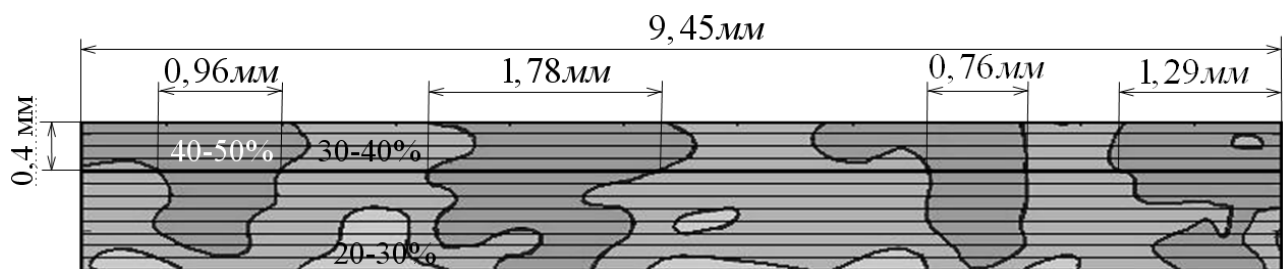


Рисунок 6.4 - Определение относительной опорной твердости для участков со степенью упрочнения 40...50% на глубине $h=0,4$ мм, на базовой длине $L=9,45$ мм

По результатам вычислений построены зависимости распределения относительной опорной твердости и относительного количества локальных

упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$, при различном коэффициенте перекрытия (рисунок 6.5 - рисунок 6.10) [27].

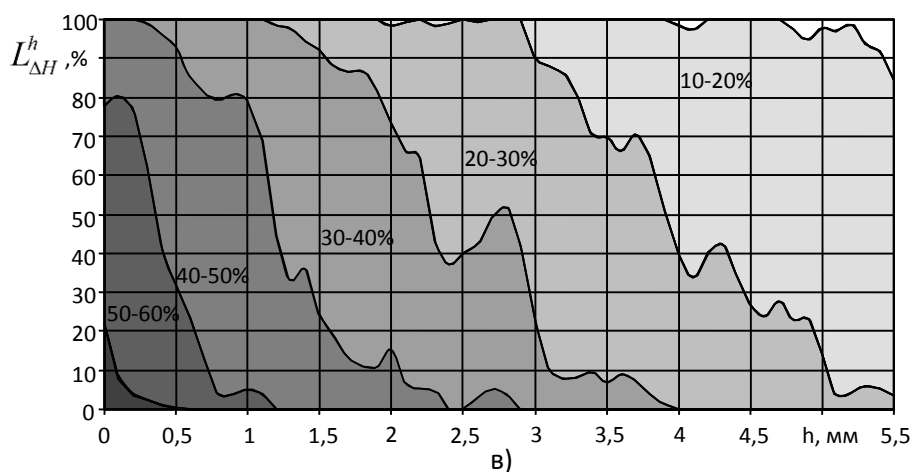
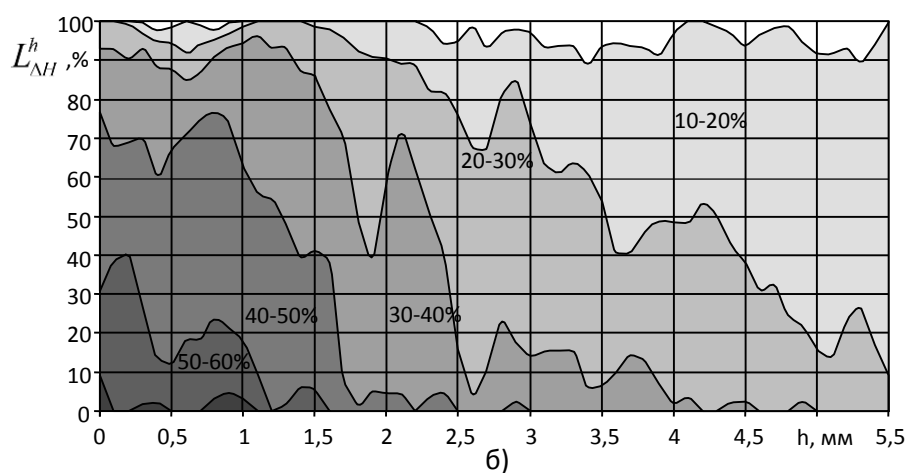
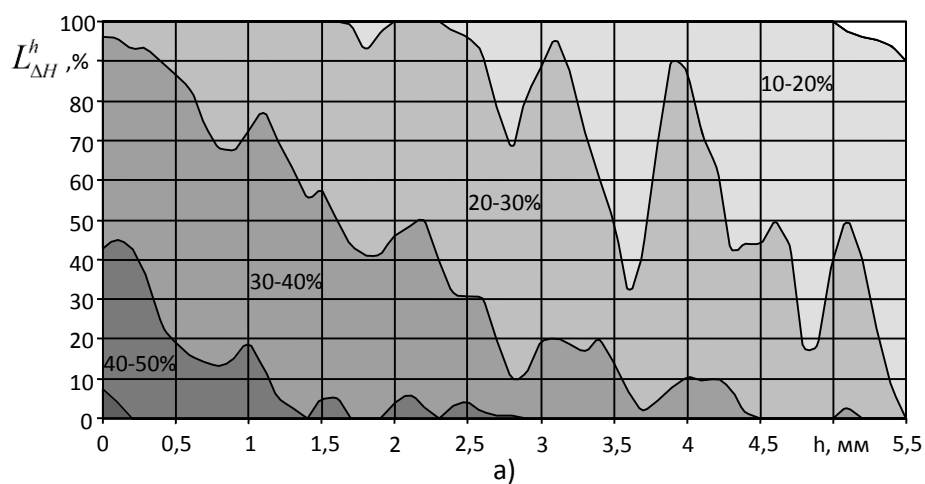
На полученных графиках были отмечены участки с большой степенью упрочнения, расположенные в более мягкой основе, размеры, количество и степень упрочнения которых зависят от коэффициента перекрытия и энергии удара. Очевидно, что размеры таких участков должны быть достаточными, чтобы воспринимать контактные нагрузки. Например, для поверхностного слоя, полученного при $K=0,375$ с энергией ударов 56 Дж относительная опорная твердость наиболее твердых участков со степенью упрочнения 60...70% составила не более 20% и скорее всего они не будут оказывать значительного сопротивления контактными нагрузкам. Основную нагрузку будут воспринимать участки с меньшей степенью упрочнения 50-60% и больших размеров.

Поэтому в данном случае целесообразно участки со степенью упрочнения 60...70% и 50...60% считать едиными твердыми участками, которые чередуются с более мягкими, имеющими степень упрочнения 30...50%.

Таким образом, при оценке твердых и мягких участков полученных структур будем считать, что если размеры участков с максимальной степенью упрочнения не превышают 20%, то за твердые участки принимаются также лежащие на том же уровне участки с меньшей (но не более чем на 10%) степенью упрочнения.

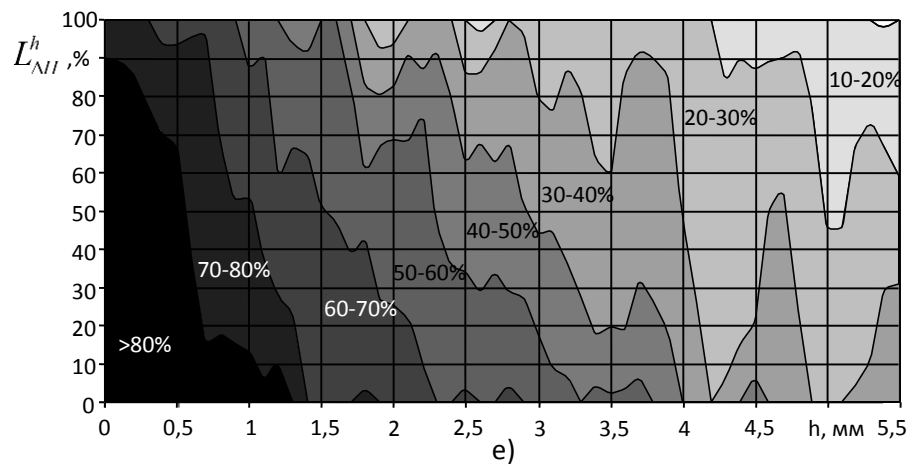
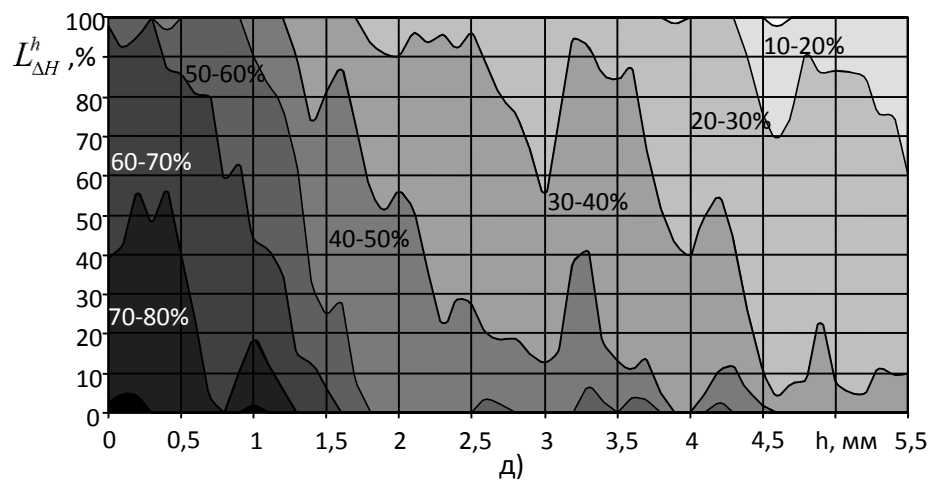
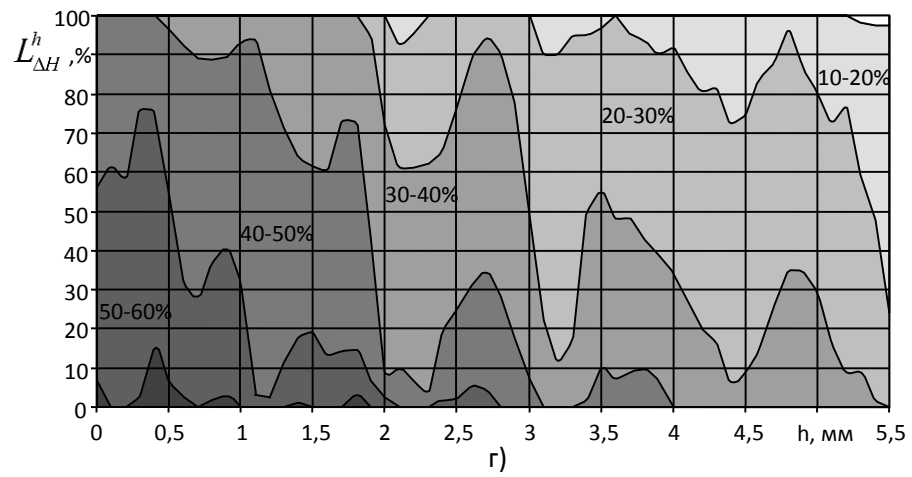
Анализ полученных зависимостей (рисунок 6.5 - рисунок 6.10) позволяет оценить размеры и относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине в упрочненном поверхностном слое в зависимости от перекрытия пластических отпечатков (таб.6.1).

Так, при упрочнении с энергией ударов 56 Дж при коэффициенте перекрытия $K=0$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 40...50% имеют максимальное значение относительной опорной твердости 43,1% на глубине 0,15 мм.

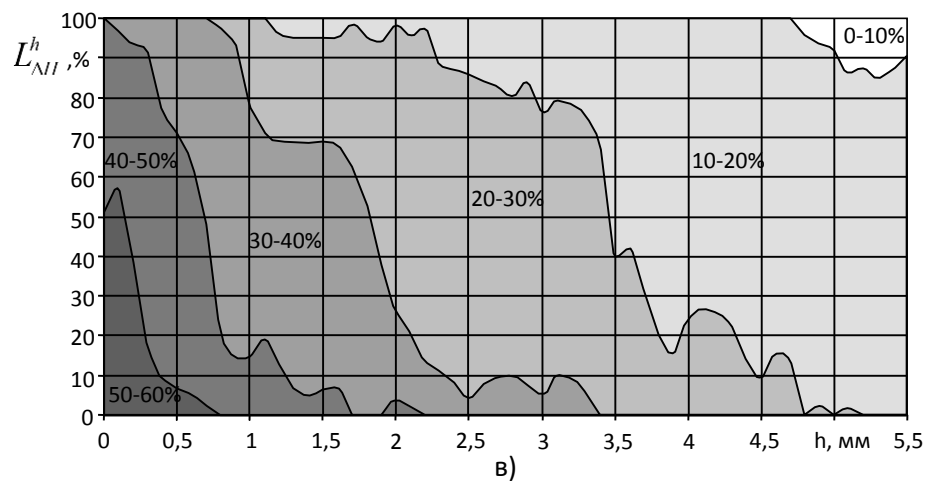
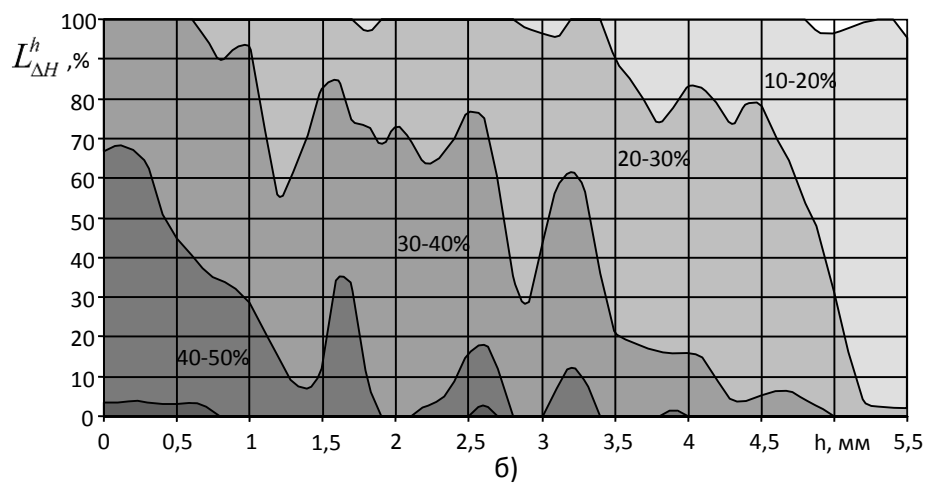
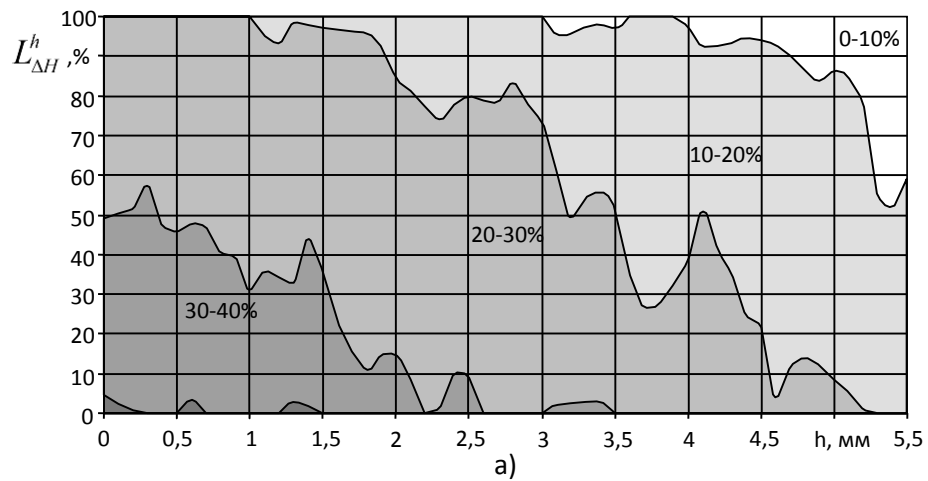


а - $K=0$; б - $K=0,25$; в - $K=0,375$; г - $K=0,5$; д - $K=0,7$; е - $K=0,9$

Рисунок 6.5 - Зависимость относительной опорной твердости $L_{\Delta H}^h$ по глубине h упрочненного поверхностного слоя при энергии удара $A=56$ Дж от коэффициента перекрытия отпечатков K (сталь 45, исходная твердость $HV_0=2000$ МПа)

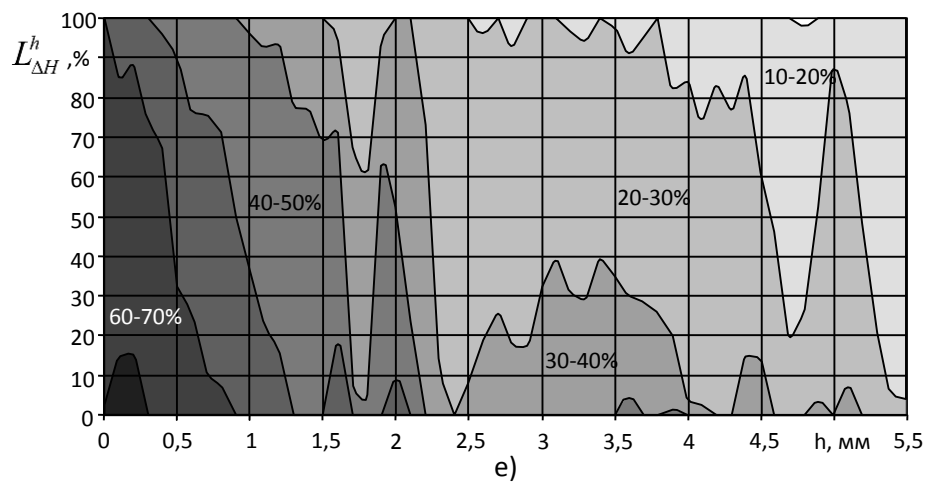
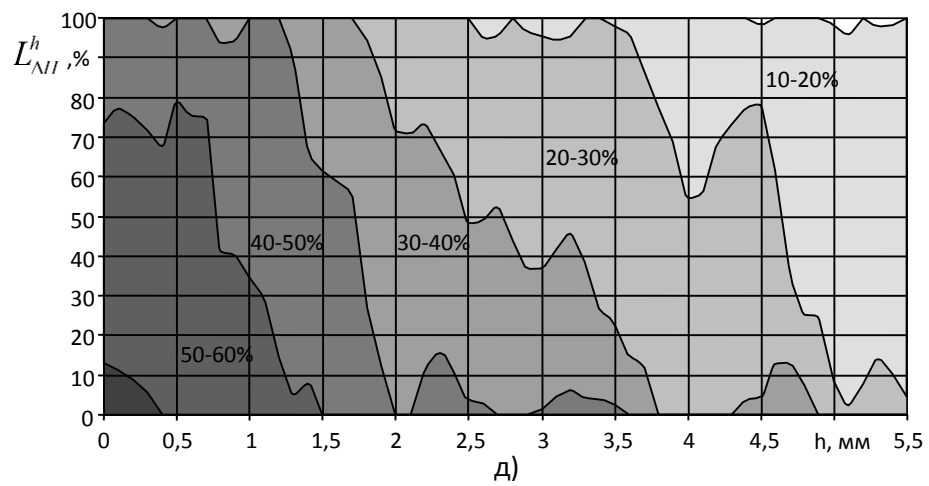
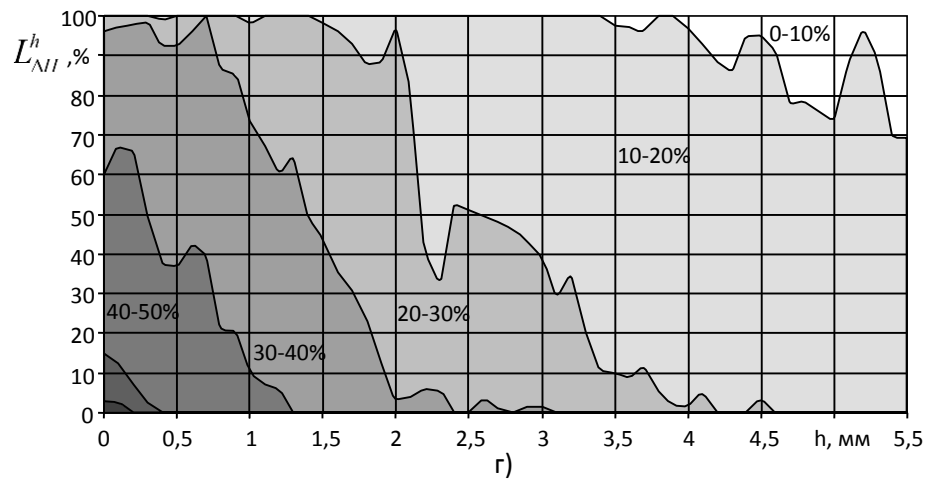


продолжение рисунок 6.5



а - $K=0$; б - $K=0,25$; в - $K=0,375$; г - $K=0,5$; д - $K=0,7$; е - $K=0,9$

Рисунок 6.6 - Зависимость относительной опорной твердости $L_{\Delta H}^h$ по глубине h упрочненного поверхностного слоя при энергии удара $A=70$ Дж от коэффициента перекрытия отпечатков K (сталь 45, исходная твердость $HV_0=2000$ МПа)



продолжение рисунок 6.6

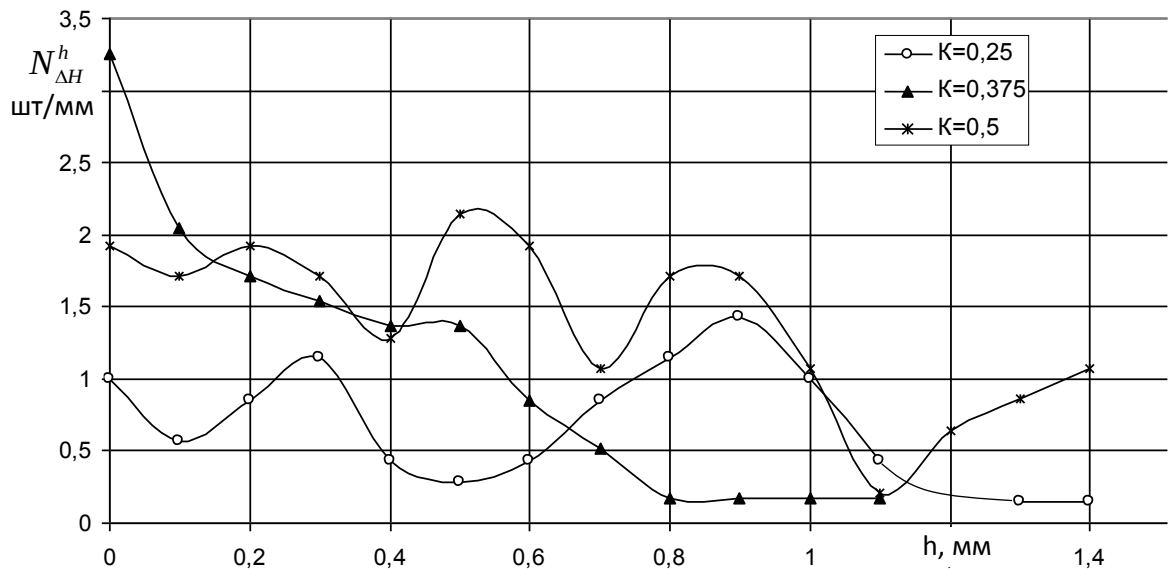


Рисунок 6.7 - Зависимость относительного количества локальных упрочненных участков $N_{\Delta H}^h$ со степенью упрочнения 50...60% по глубине упрочненного слоя h от коэффициента перекрытия отпечатков $0 < K < 0,5$ (при упрочнении с энергией ударов 56 Дж)

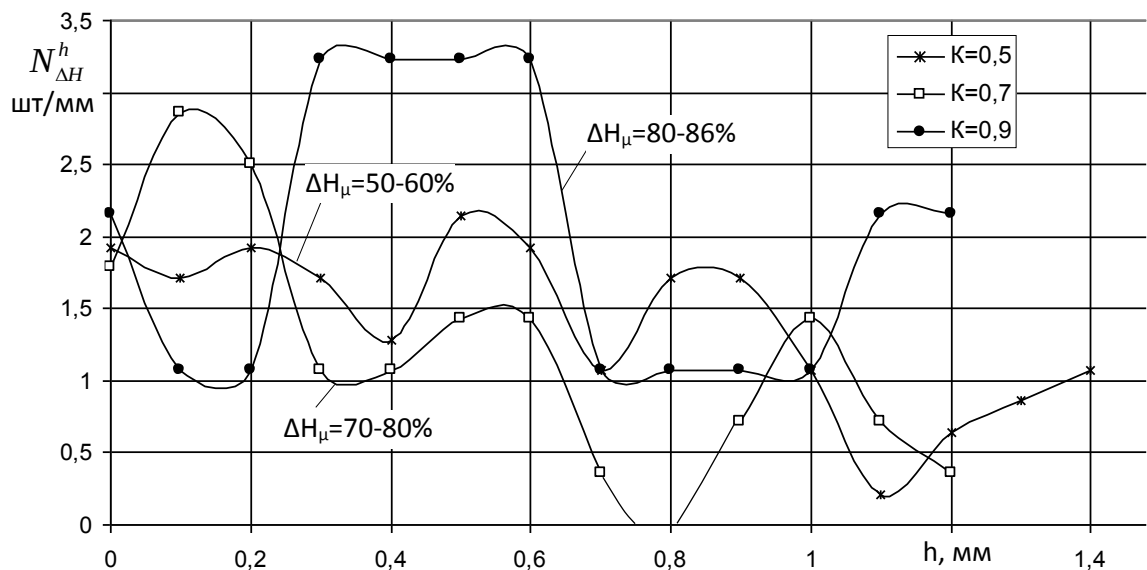


Рисунок 6.8 - Зависимость относительного количества локальных упрочненных участков $N_{\Delta H}^h$ по глубине упрочненного слоя h от коэффициента перекрытия отпечатков $0,5 < K < 0,9$ (при упрочнении с энергией ударов 56 Дж)

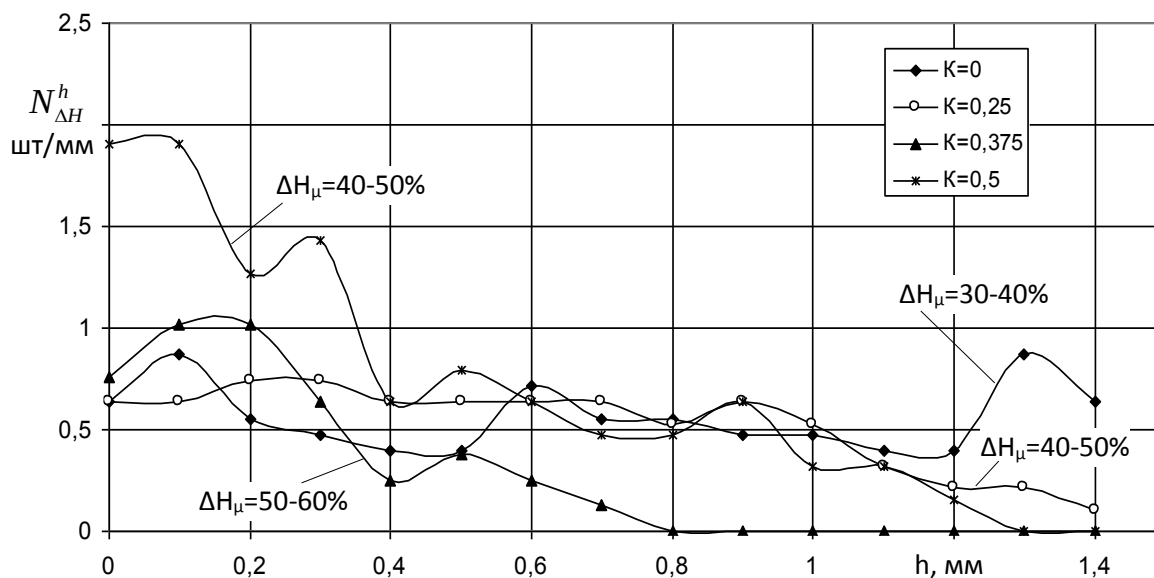


Рисунок 6.9 - Зависимость относительного количества локальных упрочненных участков $N_{\Delta H}^h$ по глубине упрочненного слоя h от коэффициента перекрытия отпечатков $0 < K < 0,5$ (при упрочнении с энергией ударов 56 Дж)

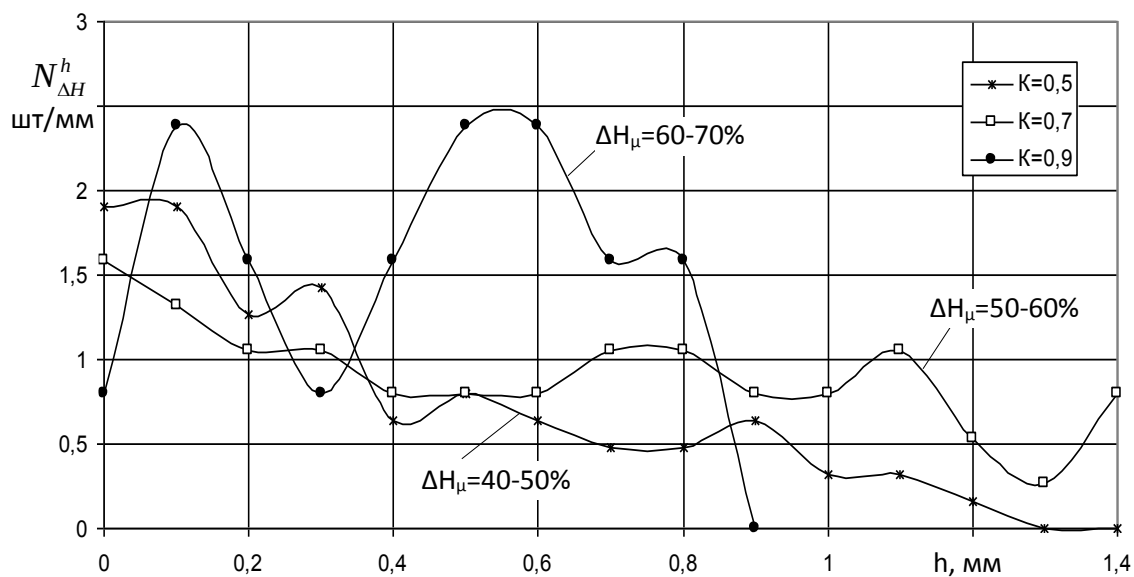


Рисунок 6.10 - Зависимость относительного количества локальных упрочненных участков $N_{\Delta H}^h$ по глубине упрочненного слоя h от коэффициента перекрытия отпечатков $0,5 < K < 0,9$ (при упрочнении с энергией ударов 70 Дж)

Таблица 6.1

К	А=56 Дж			А=70 Дж		
	$\Delta HV, \%$	$L_{\Delta H}^h, \%$	$N_{\Delta H}^h, \text{шт/мм}$	$\Delta HV, \%$	$L_{\Delta H}^h, \%$	$N_{\Delta H}^h, \text{шт/мм}$
0	40-50	43,1	0,85	30-40	58,2	0,48
0,25	50-60	40,7	0,85	40-50	64,9	0,63
0,375	50-60	81	3,24	50-60	58,4	1,02
0,5	50-60	76	1,7	40-50	58,6	1,27
0,7	70-80	56,4	2,5	50-60	79,4	0,8
0,9	>80	90	2,15	60-70	97,6	0,8

Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине со степенью упрочнения 40...50% составило 0,85 шт/мм.

При $K=0,25$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 50...60% имеют максимальное значение $L_{\Delta H}^h=40,7\%$ на глубине $h=0,15$ мм. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h=0,85$ шт/мм.

При $K=0,375$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 50...60% имеют максимальное значение относительной опорной твердости 81% на глубине 0,1 мм. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине с $\Delta H_{\mu}=50...60\%$ составило 3,24 шт/мм. В отличие от предыдущих случаев такая структура имеет большое относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине.

На эпюре с $K=0,5$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 50...60% имеют максимальное значение $L_{\Delta H}^h=76\%$ на глубине $h=0,3$ мм. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h=1,7$ шт/мм. В отличие от $K=0,375$ в данной структуре твердые участки начинают сливаться между собой, т.к. относительная опорная твердость примерно одинакова, а относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине стало значительно меньше.

При $K=0,7$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 70...80% т.е. близкой к максимальной 86%, имеют максимальное значение относительной опорной твердости 56,4% на глубине 0,15 мм. Относительное количество

локальных упрочненных участков на базовой длине со степенью упрочнения 70...80% составило 2,5 шт/мм.

При $K=0,9$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 80...86% имеют максимальное значение относительной опорной твердости 90% непосредственно на поверхности. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине с $\Delta H_{\mu}=80...86\%$ составило 2,15 шт. Такую структуру можно считать практически равномерно упрочненной.

Так, при упрочнении с энергией ударов 70 Дж при коэффициенте перекрытия $K=0$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 30...40% имеют максимальное значение относительной опорной твердости 58,2% на глубине 0,25 мм. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине со степенью упрочнения 30...40% составило 0,48 шт/мм.

При $K=0,25$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 40...50% имеют максимальное значение $L_{\Delta H}^h=64,9\%$ на глубине $h=0,1$ мм. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h=0,63$ шт/мм.

При $K=0,375$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 50...60% имеют максимальное значение относительной опорной твердости 58,4% на глубине 0,1 мм.

На эюре с $K=0,5$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 40...50% имеют максимальное значение $L_{\Delta H}^h=58,6\%$ на глубине $h=0,25$ мм. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине на данном уровне $N_{\Delta H}^h=1,27$ шт/мм.

При $K=0,7$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 50...60%, имеют максимальное значение относительной опорной твердости 79,4% на глубине 0,5 мм. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине со степенью упрочнения 50...60% составило 0,8 шт/мм.

При $K=0,9$ наиболее твердые участки со степенью упрочнения 60...70% имеют максимальное значение относительной опорной твердости 97,6% непосредственно на поверхности. Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине с $\Delta H_{\mu}=60...70\%$ на данном уровне

составило 0,8 шт. Такую структуру можно считать практически равномерно упрочненной.

При $K=0,375\dots0,5$ наблюдается наибольшее количество твердых участков, т.е. структуру, полученную при таком коэффициенте перекрытия отпечатков, можно считать более гетерогенно упрочненной, чем при других значениях K .

На ряде образцов, полученных при энергии ударов 70 Дж, была получена меньшая степень упрочнения твердых участков, чем при энергии ударов 56 Дж, так как толщина упрочненного поверхностного слоя на таких образцах срезанного механической обработкой, была значительно больше (см. рисунок 6.1 и рисунок 6.2).

Таким образом, при $K\leq0,5$ формируется явная гетерогенная структура, имеющая твердые и мягкие участки. Твердые участки обладают достаточной степенью упрочнения 30...60%, но меньшей чем максимально достигаемая при наклепе данной стали. Это придает твердым упрочненным участкам с одной стороны высокую прочность, а с другой достаточную пластичность, чтобы противостоять высоким контактными нагрузкам.

Гетерогенная структура сформированная при $K\leq0,5$ будет иметь различную равномерность. С увеличением коэффициента перекрытия отпечатков в диапазоне $0\leq K\leq0,375$ относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$ изменяется от 0,5 до 3,2 шт., что свидетельствует об увеличении неравномерности упрочнения. При увеличении относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине уменьшается до 1,7 шт, при практически одинаковом значении относительной опорной твердости, что свидетельствует об увеличении равномерности упрочнения.

При $K>0,5$ появляются участки с максимальной или близкой к максимальной степенью упрочнения и начиная с $K>0,7$ эти участки занимают большую часть упрочненного поверхностного слоя на глубине до 0,5 мм. Такие участки обладают высокой прочностью, но низкой пластичностью, что может привести к снижению выносливости поверхности при действии контактных циклических нагрузок.

Таким образом, можно выделить несколько интервалов изменения коэффициента перекрытия отпечатков при формировании неравномерности упрочнения.

При $K \leq 0,25$ формируется гетерогенно упрочненная структура, имеющая крупные $N_{\Delta H}^h = 0,5 \dots 0,85$ шт/мм твердые участки с высокой, но ниже максимальной, степенью упрочнения $30 \dots 60\%$, расположенные на значительном расстоянии друг от друга $L_{\Delta H}^h = 40 \dots 60\%$.

При $0,25 < K < 0,5$ формируется гетерогенно упрочненная структура с наибольшей неравномерностью упрочнения, имеющая мелкие твердые участки, относительное количество которых достигает $N_{\Delta H}^h = 3,2$ шт/мм с высокой, но ниже максимальной степенью упрочнения $40 \dots 60\%$, расположенные на близком расстоянии друг от друга $L_{\Delta H}^h = 70 \dots 80\%$.

При $0,5 \leq K < 0,7$ упрочненная структура становится более равномерной, поскольку при $L_{\Delta H}^h = 70 \dots 80\%$, относительное количество твердых участков снизилось $N_{\Delta H}^h = 1,7 \dots 1,9$ шт/мм.

При $0,7 \leq K \leq 0,9$ упрочненная структура на глубине до $0,5$ мм состоит из твердых участков с максимальной или близкой к ней степенью упрочнения, относительное число которых $N_{\Delta H}^h = 2,2 \dots 2,5$ шт/мм и расстояние между ними может изменяться в широком диапазоне $L_{\Delta H}^h = 40 \dots 90\%$. Структуру, полученную при $K \leq 0,9$, можно считать практически равномерно упрочненной.

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- Размеры пластического отпечатка определяют основную степень и глубину получаемого упрочненного поверхностного слоя. В зависимости от коэффициента перекрытия, связывающего энергию и частоту ударов, размеры инструмента и свойства обрабатываемого материала, может быть получен упрочненный поверхностный слой с любой равномерностью на глубине до $4 \dots 5$ мм и более.

- Определены параметры гетерогенной структуры материала, характеризующие количество и процентное соотношение твердых и мягких

составляющих: относительная опорная твердость $L_{\Delta H}^h$ и относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$.

- Установлены характерные структуры поверхностного слоя, сформированные в зависимости от коэффициента перекрытия отпечатков. Так, на первом интервале $0 < K \leq 0,25$ формируется гетерогенная структура, характеризующаяся небольшими размерами твердых участков, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. На втором $0,25 < K < 0,5$ интервале увеличивается количество твердых участков (твердые участки дробятся), а расстояние между ними уменьшается. На третьем интервале $0,5 \leq K < 0,7$ структура становится более равномерной за счет слияния некоторых твердых участков. На четвертом интервале $0,7 \leq K \leq 0,9$ структура состоит из твердых участков с максимальной или близкой к ней степенью упрочнения и при $K = 0,9$ структура становится практически равномерной.

- Установлен диапазон с наиболее выраженной гетерогенностью $0,25 < K \leq 0,5$, характеризующийся формированием участков со степенью упрочнения 50...60% с относительной опорной твердостью $L_{\Delta H}^h$ 50...80%, и относительным количеством локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$ достигающим 3,2 шт/мм [57, 60, 62, 88, 91, 100, 121, 167, 178, 186].

6.2 Исследование влияния ВДУ на сопротивление контактному выкрашиванию. Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию

6.2.1 Исследование влияния ВДУ на сопротивление контактному выкрашиванию

Для оценки возможностей ВДУ по созданию гетерогенной структуры, повышающей долговечность деталей машин в условиях контактной выносливости, были взяты образцы из сталей 45, 40Х и 35ХГСА с исходной микротвердостью 2000 – 2200 МПа. Выбор материала обусловлен тем, что сталь 45 является эталонной в машиностроении, а стали 40Х и 35ХГСА используются для создания

тяжелонагруженных деталей машин, работающих в условиях контактных циклических нагрузок. Образцы представляют собой пластины толщиной 20 мм, которые упрочнялись с различной удельной энергией ударов ($5 < a < 7$ Дж/мм) и с различным коэффициентом перекрытия K . В качестве инструмента использовались стержневые ролики диаметром 10 мм. Выбор данных технологических параметров ВДУ обусловлен тем, что они существенно влияют на формы, размеры, глубины и степени упрочнения формируемой гетерогенной структуры [155].

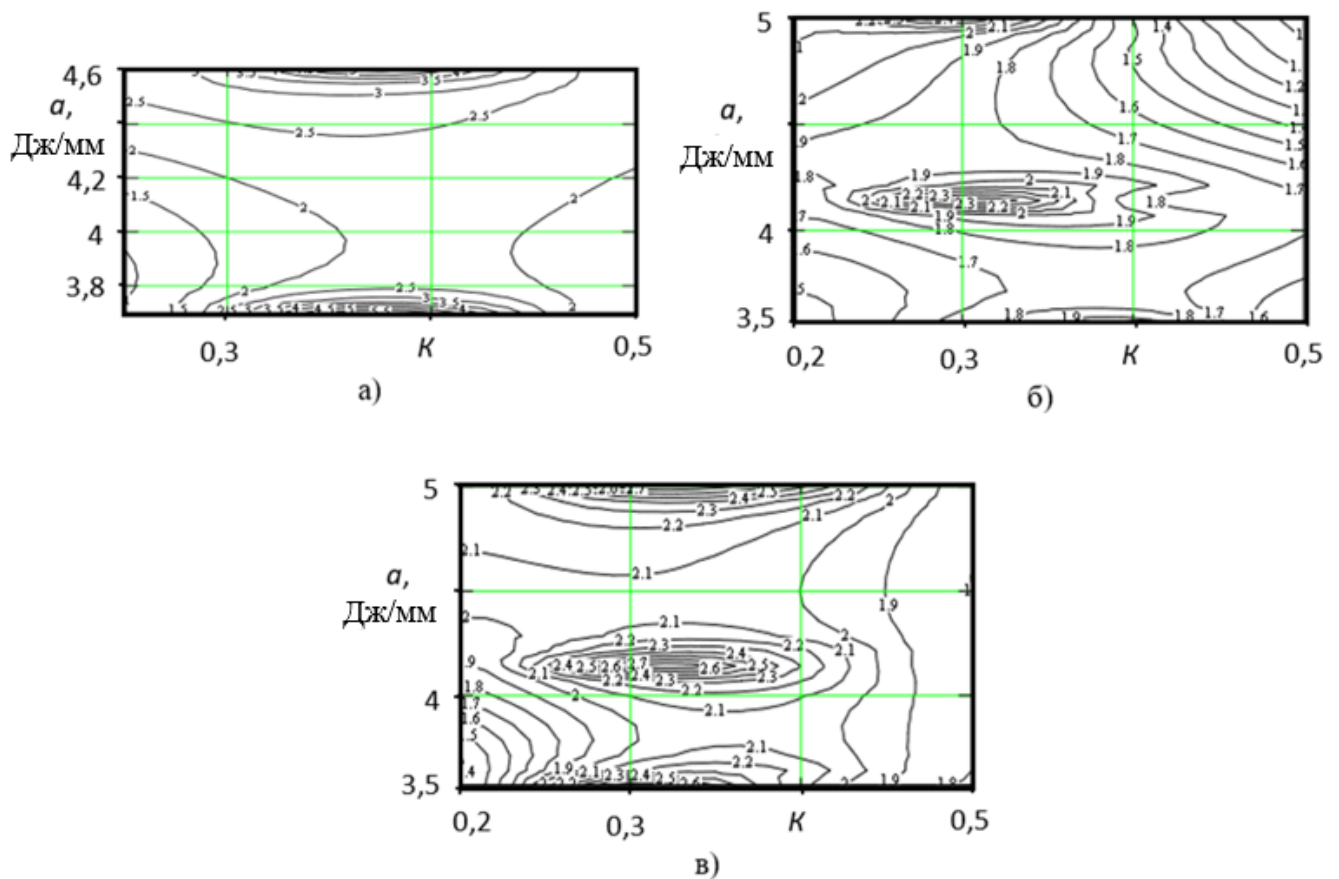
Для исследования долговечности, полученные накатыванием и ВДУ упрочненные образцы подвергались контактному циклическому нагружению контртелами в форме шаров при одинаковой контактной нагрузке, на специально разработанной установке рисунок 2.11 [123, 131, 140, 141, 165, 198, 197]. Это позволило формировать на поверхности образцов одновременно следы нескольких дорожек качения, которые после испытаний были исследованы. Результаты экспериментальных исследований сопротивления контактному выкрашиванию представлены в виде графиков на рисунке 6.11.

Так, при исследовании влияния коэффициента перекрытия на ΔI было установлено, что у стали 45 максимальные значения $\Delta I=4-6$ наблюдались при значении $K=0,4$ (рисунок 6.11, а). Наиболее эффективные значения ΔI у сталей 40Х и 35ХГСА были достигнуты при $K=0,3$ и составили соответственно 2-2,3 и 2,1-2,8 (рисунок 6.11, б, в). Влияние величины удельной энергии удара на сопротивление контактному выкрашиванию на всех исследуемых сталях показало, что с увеличением a , диапазон эффективных значений ΔI смещается в сторону меньшего значения коэффициента перекрытия, что связано с увеличением зоны деформируемого металла под единичным отпечатком [58].

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 [105, 191, 198].

6.2.2 Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию

Однако на сегодняшний момент технология машиностроения не дает технологических рекомендаций по режимам упрочнения и тем более по необходимой картине распределения в поверхностном слое твердых и вязких участков, обеспечивающих повышение долговечности. Это связано с малой изученностью процесса гетерогенного упрочнения и с отсутствием методики оценки формируемых твердо-вязких структур в поверхностном слое. Все это сдерживает более широкое распространение в промышленности предлагаемой технологии гетерогенного деформационного упрочнения.



a - сталь 45; б - сталь 40X; в - сталь 35ХГСА

Рисунок 6.11 Зависимости сопротивления контактному выкрашиванию ΔI от удельной энергии ударов a и коэффициента перекрытия K

Для расширения представлений о возможностях гетерогенных структур, полученных деформирующей ВДУ, и установления взаимосвязи между получаемыми сочетаниями твердых и вязких областей и формируемой долговечностью были проведены исследования, выполненные на сталях 45, 40Х и 35ХГСА. Выбор материала обусловлен тем, что сталь 45 является эталонной в машиностроении, а стали 40Х и 35ХГСА широко используются для создания тяжело нагруженных деталей машин, работающих в условиях контактных циклических нагрузок.

Долговечность образцов с гетерогенной структурой, полученных ВДУ, будет оцениваться в условиях контактного циклического нагружения по величине сопротивления контактному выкрашиванию (ΔI), позволяющей качественно и количественно сравнить величину выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной. Критерий ΔI является комплексным параметром, учитывающим изменение в процессе испытаний размеров следов дорожек катания шаров и площадь возникших на них выкрашиваний.

Результаты испытаний на долговечность в условиях контактного циклического нагружения показали, что у стали 45 сопротивление контактному выкрашиванию было повышено в 4..6 раз при коэффициенте перекрытия пластических отпечатков $K=0,4$. Наиболее эффективные значения ΔI у сталей 40Х и 35ХГСА были получены при $K=0,3$ и составили соответственно 2-2,3 и 2,1-2,8 [20].

После исследования долговечности образцы с созданными гетерогенными структурами были разрезаны по середине упрочненной дорожки в направлении подачи инструмента для ВДУ. Для визуальной оценки распределения твердых и вязких участков по всему полученному сечению была измерена микротвердость. На полученных эпюрах распределения микротвердости (рисунок 6.12) в зависимости от режимов ВДУ наблюдались разные чередования твердых и вязких участков как по глубине, так и в направлении подачи инструмента для ВДУ. Для оценки полученных эпюр распределения микротвердости были введены численные характеристики, позволяющие описать распределение твердых и вязких участков в поверхностном слое, - параметры гетерогенности: относительная опорная

твёрдость $L_{\Delta H}^h$ и относительное количество локальных упрочнённых участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$.

На основании рассчитанных параметров гетерогенности и результатов испытаний на сопротивление контактному выкрашиванию были построены графики их взаимосвязи (рисунок 6.13-6.15).

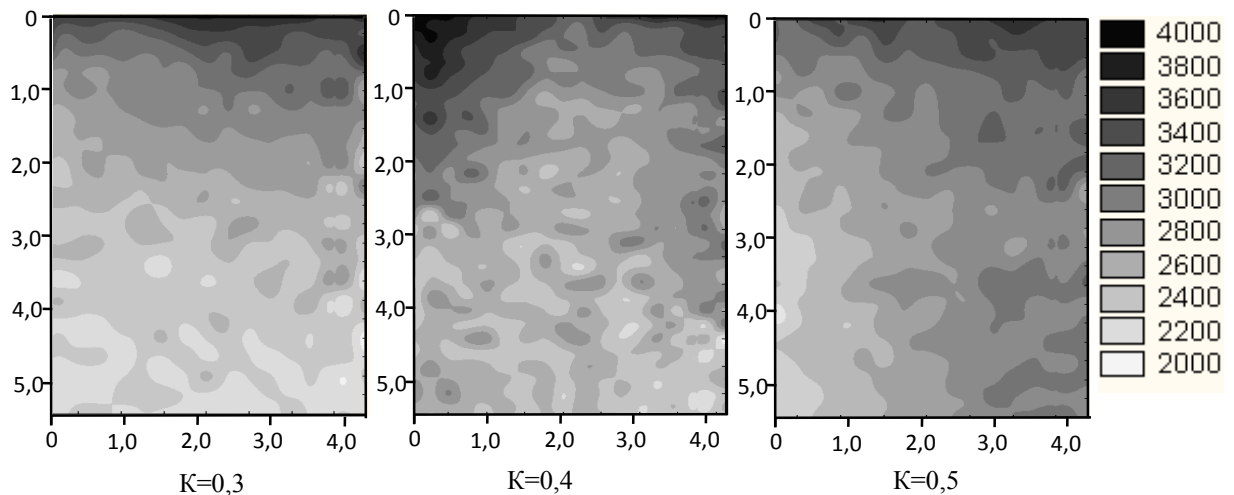


Рисунок 6.12 - Примеры эпюр распределения микротвёрдости (HV, МПа) по толщине поверхностного слоя стали 40X

Анализ эпюр взаимосвязи параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию показал, что у стали 45 наибольшие значения ΔI 4..6 раз могут быть достигнуты при преобладающей степени упрочнения ΔH 45-55%, если будут обеспечены $L_{\Delta H}^h$ от 55 до 70 % и $N_{\Delta H}^h$ от 2,5 до 3,1 шт/мм. Для стали 40X наибольшие значения ΔI 2..2,3 раз могут быть достигнуты при преобладающей степени упрочнения ΔH 50-70%, если будут обеспечены $L_{\Delta H}^h = 53-70$ % и $N_{\Delta H}^h = 0,9-1,5$ шт/мм. Для стали 35ХГСА наибольшие значения ΔI 2,1..2,8 раз могут быть достигнуты при преобладающей степени упрочнения ΔH 50-120%, если будут обеспечены $L_{\Delta H}^h = 30-50$ % и $N_{\Delta H}^h = 0,4-1,1$ шт/мм.

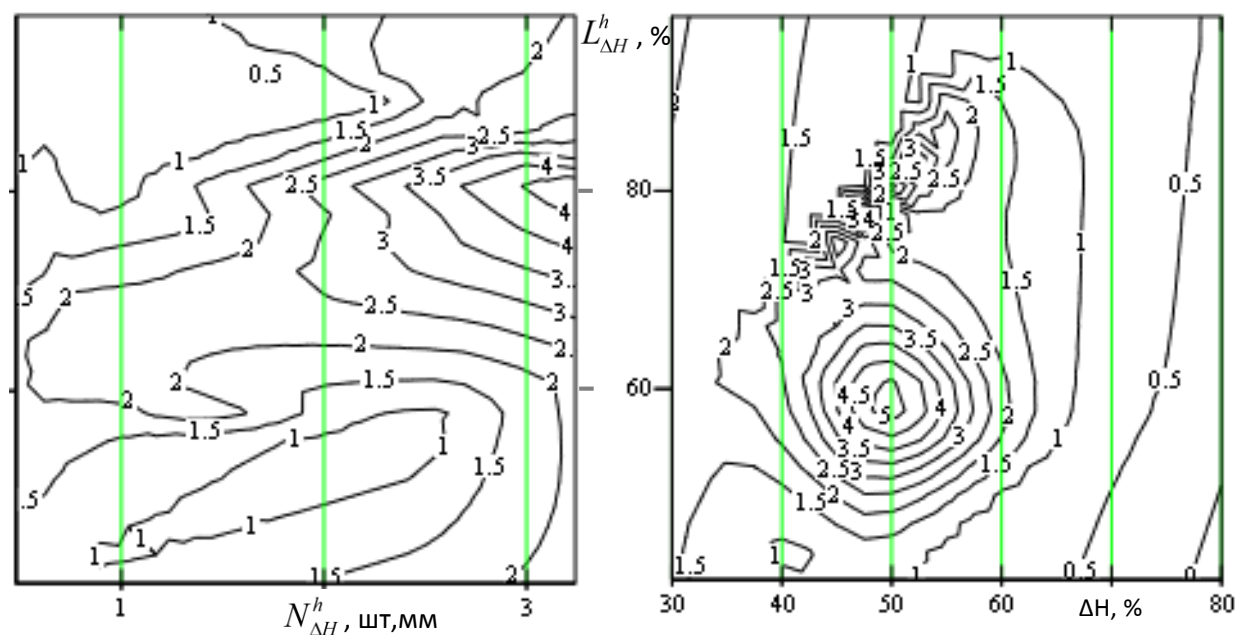


Рисунок 6.13 - Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию у стали 45

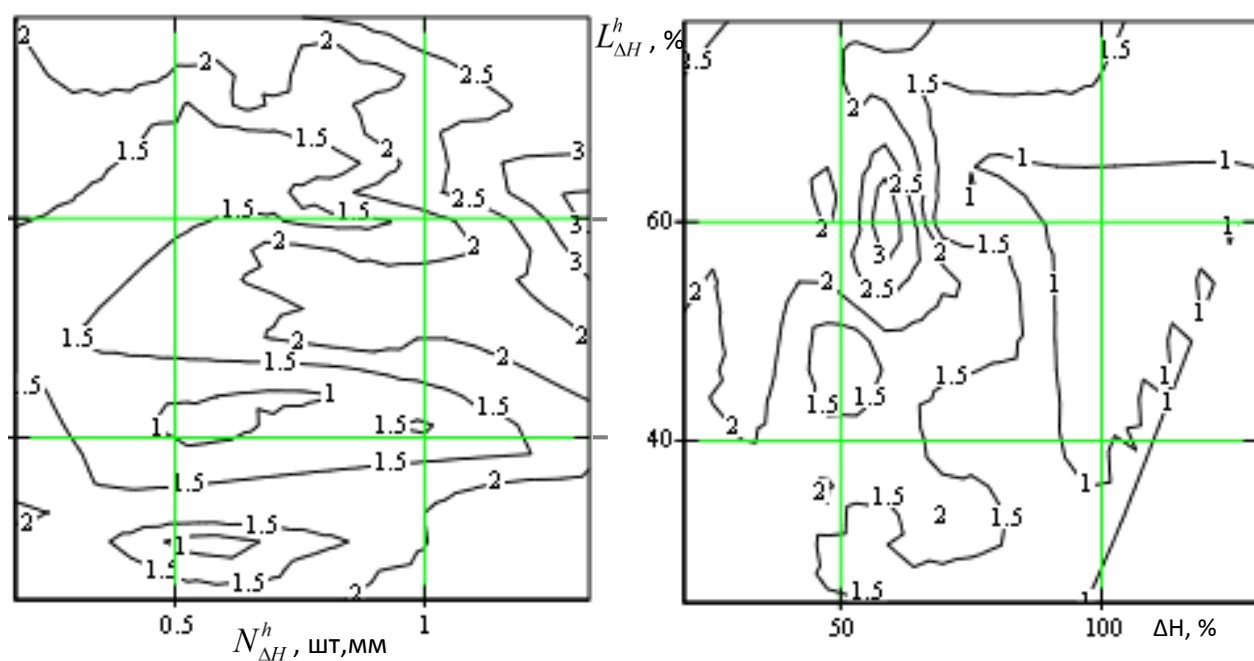


Рисунок 6.14 - Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию у стали 40X

Обработка в программе Statistica данных взаимосвязи параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию позволила

получить следующие математические модели для сталей 45 (6.3), 40Х (6.4), 35ХГСА (6.5), соответственно:

$$\Delta I = 4,12727 - 0,086158 \cdot \Delta H + 0,009446 \cdot L_{\Delta H}^h + 1,15528 \cdot N_{\Delta H}^h \quad (6.3),$$

$$\Delta I = 1,306093 - 0,009794 \cdot \Delta H + 0,009218 \cdot L_{\Delta H}^h + 0,623352 \cdot N_{\Delta H}^h \quad (6.4),$$

$$\Delta I = 2,034601 - 0,002843 \cdot \Delta H + 0,003638 \cdot L_{\Delta H}^h - 0,260304 \cdot N_{\Delta H}^h \quad (6.5).$$

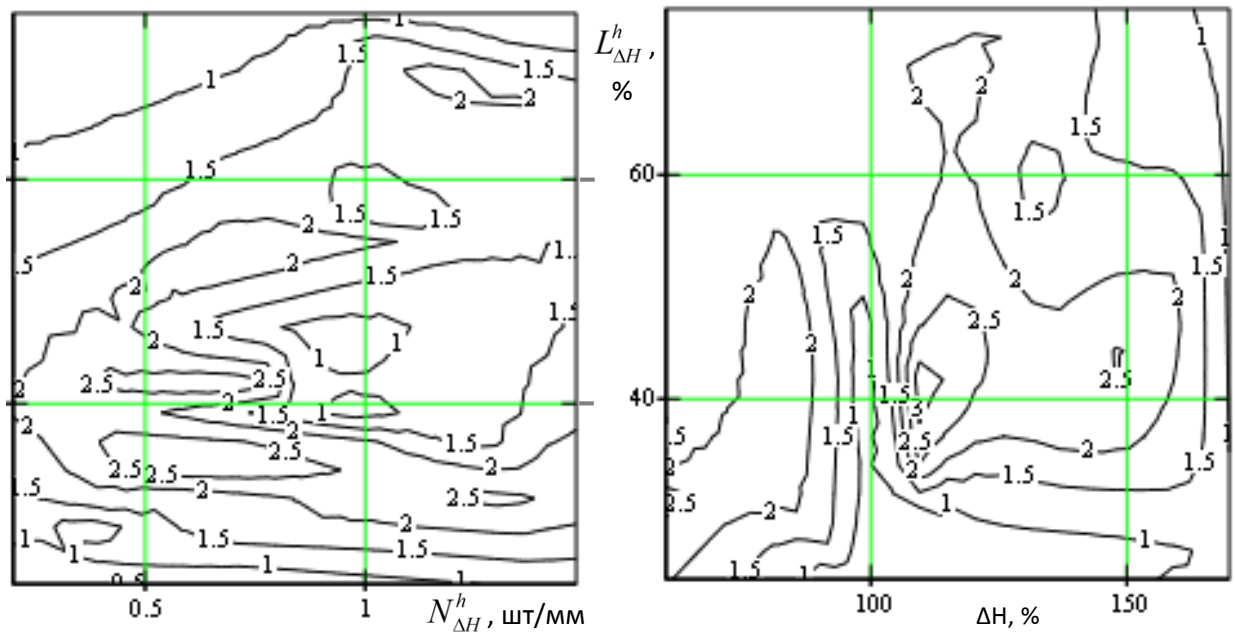


Рисунок 6.15 - Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию у стали 35ХГСА

Регрессионный анализ полученных моделей показал, что все параметры значимы, адекватность моделей для сталей 45, 40Х, 35ХГСА составила, соответственно 91%; 85% и 87%. Данные регрессии свидетельствуют об адекватности использования полученных математических моделей для определения параметров гетерогенности в зависимости от требуемой ΔI для сталей 45, 40Х, 35ХГСА.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что:

- наиболее значимыми технологическими факторами ВДУ, оказывающими наибольшее влияние на величину сопротивления контактному выкрашиванию рассматриваемых материалов (стали 45, 40Х, 35ХГСА) с гетерогенной структурой,

являются энергия ударных импульсов, перекрытие пластических отпечатков и упругопластические свойства материала.

- для стали 40Х и 35ГХСА, в отличие от стали 45, максимальный диапазон сопротивления контактному выкрашиванию (ΔI) был достигнут при создании гетерогенной структуры с меньшей равномерностью упрочнения, формирующийся при коэффициенте перекрытия отпечатков $K=0,3$ (у стали 45 $K=0,4$). Численные значения сопротивления контактному выкрашиванию при создании гетерогенной структуры в стали 45 в 2..2,5 раза превышали данные ΔI , полученные для сталей 40Х и 35ГХСА.

- с увеличением удельной энергии удара, при создании гетерогенной структуры ВДУ, области оптимальных значений смещаются в сторону меньших значений коэффициентов перекрытий из-за увеличения зоны деформированного металла под единичным отпечатком [26, 58, 84, 89, 102, 104, 105, 122, 156, 161].

6.3 Исследования влияния ВДУ на прочность сварных швов и зоны термического влияния в условиях знакопеременных нагрузок

Условия эксперимента

Для проведения исследований использовалась серво-гидравлическая испытательная машина Torsion 10 кНм. 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. Испытания выполнялись при постоянном крутящем моменте, рассчитанном исходя из размеров образца и предела прочности материала на кручение [59].

В качестве образцов для испытаний использовались пластины: со сварными швами обработанные ВДУ; со сварными швами без обработки ВДУ; без сварных швов и обработки ВДУ. В качестве материалов для образцов использовались стали: 09Г2С, 10ХСНД, 30ХГСА. Выбор марок сталей связан с их широким применением

в сельском хозяйстве для изготовления сварных элементов машин и оборудования. Каждый режим испытаний для выбранных марок материалов дублировался пять раз.

Из каждого материала вырезались заготовки размерами 75*80 мм и затем с помощью сварочного полуавтомата они сваривались в пластину 150*80 мм. Для сварки образцов из стали 09Г2С использовалась проволока марки SG2. Образцы из стали 10ХСНД сваривались проволокой сварочной SG3. Сварка стали 30ХГСА велась электрода марки УОНИ-13/65. Сварка пластин выполнялась встык. На каждом образце от середины длинной стороны к центру выполнены симметричные пазы шириной 2 мм, таким образом, чтобы расстояние между ними составляло 40 мм. В захваты машины образец закрепляется по 50 мм с каждой стороны. Итого рабочая (нагружаемая) часть образца имеет длину 50 мм [59].

ВДУ сварного шва проводилось с энергией 150 Дж с частотой ударов 10 Гц и с режимами, обеспечивающими перекрытие отпечатков ударов инструмента с коэффициентом $K=0,3$. Выбор данного значения коэффициента перекрытия K обоснован данными предварительных экспериментов, как наиболее эффективное значение [62, 186]. В качестве инструмента, при ВДУ использовался стержневой ролик диаметром 10 мм и шириной 40 мм. Для обработки использовались ударные импульсы, генерируемые ударным устройством, в котором обеспечивается отношение длин бойка и волновода $L_1/L_2=3$, а отношение длины бойка к его диаметру $L_1/d_1=10$.

После изготовления (обработки) все образцы для испытаний подвергались шлифовке до толщин, указанных на рисунках 3-5. Это связано с необходимостью устранения следов ударов инструмента после ВДУ и выступающего катета сварного шва над поверхностью заготовки.

Режимы циклических испытаний на серво-гидравлической машине, для каждой марки материала, предварительно определялись эмпирическим путем на калибровочных образцах. Данные образцы представляли собой исходный материал, без упрочнения и сварных швов. Полученные в результате исследований данные подвергались регрессионному анализу [59].

Результаты исследований

В результате проведения серии испытаний, в условиях знакопеременных нагрузок, установлено влияние ВДУ на прочность сварных швов. Примеры этапов разрушения пластин выбранных материалов со сварными швами после ВДУ представлены на рисунке 6.16-6.18.



Рисунок 6.16 - Этапы разрушения образца из стали 10XCHD толщиной 5,5 мм (нагрузка 115Нм; частота нагружения 0,14 Гц)



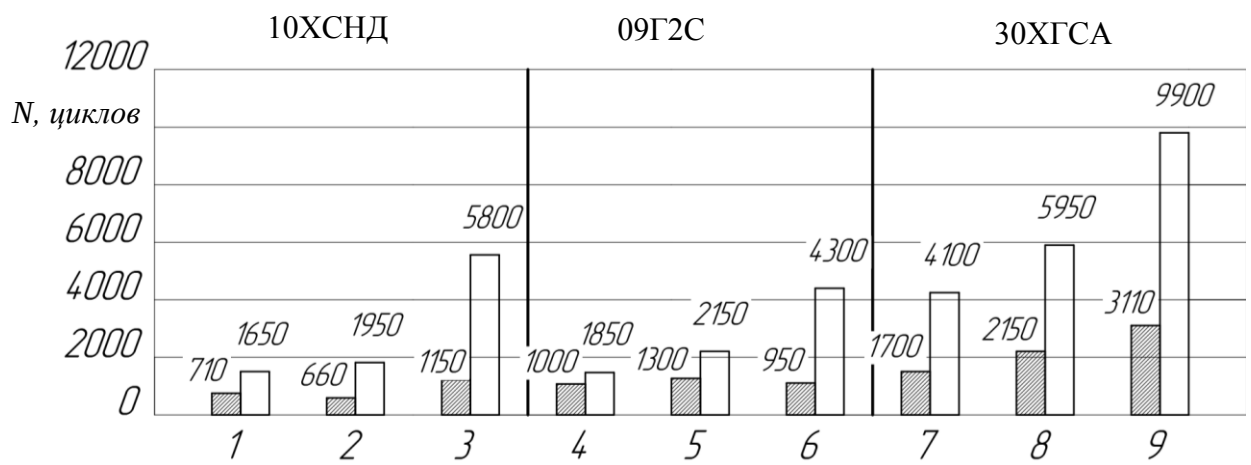
Рисунок 6.17 - Этапы разрушения образца из стали 09Г2С толщиной 9 мм (нагрузка 250 Нм; частота нагружения 0,15 Гц)



Рисунок 6.18 - Этапы разрушения образца из стали 30ХГСА толщиной 7 мм (нагрузка 190 Нм; частота нагружения 0,15 Гц)

В процессе проведения испытаний установлено, что преимущественно на всех образцах трещины зарождались под углом около 45 градусов от углов прорезанных пазов пластины. В результате циклического нагружения трещины разрастались на встречу друг другу по дуговой траектории. Только что зародившиеся трещины напоминали собой царапины на поверхности пластин. Полученные результаты исследований в графической форме представлены на рисунке 6.19.

Предварительные нагружения на серво-гидравлической машине калибровочных пластин из стали 10ХСНД позволили установить режим испытаний для данного материала: нагрузка 115Н*м; частота нагружения 0,14 Гц. Так, при циклическом испытании у образцов из стали 10ХСНД без упрочнения и сварных швов, после 710 циклов нагружения, появились первые трещины, а при 1650 циклах наступило их разрушение. У образцов из стали 10ХСНД со сварными швами, но без упрочнения зарождение трещин отмечено на 660 циклах нагружения, а их разрушение настало при 1950. При испытании образцов из стали 10ХСНД со сварными швами после ВДУ, первые трещины замечены при 1150 циклах нагружения, а их разрушение настало при 5800. При испытании образцов из стали 10ХСНД со сварными швами после ВДУ, первые трещины замечены при 1150 циклах нагружения, а их разрушение настало при 5800 циклах [59].



1,4,7 – образец без шва; 2,5,8 – образец со сварным швом без ВДУ; 3,6,9 – образец со сварным швом, упрочненным ВДУ (▨ - число циклов, при которых возникла первая трещина в испытываемом материале; □ - число циклов, при которых наступило разрушение испытываемого материала)

Рисунок 6.19 - Результаты исследований усталостной прочности сталей [59]

Предварительные нагружения образцов из стали 09Г2С определили режимы циклических испытаний: нагрузка $250\text{Н}\cdot\text{м}$, частота нагружения 0,15 Гц. Так, у образцов без упрочнения и сварного шва явно заметные трещины появились при 1000 циклах нагружения, а при 1850 образец разрушился. У пластин из стали со сварными швами, но без упрочнения первые трещины стали видны при 1300 циклах нагружения, а при 2150 настало его разрушение. Испытания пластин из стали 09Г2С со сварными швами после ВДУ показали, что первые трещины появились при 950 циклах, а разрушение материала наступило при 4300 циклах нагружения.

Режимы циклических испытаний пластин из стали 30ХГСА составили: нагрузка $190\text{Н}\cdot\text{м}$, частота нагружения 0,15 Гц. Так, при циклическом испытании пластин из стали 30ХГСА без швов и упрочнения, появление первых трещин настало при 1700 циклах, а при 4100 наступило разрушение. У сварных пластин без ВДУ первые трещины возникли после 2150 циклов, а разрушился образец при 5950 циклах нагружения. Испытания пластин со сварным швом, обработанным ВДУ, показали образование трещин после 3110 циклов нагружения, а на 9900 цикле возникло разрушение материала.

На основании анализа результатов экспериментов установлено повышение прочности сварных швов, работающих в условиях знакопеременных нагрузок на разных материалах после их упрочнения волной деформации для 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, с материалами без сварки и упрочнения.

Также отмечено, что ВДУ способствовало увеличению отношения допустимого числа циклов нагружения к числу циклов, при которых появилась первая трещина – t . Так, для сварных швов после ВДУ, у образцов из сталей 10ХСНД; 09Г2С; 30ХГСА значение t составило, соответственно, 5; 4,5; 3,2. Тогда как у образцов со сварными швами без ВДУ – t составило, соответственно, 2,9; 1,6; 2,7. У материалов без сварки и упрочнения, значение t , составило, соответственно, 2,3; 1,8; 2,4. Таким образом, наличие обработки ВДУ способствует повышению в

несколько раз числа циклов до разрушения упрочненных сварных швов, после появления первых трещин [59].

Повышение прочности неупрочненных сварных швов по сравнению материалом без сварного шва можно объяснить использованием электродов (проволоки) с более высокими прочностными свойствами, чем свариваемые пластины. Сравнительные характеристики прочностных свойств и химического состава электродов (проволоки) и свариваемого материала представлены в таблицах 6.2-6.4.

Таблица 6.2

Марка материала	Предел прочности, МПа	Содержание, %					
		углерода	марганца	хрома	никель	молибден	сера
Сталь 09Г2С	490	<0,12	1,3-1,7	<0,3	<0,3	-	<0,04
Сварочная проволока SG2	882-1323	0,06-0,15	1,4-1,85	<0,15	<0,15	<0,15	<0,025

Таблица 6.3

Марка материала	Предел прочности, МПа	Содержание, %					
		углерода	марганца	кремний	хрома	никель	медь
Сталь 10ХСНД	530	<0,12	0,5-0,8	0,8-1,1	0,6-0,9	0,5-0,8	0,4-0,6
Сварочная проволока SG3	570	0,08	1,7	1	-	-	-

Таблица 6.4

Марка материала	Предел прочности, МПа	Содержание, %					
		углерода	марганца	кремний	хрома	никель	сера
Сталь 30ХГСА	620	0,28-0,3	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	<0,3	<0,025
Электрод УОНИ-13/65	630	0,1-0,15	1,1-1,4	0,3-0,6	-	-	0,06

На основании анализа данных таблиц 6.2-6.4 можно заключить, что незначительное повышение перечисленных свойств сварного шва и околошовной зоны можно получить за счет подбора марок электродов (проволоки) для сварки.

Однако применение дополнительной, упрочняющей обработки ВДУ, со всеми присущими ей возможностями повышения качества сварного шва обеспечило кратное повышение его прочности в условиях знакопеременных нагрузок. Наблюдаемый эффект повышения прочности сварных швов после ВДУ объясняется преобразованием растягивающих напряжений в сжимающие, повышением прочности и твердости сварного шва и околошовной зоны.

Для повышения прочности сварных швов изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и изготовленных из сталей 10ХСНД; 09Г2С; 30ХГСА рекомендуется применять ВДУ со следующими режимами: энергия ударов $A=150$ Дж, частота ударов $f=10$ Гц, коэффициент перекрытия отпечатков ударов инструмента $K=0,3$, инструмент: стержневой ролик диаметром 10 мм и шириной 40 мм [2, 59, 85, 106, 151].

6.4 Исследование влияния ВДУ на коррозионную стойкость

Согласно оценке экспертов, ежегодные потери от коррозии составляют около 2 – 4% валового национального продукта мировых экономик. Как правило, основной ущерб заключается не в потере металла из-за коррозии, а связан большей частью он с последствиями разрушения изделий и их сварных частей в результате действия коррозии [169].

В соответствии с ГОСТ 9.106–2021 (ГОСТ 5272–68) «Коррозия металлов. Термины» коррозия металлов – разрушение их вследствие химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой [200]. По механизму взаимодействия металла с коррозионной средой различают химическую, электрохимическую, биологическую и радиационную коррозию. При воздействии коррозионной среды на различные металлы последние подвергаются коррозионному разрушению с различной интенсивностью. Такая способность

металлов противостоять коррозионному воздействию среды называется коррозионной стойкостью [200].

Для изделий общего машиностроения наиболее характерной является общая электрохимическая коррозия, поэтому далее именно этот вид коррозии и будет рассмотрен [80, 200]. К электрохимической коррозии относятся процессы взаимодействия металлов со средами, являющимися электролитами (водные растворы солей, кислот, щелочи, воздушная атмосфера и т.п.) [200]. Причина электрохимической коррозии – термодинамическая неустойчивость сплавов в природных и технологических средах, при этом сварные соединения характеризуются повышенной макро- и микронеоднородностью по сравнению с основным металлом.

Возникновение коррозии того или иного вида, сопровождающееся одним или несколькими видами коррозионных разрушений, обусловлено внешними и внутренними факторами коррозии. Процесс электрохимической коррозии металлов определяется многими факторами, которые в соответствии с ГОСТ 9.106-2021 (ГОСТ 5272–68) можно разделить на внутренние и внешние. К внутренним факторам коррозии относятся: химический состав, структура металла и состояние его поверхностного слоя, обусловленное физико-механическими, физико-химическими и геометрическими характеристиками качества поверхностного слоя [77, 127]. К внешним факторам коррозии относятся вид и химический состав коррозионной среды, её температура, давление, скорость движения среды, внешняя поляризация и т.д. [72, 200].

Для увеличения эксплуатационных характеристик изделий и конструкций внедряют передовые технологии сварки, применяют новейшие покрытия и т.д. С одной стороны, эффективность использования ингибиторов коррозии, покрытий для повышения коррозионной стойкости определяется как свойствами защитных покрытий, так и адгезией их к подложке, которые, в свою очередь, зависят от качества поверхностного слоя [200]. С другой стороны, для обеспечения параметров качества поверхностного слоя, которые способствуют повышению сопротивления усталости материала и его сварных частей при воздействии

коррозии, применяют разнообразные методы упрочнения, часто – поверхностное пластическое деформирование (ППД).

Влияния пластической деформации материала на его коррозионную стойкость отражены в работах отечественных и зарубежных ученых, например: Darmiani, E., Danaee, I., Golozar, M.A., Toroghinejad, M.R., Nie, M., Wang, C., Qu, M., Gao, N., Wharton, J., Langdon, T., Zheng, Z.J., Gao, Y., Gui, Y., Zhu, M., Tongxiang Liang, Chen Wang, Caroline Richard, Sabine Bodner, Абхаировой С.В., Дорофеевой Т.И., Губайдулиной Т.А., Зрунек М., Федонина О. Н., Прокофьева А.А., Погореловой И.Г., Малахова А.И., Тютиной К.М., Дятловой В.Н., Вырыпаева В.Н., Косачева А.В., Герасимова В.В., Страффорд С.Н., Сулима А.М., Рузанкиной Ю.С., Похмурского В.И., Хейфец Р.Г., Соловей С. А., Ревенко В.Г., Шнейдера Ю.Г., Коломийцева Е. В., Кныш В.В., Шляковой Е.В. и др.

Несмотря на большое число экспериментальных и теоретических исследований в области коррозии металлов, мнения о влиянии деформационного воздействия на коррозионную стойкость стальных изделий и сварных швов противоречивы.

Работы, в которых отмечено негативное влияние пластической деформации на коррозионную стойкость сталей

В работе [157] проводились исследования влияния различных способов механической обработки (точение, шлифование, полирование бязевыми кругами с пастой ГОИ, обкатка роликами, обдувка дробью, обдувка песком, электролитическое полирование, магнитно-абразивная обработка) на коррозионную стойкость образцов из сталей 45 и 50. Авторы пришли к выводу, что механическая обработка, вызывающая наклеп поверхностного слоя и изменение шероховатости поверхности, значительно снижает коррозионную стойкость металла. Кроме этого, наклеп и остаточные напряжения поверхностного слоя могут стать одной из причин коррозионного растрескивания стали при ее длительном статическом нагружении в коррозионных средах. Влияние наклепа на скорость коррозии оказалось более значительным, чем влияние микрогеометрии поверхности. Отмечено, что применение ППД для обработки поверхностей деталей

машин, работающих в условиях коррозионного воздействия, нецелесообразно, так как приводит к снижению коррозионной стойкости [200].

Исследованиями [188] установлено, что остаточные напряжения ускоряют процессы коррозии независимо от причины их возникновения. Считается, что сжимающие остаточные напряжения снижают интенсивность процесса коррозии, но шероховатость поверхности и деформационное упрочнение металла поверхностного слоя являются более существенными факторами ее ускорения [160]. Авторы работы [160] пришли к выводу, что остаточные напряжения сжатия увеличивают коррозионно-усталостную прочность, а растягивающие, наоборот, приводят к ее снижению в несколько раз [200].

В статье [204] отмечается, что причиной локального зарождения питтинга могут быть структурное несоответствие и остаточные напряжения в приграничных областях между фазами, а также дислокация несоответствия на границах неметаллических включений твердого раствора.

В работе [35] исследовалось влияние размера зерна на коррозионную стойкость. Установлено, что измельчение зерна до наноразмерного уровня у технически чистого титана достигалось обработкой кручением под высоким давлением (6,0 ГПа). Полученные образцы погружались в 3,5 % – ный раствор NaCl. Электрохимические результаты демонстрировали сложную взаимосвязь между коррозионной стойкостью и измельчением зерна. Отмечено, что измельчение зерна привело к росту микротвердости, но при этом коррозионная стойкость образцов в растворе NaCl стала ниже, чем у отожженного крупнозернистого титана.

В работах [8, 179] приведены результаты исследования влияния дробеструйной обработки поверхности образцов основного металла из коррозионно-стойких сталей на коррозионную стойкость. Приведены результаты изменения коррозионной стойкости упрочненных образцов в зависимости от технологических параметров обработки: типа дробы (стальная, керамическая) и размера дробы (от 125 мкм до 850 мкм), рабочего давления воздуха, времени обработки, числа обработок поверхности (одна или две) и интенсивности

обработки. Установлено, что дробеструйная обработка способствует повышению твердости и износостойкости поверхности образцов, но, как правило, приводит к снижению коррозионной стойкости коррозионностойких сталей.

Противоположного мнения придерживается автор работы [208], где отмечено, что на сопротивление коррозии поверхностей, обработанных давлением, воздействуют два конкурирующих фактора. С одной стороны, происходят сглаживание неровностей исходной поверхности, и уменьшение фактической площади поверхности, которая взаимодействует с агрессивной средой, из-за чего коррозионная стойкость повышается. С другой стороны, неоднородный характер пластической деформации приводит к возникновению разности потенциалов между неодинаково деформированными кристаллами, т.е. к образованию множества гальванических пар, являющихся причиной коррозии, из-за чего коррозионная стойкость снижается [200].

Работы, в которых отмечено повышение коррозионной стойкости металлов и сварных швов из-за пластической деформации

В работе [200] отмечено, что при накатывании роликом или обдувке дробью возможно завальцовывание путей проникновения коррозионных сред внутрь металла через дефекты поверхности пластически деформируемым ферритом, что может частично нейтрализовать развитие коррозионных процессов, обусловленных повышенной степенью наклепа, и снизить коррозионно-усталостную прочность деталей машин [200].

В исследовании [208] отмечено, что при обработке поверхности детали холодным пластическим деформированием можно не только избежать снижения коррозионной стойкости ее поверхности, но даже заметно ее повысить. Это объясняется тем, что положительное влияние сглаживания и образования микрорельефа поверхности с пологими, большого радиуса впадинами сильнее, чем отрицательное влияние наклепа.

В работе ученых Zheng Z.J., Gao Y. и др. из Цзянсиского университета науки и технологий (Китай) подтверждена эффективность применения поверхностной нанокристаллизации нержавеющей стали 304 для повышения её коррозионной

стойкости. Измельчение зерна нержавеющей стали 304 до наноразмерного уровня достигалось с помощью обработки поверхности ультразвуковой прокаткой (ultrasonic surface rolling treatment (USRT)). Обработка привела к трехкратному росту микротвердости и заметному повышению коррозионной стойкости, по сравнению с необработанными образцами [43].

Авторы статьи [38] пришли к выводу, что сопротивление коррозионному растрескиванию значительно снижается при низких степенях деформации, тогда как более высокие степени деформации (выше 30 %) обычно приводят к повышению коррозионной стойкости. Минимальная коррозионная стойкость соответствует диапазону 5 – 30 % холодной деформации, но ее можно повысить, если применить достаточно высокие степени деформации [32]. Как было показано в работе [5], необходимо различать зарождение трещины и рост трещины. Устойчивость к точечной (питтинговой) коррозии тесно связана с устойчивостью к коррозионному растрескиванию, поскольку питтинги могут выступать в качестве инициаторов трещин [40]. При малых деформациях зарождение трещин ускоряется из-за появления дефектов, которые могут выступать инициаторами трещин, а в областях малых холодных деформаций преобладает ускоренное зарождение трещин [5]. Образование дислокационных структур, субзерен или трансформационное двойникование происходят в большей степени при более высоких степенях деформации [1]. Увеличение плотности дефектов в этом диапазоне мало влияет на зарождение трещины, но гораздо больше влияет на рост трещины. В частности, особые границы зерен, такие как двойники или другие границы решетчатых участков, обладают повышенной коррозионной стойкостью и, следовательно, могут улучшить стойкость к коррозионному растрескиванию [15]. Однако при чрезвычайно высоких степенях деформации этот эффект часто имеет предел, так как на первый план тогда выходят другие негативные эффекты, такие как повышенные остаточные напряжения или перенаклеп, способствующие росту трещины [38].

В работе [15] исследовалось влияние микродробеструйной обработки на коррозионное растрескивание сварных швов в солевом тумане из аустенитной

нержавеющей стали, созданных лазерной сваркой. Полученная в результате деформации мелкозернистая структура и остаточные сжимающие напряжения препятствовали зарождению микротрещин в сварных швах.

В исследовании [31] сообщается, что коррозионная стойкость обработанной дробеструйной обработкой нержавеющей стали 304 улучшается с уменьшением шероховатости поверхности, поскольку практическая площадь коррозии на единицу площади увеличивается с увеличением шероховатости поверхности.

В работах [14, 179] исследована эффективность применения поверхностной механической притирки (ПмП) для повышения коррозионной стойкости образцов нержавеющей стали AISI304 в зависимости от таких технологических параметров обработки, как диаметр шариков (2, 5 и 8 мм) и время обработки (15, 30 и 45 мин). Технология ПмП представляет собой механическую обработку поверхности стальными шариками на протяжении заданного времени в специальной вакуумной камере, установленной на вибрирующем столе. Показано, что шероховатость поверхности образцов после ПмП возрастает с увеличением диаметра применяемых шариков и практически не зависит от времени обработки. Установлено, что только при обработке шариками диаметром 2 мм коррозионная стойкость упрочненных ПмП в растворе NaCl образцов незначительно превышает стойкость неупрочненных образцов.

В работах [9, 179] исследовано влияние пластического деформирования (обработка давлением) на коррозионную стойкость нержавеющих сталей. Установлено, что с увеличением степени деформирования (уменьшение толщины) проката от 17 до 47 % увеличивается твердость, повышаются предел текучести и коррозионная стойкость.

Анализ литературных источников показал, что нет однозначного мнения о влиянии пластической деформации на коррозионную стойкость материалов и их сварных швов. На основании анализа указанных работ можно заключить, что формирующиеся в результате пластического деформирования в обрабатываемом материале (шероховатость, размер зерна, увеличение твердости (деформации), создание остаточных напряжений сжатия) оказывают определяющее влияние на

коррозионную стойкость материала. Несмотря на то, что в настоящее время технология ВДУ находит все более широкие области применения, ее возможности изучены недостаточно, в частности, исследование влияния волны деформации на коррозионную стойкость обрабатываемых материалов не проводились. Целью исследований является установление характера влияния волнового деформационного упрочнения на коррозионную стойкость [107].

Условия эксперимента

Исследование влияния упрочнения волной деформации на коррозионную стойкость проводилось на следующих материалах: сталь 10ХСНД, сталь 09Г2С, сталь 30ХГСА, сталь 40Х, сталь 45. Выбор материалов объясняется широтой их применения в разных отраслях промышленности для изготовления ответственных изделий и сварных конструкций. Сталь 45 является эталонной в машиностроении. Несмотря на широкое применение сталей данных марок, в литературе практически не встречается информация о влиянии наличия пластической деформации в этих материалах на их коррозионную стойкость [107].

В эксперименте ВДУ с разным коэффициентом перекрытия отпечатков ($K=0,3$ и $K=0,6$) обрабатывались образцы из сталей выбранных марок. В качестве инструмента для ВДУ использовался стержневой ролик диаметром 10 мм и длиной 30,...,60 мм. Обработка с отличающимися коэффициентами перекрытия пластических отпечатков, частотой ударов 9,...,14 Гц, и удельной энергией удара, варьируемой в диапазоне от 4 до 8 Дж/мм обеспечивает разную величину деформации обработанного материала. Обработке подвергались призматические образцы с прямоугольным профилем.

Исследование коррозионной стойкости выполнялось на установке для проведения коррозионных испытаний в соляном тумане S1000. Испытания на коррозионную стойкость проводились согласно ГОСТ 28207–89, ГОСТ 9.908–85. Потеря массы образцов после испытаний на коррозионную стойкость оценивалась на весах CE224–С.

Для металлографических исследований были подготовлены микрошлифы. В упрочненных волной деформации образцах исследовались тип микроструктуры,

размеры деформированных зерен, толщина слоя с измельченным зерном, угол поворота зерен. Так как при деформационном упрочнении искажается форма зерна, оценивалась не только его длина, но и ширина. Измерение микротвердости по сечению упрочненного образца выполнялось на автоматическом твердомере KB30S. Упрочненным считался материал, твердость которого была не менее, чем на 10 % выше начальной. Максимально достижимая твердость ($HV_{\max}$) фиксировалась как на упрочняемой поверхности, так и в подповерхностном слое на глубине до $0,2\div 0,3$ мм [107].

Результаты исследований

Неупрочненные образцы из стали 45 имели начальную твердость $HV \times 1980$ МПа, средний размер зерен составил (длина $\times$ ширина) $6,4 \times 6,6$ мкм, потери в результате исследований коррозионной стойкости составили $2,7$ г/мм³ (рисунок 6.20). При упрочнении с $K=0,3$ в поверхностном слое наблюдались: поворот зерен на 37° , средние их размеры $6,1 \times 6,4$ мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями 180 мкм. Сформированные степень и глубина упрочнения составили соответственно 7 % и 0,4 мм. Величина потерь было равна $4,2$ г/мм³. При упрочнении с $K=0,6$ в поверхностном слое был установлен угол поворота зерен равный 40° , средние их размеры $6,6 \times 5,5$ мкм; толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями составила 340 мкм. Степень упрочнения была равна 9,5 %, а глубина упрочнения 0,6 мм. Потери в результате исследований коррозионной стойкости составили $3,4$ г/мм³. У всех рассматриваемых образцов из стали 45 наблюдалась феррито-перлитная ($40\div 60$ %) структура с полосчатостью в 1 балл в основном металле.

Неупрочненные образцы из стали 30ХГСА имели твердость HV равную 1540 МПа, средние размеры зерен (длина $\times$ ширина) составили $8,9 \times 9,3$ мкм, потери в результате исследований коррозионной стойкости – $6,7$ г/мм³ (рисунок 6.20). После упрочнения с $K=0,3$ в поверхностном слое наблюдались: поворот зерен на 43° , средние их размеры $7,8 \times 8,2$ мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями составила 200 мкм, а степень и глубина упрочнения – соответственно 38 % и 7 мм. Потери равнялись $4,7$ г/мм³ [107].

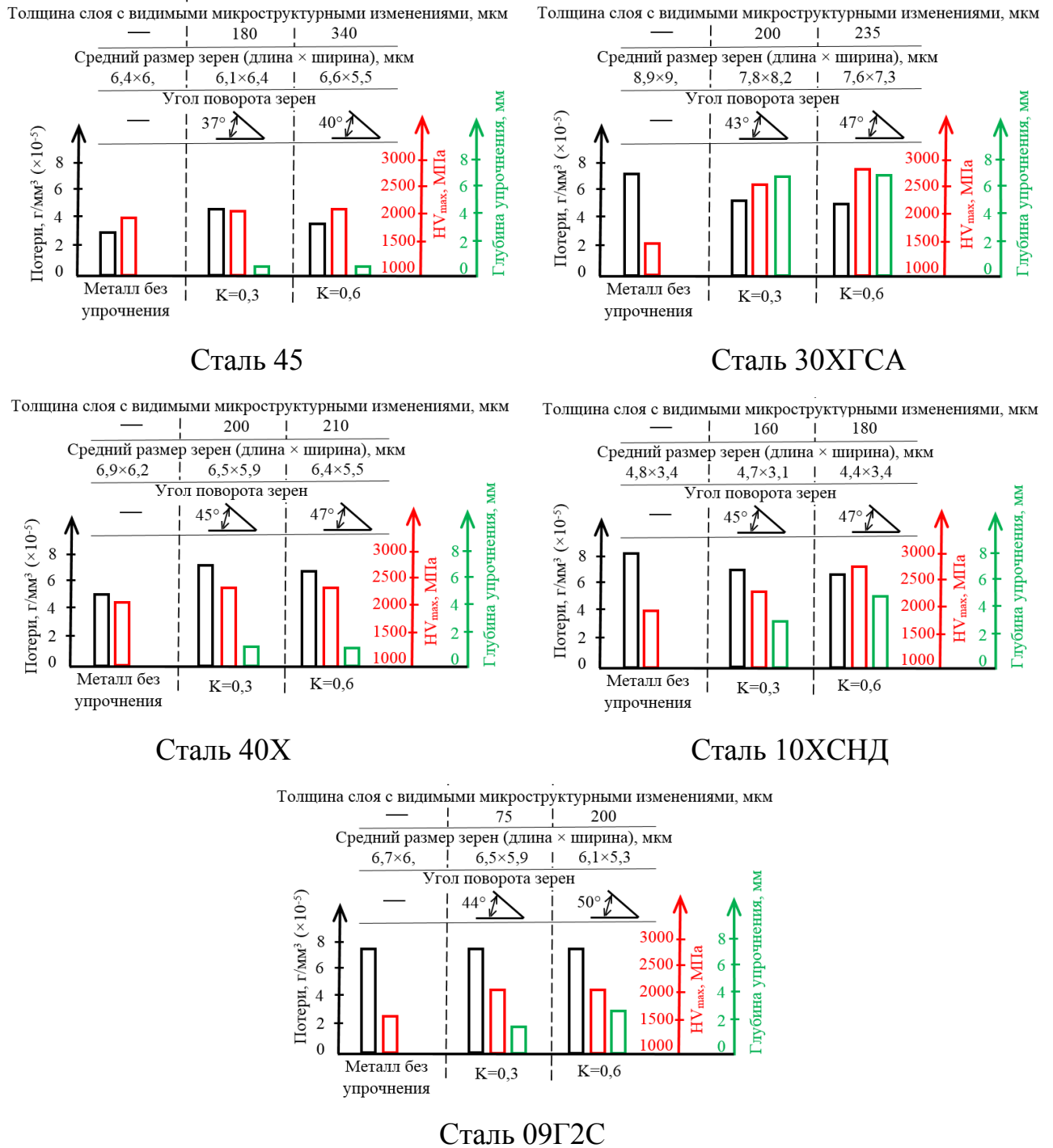


Рисунок 6.20 - Результаты исследований коррозионной стойкости образцов после их упрочнения ВДУ

При упрочнении с $K=0,6$ в поверхностном слое были установлены угол поворота зерен 47° , средние их размеры $7,6 \times 7,3$ мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями 235 мкм. Степень упрочнения составила 43 %, а глубина упрочнения 7 мм. Потери в результате исследований коррозионной стойкости равнялись $4,5$ г/мм³. У всех рассматриваемых образцов из стали 30ХГСА

наблюдалось формирование равномерной структуры, состоящей из феррита и пластинчатого перлита с полосчатостью в 1 балл в основном металле.

Неупрочненные образцы из стали 40Х имели твердость HV равную 2090 МПа, средние размеры зерен составили (длина×ширина) 6,9×6,2 мкм, потери в результате исследований коррозионной стойкости составили 4,8 г/мм³. После упрочнения с K=0,3 в поверхностном слое наблюдался поворот зерен на 45° средние их размеры составили 6,5×5,9 мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями – 200 мкм, а степень и глубина упрочнения – соответственно 13 % и 1,5 мм. Потери были равны 7 г/мм³. При упрочнении с K=0,6 в поверхностном слое был установлен угол поворота зерен 47°, средние их размеры 6,4×5,5 мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями 210 мкм. Степень упрочнения составила 13 %, а глубина упрочнения 1,6 мм. Потери в результате исследований коррозионной стойкости были равны 6,5 г/мм³. У всех рассматриваемых образцов из стали 40Х наблюдалась феррито-перлитная структура.

Неупрочненные образцы из стали 10ХСНД имели твердость HV равную 1760 МПа, средний размер зерен составил (длина×ширина) 4,8×3,4 мкм, потери в результате исследований коррозионной стойкости составили 8,1 г/мм³ (рисунок 6.20). После упрочнения с K=0,3 в поверхностном слое наблюдались: поворот зерен на 45°, средние их размеры 4,7×3,1 мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями – 160 мкм, а степень и глубина упрочнения, соответственно 27 % и 3,3 мм. Потери составили 7,1 г/мм³. При упрочнении с K=0,6 в поверхностном слое были установлены: угол поворота зерен 47°, средние их размеры 4,4×3,4 мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями 180 мкм. Степень упрочнения составила 35 %, а глубина упрочнения 4,8 мм. Потери в результате исследований коррозионной стойкости составили 6,3 г/мм³. У всех рассматриваемых образцов из стали 10ХСНД наблюдается феррито-перлитная (90/10 %) структура с полосчатостью в 1 балл в основном металле [107].

Неупрочненные образцы из стали 09Г2С имели твердость HV равную 1600 МПа, средние размеры зерен составили (длина×ширина) 6,9×6,9 мкм, потери в результате исследований коррозионной стойкости составили 7,5 г/мм³. После

упрочнения с $K=0,3$ в поверхностном слое наблюдались: поворот зерен на 44° , средние их размеры $6,5 \times 5,9$ мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями – 75 мкм, а степень и глубина упрочнения, соответственно 21 % и 1,8 мм. Потери составили $7,4$ г/мм³. При упрочнении с $K=0,6$ в поверхностном слое установлен угол поворота зерен 50° , средние размеры зёрен $6,1 \times 5,3$ мкм, толщина слоя с видимыми микроструктурными изменениями было 200 мкм. Степень упрочнения составила 21 %, а глубина упрочнения – 2,4 мм. Потери в результате исследований коррозионной стойкости составили $7,3$ г/мм³. У всех рассматриваемых образцов из стали 09Г2С наблюдалась феррито-перлитная (70/30 %) структура с полосчатостью в 1 балл в основном металле.

В результате исследований установлено, что:

- характерный размер зерна и угол его поворота в поверхностном слое не оказывает значимого влияния на коррозионную стойкость упрочненного ВДУ материала.

- обработка ВДУ с коэффициентом перекрытия отпечатков $K=0,6$ по сравнению с $K=0,3$ обеспечивает большую степень и глубину упрочнения до 12% и повышение коррозионной стойкости до 11,3 %.

- при обработке ВДУ значимое влияние на коррозионную стойкость оказывает степень упрочнения материала. Так, небольшое упрочнение материала только на 9,5% привело к увеличению потерь материала на 35% вследствие коррозии и снижению коррозионной стойкости упрочненного материала относительно неупрочненного. ВДУ материала на 21% не повлияло на коррозионную стойкость. Дальнейшее повышение степени упрочнения исследуемых сталей с 27 до 43% привело к уменьшению с $7,1$ до $4,5(\times 10^{-5})$ г/мм³ потерь материала вследствие коррозии, способствовало повышению коррозионной стойкости в 1,6 раза [107, 108].

6.5. 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

$d_1=d_2$	L_1/d_1	L_1/L_2
30-48	10	1-5
48-90	5-10	1-10

1.2. с ограничением: суммарной длины <1000мм; массы <15кг; диаметра бойка и волновода до 60 мм

$d_1=d_2$	L_1/d_1	L_1/L_2
св. 30	10	1-3
св. 48	5-10	1-3
до 60	5	1-3

1.3. в зависимости от марки обрабатываемого материала

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:

Твердость, НВ	Схема ВДУ	Тип инструмента	Число инструментов, шт
>230	одноконтактная	стержневой ролик $\varnothing 10$ мм	1
<230	многоконтактная	инденторы с торцом $\varnothing 6$ мм	3 – 5

3. Рекомендации по выбору температуры образцов перед ВДУ

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
10XCHД	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 +20C)

Марка стали	Температура образцов перед ВДУ*, С	σТ/σТ0			σВ/σВ0			δ/δ0			KCU/ KCU 0		
		Температура эксплуатации, °С											
		-60	+20	+300	-60	+20	+300	-60	+20	+300	-60	+20	+300
12Х18Н10Т	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
	500	1,34	1,32	1,37	0,98	1,10	1,05	1,01	0,44	0,37	0,64	0,54	0,70
30ХГСА	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
	500	1,27	1,27	1,25	1,09	1,02	0,97	0,32	0,44	0,58	0,08	0,53	0,86
10ХСНД	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
	500	1,21	1,31	1,03	1,05	1,07	1,04	0,56	0,44	0,59	0,72	0,67	0,86
40Х	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 $\varnothing 10$ мм.

4. Рекомендации по ВДУ* сварных швов:

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 18 мм		многоконтактная
до 10 мм	Повышение прочности сварного шва	стержневой ролик 10 мм	...0,6	одноконтактная
до 10 мм	Максимальные остаточные напряжения сжатия	стержневой ролик 18-27 мм		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:

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 $K=0,3-0,4$.

6.6 Производственная апробация

Акты о реализации диссертационной работы в промышленности представлены в приложении А, а их краткий обзор приведен в таблице 6.5.

Таблица 6.5

Обзор актов реализации диссертационной работы в промышленности.

Представитель отрасли	Содержание акта	Достигнутый эффект
1) НПО «Техномаш им. С.А. Афанасьева».	Работа принята к внедрению в рамках предусмотренных работ по созданию перспективных изделий ракетно-космической техники, в частности перспективной ОКР «Прогресс-2025», включенной в Федеральную космическую программу России, ожидаемый годовой экономическим эффектом более 1 млн.руб.	Достигнуто повышение механических свойств материала, параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств ответственных изделий ракетно-космической техники, изготавливаемых из сталей и сплавов хромо-никель-молибденовой группы, изготовленных и упрочненных по предлагаемой аддитивно упрочняющей (ВТДУ) технологии в 1,5...2,5 раза по сравнению с базовой технологией изготовления деталей из проката.
2) ПАО «Новолипецкий	рекомендации диссертационного	Разработанные технологии и предложенные

металлургический комбинат»	исследования приняты к внедрению. Настоящим актом подтверждаем заинтересованность в практическом использовании результатов диссертационной работы Барина С.В. на НЛМК, ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения которых составляет более 4 млн. руб.	технологические рекомендации, обеспечивающие кратное повышение контактной выносливости волновым деформационным упрочнением, имеют большие перспективы применения с целью как работоспособности и долговечности ответственных деталей, прокатных станов в т. ч. (рабочих) валков, (рольгангов, летучих ножниц, м/к клетей, моталок), так и выпускаемых единиц продукции НЛМК (плоского проката и электротехнических сталей). Технологические рекомендации по упрочнению сварных швов и околошовных зон, повышению прочности и выносливости волновым деформационным упрочнением, целесообразно использовать

		применительно в технологии производства и электротехнической стали (трансформаторного и динамного проката), для восстановления физических и прочностных характеристик после соединения рулонов стыкосварочной машиной.
3) Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г.Волгодонск.	Результаты диссертационного исследования Баринова С.В. нашли применение в основном производстве Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г.Волгодонск.	Результаты исследований нашли применение в основном производстве Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск для повышения качества сварных соединений атомного реактора. Годовой экономический эффект от применения результатов исследований составит 1,9 млн. рублей.
4) АО «МЗ РИП», концерн Алмаз-Антей	Разработанная технология предназначена для повышения долговечности как деталей оборудования, так и сложного	Установлена целесообразность использования в производственных условиях разработанной технологии создания гетерогенной структуры статико-

	инструмента и принята к внедрению в условиях ОАО «РИП».	импульсной обработкой поверхностным пластическим деформированием. Полученная гетерогенная структура, представляет собой чередующиеся вдоль поверхности твердые и мягкие участки на глубине до 5 мм и более. Это снижает вероятность возникновения микротрещин в поверхностном слое и его разрушение, и позволяет достигнуть увеличения сопротивления контактному выкрашиванию обработанных поверхностей деталей машин до 6 раз.
5) АО «ПО Муромский машиностроительный завод»	Работа внедрена в производство специального изделия «Лодыга» с экономическим эффектом до 120 тыс.руб/ед.	Повышение параметров качества поверхностного слоя и сопротивления усталости ответственных изделий изготавливаемых из алюминиево-магниевых сплавов (АМг), упрочненных по предлагаемой многоконтактной

		технологии в 1,5...3 раза по сравнению с базовой технологией изготовления.
6) НПП «Гидротехника»	Работа внедрена в производство насосов циркуляционных НЦ50, НЦ25 с экономическим эффектом 452000 руб./год.	Достигнуто повышение контактной выносливости гетерогенно упрочненных поверхностей ответственных изделий в 2-7 раз, по сравнению с равномерным упрочнением.
7) ОАО «Кулебакский завод металлоконструкций»	Принято решение, рекомендовать технологию упрочнения статико-импульсной обработкой для повышения долговечности и несущей способности деталей оборудования ОАО «КЗМК»	Установлена возможность получения упрочненного поверхностного слоя с различной равномерностью упрочнения глубиной до 5...6 мм и более и твердостью, достигающей 6500 МПа.
8) АО «Муромский ремонтно - механический завод»	Принято решение, рекомендовать технологию многоконтактного волнового деформационного упрочнения для повышения эксплуатационных характеристик деталей и изделий из сплавов группы АМг.	

Пример производственного применения технологии ВДУ представлен для изделия «Нож», являющийся рабочим элементом маятниковых ножниц металлопрокатной промышленности (рисунок 6.21, 6.22). Габаритные размеры ножа (д×в×ш) 2×0,285×0,13 м, вес 532 кг.

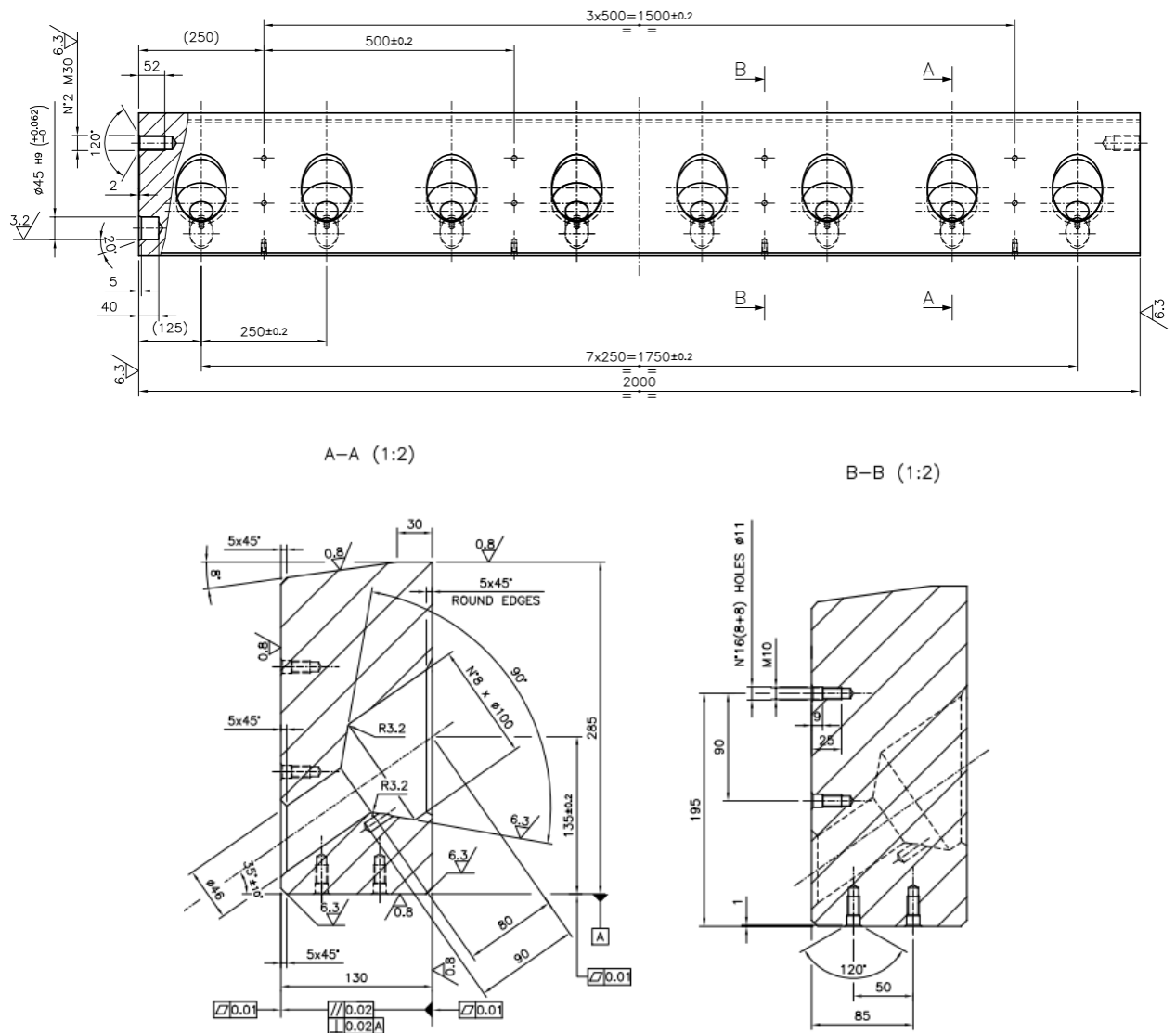
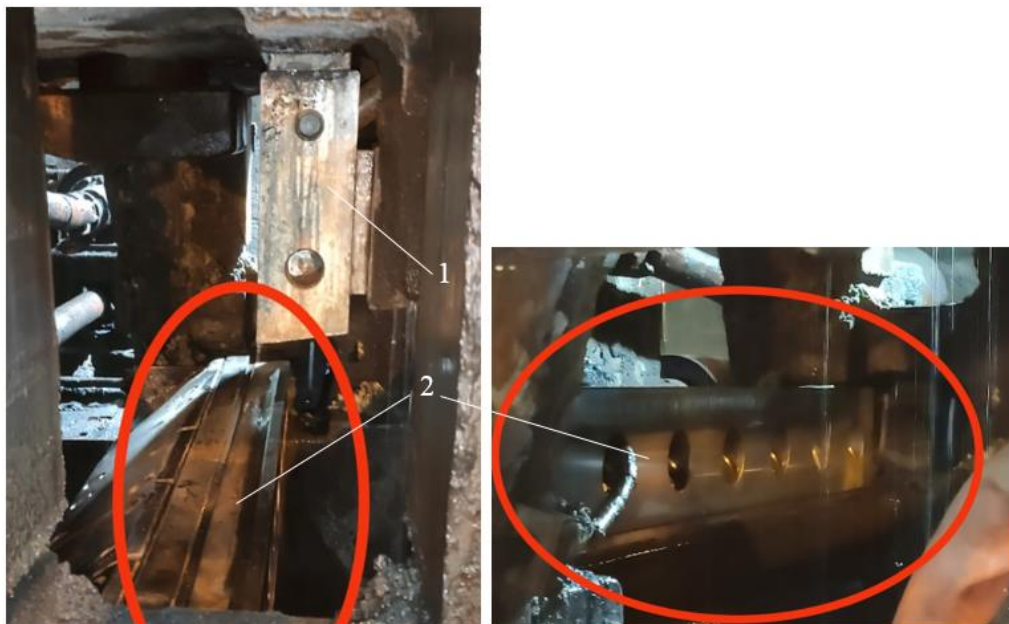


Рисунок 6.21 - Фрагменты рабочего чертежа изделия «Нож»



1 - верхний, 2 - нижний

Рисунок 6.22 - Установленные ножи в оборудовании

Производителем изделия «Нож» являлась итальянская компания Andrits Asco. Стоимость одного изделия с учетом транспортировки составляет 61500 евро. До 2022 года закупка ножей выполнялась в Италии, сейчас их покупают в Польше, что на 15% увеличило их стоимость. Ресурс работающих в паре ножей составляет 48000 резов, что при условии 12 часовой смены соответствует 8 месяцам работы. Поэтому повышение срока службы ножей и возможность их производства отечественной промышленностью значительно бы снизила его себестоимость.

Характер работы ножа обусловлен износом его рабочей части вследствие воздействия на неё контактно усталостных нагрузок, что предполагает использование упрочнения для повышения твердости режущей части и обеспечения в них глубины упрочнения более 8-10 мм.

В базовой технологии нож подвергается объемной закалке токами высокой частоты и обеспечения меньшей твердости в середине ножа для демпфирования ударных нагрузок. Твердость поверхностного слоя составляет 37...42 HRC. ВДУ позволяет получить твердость не менее 40 HRC на рабочих гранях. Также после ВДУ предполагается дополнительная шлифовальная операция для устранения следов ударов инструмента высотой 0,1-0,15 мм.

Упрочнение проводилось за один проход стержневым роликом Ø10 мм и длиной 40 мм, при частоте ударов 10 Гц, с коэффициентом перекрытия $K=0,4$ и энергией удара 120 Дж. После обработки глубина упрочнения составила 10 мм (рисунок 6.23, 6.24).

Таким образом, если сравнивать результаты долговечности, полученные на аналогичных материалах и условиях работы, то ВДУ обеспечило повышение срока службы до 57600 циклов реза, что на 20% больше, чем у ножей в состоянии поставки. Если рассматривать изготовление ножей в условиях отечественного производства с применением ВДУ себестоимость производства одного ножа снижается практически в 20 раз.



Рисунок 6.23 - Процесс ВДУ рабочей поверхности ножа



1 - изношенный; 2 - упрочненный

Рисунок 6.24 - Ножи в процессе замены

ВЫВОДЫ ПО 6 ГЛАВЕ

1. 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. Предложено оценивать гетерогенность упрочнения посредством параметров относительной опорной твердости $L_{\Delta H}^h$ и относительного количества локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$.

2. Установлена взаимосвязь между сопротивлением контактному выкрашиванию ΔI 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 40X 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.

3. Установлены технологические режимы ВДУ, позволяющие повысить сопротивление контактному выкрашиванию (ΔI) изделий: из стали 45 в 4...6 раз, из стали 40X 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.

4. 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 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.

5. 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%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной научно-квалификационной работе приведены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленных 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 (кем, как, когда, при каких условиях?), 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 наплавляемого 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 ΔI .

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arafin M.A., Szpunar J.A. A new understanding of intergranular stress corrosion cracking resistance of pipeline steel through grain boundary character and crystallographic texture studies // *Corrosion Science*. 2009. Vol. 51. P. 119–128. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.10.006
2. Assessment of the mechanical properties of welded joints after wave strain hardening / A. V. Kirichek, S. V. Barinov, S. A. Silantiev [et al.] (Aborkin A.V., Yashin A.V.) // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : 16, Rostov-on-Don, 11–13 сентября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2021. – P. 012011. – DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012011.
3. Bautz W., Lehr E. Aussprache zu den Vorträgen F. Rötcher, W. Kuntze und E. Lehr // *Bericht über die Tagung des Fachausschusses für Maschinenelemente in Aachen*. 1935–1936. S. 29.
4. Chen J., Schwenk C., Wu C.S. [et al.] Predicting the influence of groove angle on heat transfer and fluid flow for new gas metal arc welding processes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. Vol. 55. № 1–3. P. 102–111.
5. Cigada A., Mazza B., Pedferri P. [et al.] Stress corrosion cracking of cold-worked austenitic stainless steels // *Corrosion Science*. 1982. Vol. 22. P. 559–578. DOI: 10.1016/0010-938X(82)90055-5.
6. 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.] Soloviev D.L., Barinov S.V., Silantiev S.A., Grechukhin A.N., Myo Min Than, Dobromyslov M.B. // *Journal of Nano and Electronic Physics*. – 2015. – Vol. 7. – No 4. – P. 04023. DOI 2077-6772/2015/7(4)04023(4)
7. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 81. P. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.

8. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI316L / Aymen A. Ahmed et al. // Surface & Coating Technology. 2014. Vol. 259. P. 448–455.
9. Effect of cold working and sandblasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI316L stainless steel / Suyitno et al. // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2012. Vol. 19, № 12. P. 1093–1099.
10. Eremjants V.E., Niu V.V. Two-layer plate stress condition under longitudinal impact by tools resting on the plate // Modern Problems of Theory of Machines. 2016. № 4(1). P. 123–127.
11. Eremjants V.E., Niu V.V. About selection of parameters of hydraulic vibro-impact machines for surface cleaning // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2016. Issue 2. P. 20–24.
12. 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.] (Ryzhkova M.N., Konstantinov A.M., Zaitsev A.A.) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2020, MEACS 2020, Novosibirsk, 17 сентября 2020 года. – Novosibirsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012002. – DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012002.
13. Haidar J. The dynamic effects of metal vapour in gas metal arc welding // Journal of Physics D: Applied Physics. 2010. Vol. 43. Iss. 16. P. 165204. DOI: 10.1088/0022-3727/43/16/165204.
14. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI304 stainless steel / T. Balusamy et al. // Corrosion Science. 2013. Vol. 74. P. 332–344.
15. Kang C.-Y., Chen T.-C., Tsay L.-W. Effects of Micro-Shot Peening on the Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel Welds // Metals. 2023. Vol. 13. Iss. 1. P. 69. DOI: 10.3390/met13010069.

16. Khatak H.S., Muraleedharan P., Gnanamoorthy J.B. [et al.] Evaluation of the stress corrosion resistance of cold rolled AISI type 316 stainless steel using constant load and slow strain rate tests // *Journal of Nuclear Materials*. 1989. Vol. 168. P. 157–161. DOI: 10.1016/0022-3115(89)90577-1.
17. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. Structural heredity influence upon principles of strain wave hardening // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Proceedings of the Conference, Tomsk, 27–29 October 2016*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2017. Vol. 177. P. 012144. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012144.
18. Kirichek A., Barinov S., Yashin A. Visualization of the process of processing welds by a deformation wave // *CEUR Workshop Proceedings : Proceedings of the 30th International Conference, Saint Petersburg, 22–25 September 2020*. 2020. Vol. 2744. P. 1–5. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2744/short39.pdf>. DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-39.
19. Kirichek A., Fedonina S., Barinov S. Finite element modeling and visualization of additive ring growing by 3DMP method // *CEUR Workshop Proceedings : Proceedings of the 30th International Conference, Saint Petersburg, 22–25 September 2020*. 2020. Vol. 2744. P. 1–5. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2744/short40.pdf>. DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-40.
20. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. Increasing durability by deformational hardening under the conditions of back-to-back endurance by creating heterogeneous patterns // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Proceedings of the Conference, Tomsk, 1–4 December 2015*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2016. Vol. 124. P. 012158. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012158.
21. 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. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. – 2022. – Vol. 144. – No 3. – P. 034501. – DOI 10.1115/1.4052008.

22. 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.

23. 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 : Сер. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – BRISTOL, ENGLAND: IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 042053. – DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042053.

24. Kirichek A. Image processing in contact endurance research / A. Kirichek, S. Barinov, A. Yashin // CEUR Workshop Proceedings : 31, Nizhny Novgorod, 27–30 сентября 2021 года. – Nizhny Novgorod, 2021. – P. 891-895. doi:ceur-ws.org/vol-3027/paper96.pdf

25. Kirichek A.V., Solovyev D.L., Khandozhko A.V., Fedonina S.O. Problems of Analyzing Microstructure Images in Assessing the Impact of Technological Parameters of Combined Strain Wave Hardening on the Quality of the Surface Layer // CEUR Workshop Proceedings 2485, 265-267 (2019) . <http://ceur-ws.org/Vol-2485/>

26. 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.

27. 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.

28. Kirichek A. Investigation of the influence of the geometrical dimensions of the striker on the efficiency of energy transfer of shock pulses during wave strain hardening / A. Kirichek, S. Barinov, A. Yashin // MATEC Web of Conferences : The conference proceedings (ISPCIME-2019), Kemerovo, 26–29 ноября 2019 года. –

Kemerovo: EDP Sciences, 2019. – (297) P. 05012. – DOI 10.1051/mateconf/201929705012.

29. 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)

30. 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 MSF. – P. 429-434. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.429

31. Lee H.-S., Kim D.-S., Jung J.-S, Pyoun Y.-S., Shin K. Influence of peening on the corrosion properties of AISI 304 stainless steel. Corros. Sci. 2009, 51, 2826–2830.

32. Lozano-Perez S, Yamada T, Terachi T, Schroöder M, English CA, Smith G, Grovenor C., Eyre BL (2009) Multi-scale characterization of stress corrosion cracking of cold-worked stainless steels and the influence of Cr content. Acta Mater 57:5361–5381. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.040>

33. Mailander R., Bawersfeeld W. Einfluss der probengrosse und probenform auf die dref-schwingungsfestigkeit von stahl. technische mitteilungen krupp, H.5, S. 143, 1937.

34. Murphy A B. A self-consistent three-dimensional model of the arc, electrode and weld pool in gasmetal arc welding. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011,44(19):194009.

35. Nie M., Wang C. T., Qu, M. et al. The corrosion behaviour of commercial purity titanium processed by high-pressure torsion. J Mater Sci 49, 2824–2831 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7988-z>

36. Strengthening of surface layer of material by wave deformation multi-contact loading / A. V. Kirichek, S. V. Barinov, A. V. Aborkin [et al.] Yashin A.V., Zaicev A.A // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk, 04–06 декабря 2017 года. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 042011. – DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042011.

37. 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 : Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, Voronezh, 11–13 ноября 2019 года. – Voronezh: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012067. – DOI 10.1088/1742-6596/1479/1/012067
38. Truschner M., Janda A., Bodner S.C. et al. Effect of cold deformation on the stress corrosion cracking resistance of a high-strength stainless steel. J Mater Sci 57, 20447–20461 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07866-6>
39. Wang X, Fan D, et al. Numerical simulation of arc plasma and weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015,85:924-934.ANSYS, Using Additive Print and Additive Science, Release 2019 R1, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 2019.
40. Xia D-H, Deng C-M, Macdonald D, Jamali S, Mills D, Luo J-L, Strebl MG, Amiri M, Jin W, Song S, Hu W (2022) Electrochemical measurements used for assessment of corrosion and protection of metallic materials in the field: a critical review. J Mater Sci Technol 112:151–183. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.004>
41. Xiangman, Zhou & Haiou, Zhang & Wang, Guilan.. Three-Dimensional Numerical Simulation of Arc and Metal Transport for Stacking Deposition in Arc Welding Based Additive Manufacturing. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, 2018, 17, 268-285.
42. XU. G, HU J, TSAI H. L. Modeling Three-Dimensional Plasma Arc in Gas Tungsten Arc Welding. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2012, 134(3):40–80. <https://doi.org/10.1115/1.4006091>
43. Zheng Z. J., Gao Y., Gui Y., Zhu M. Corrosion Behaviour of Nanocrystalline 304 Stainless Steel Prepared by Equal Channel Angular Pressing Corrosion Science 54 2012: P. 60 – 67.
44. Аборкин А.В. Исследование и прогнозирование долговечности деталей машин со сварными соединениями : диссертация ... кандидата технических наук :

05.02.02 / Аборкин Артемий Витальевич; [Место защиты: Владимир. гос. ун-т]. - Владимир, 2010. - 175 с.

45. Абраменко Ю.Е., Албагачиев А.Ю. Ударное упрочнение чугунов. // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1988. – № 4. – С.46-48.

46. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 201 с.

47. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. – М.: Наука, 1985. – 357 с.

48. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э., Мартыненко Л.М. Расчет ударных систем с неторцевым соударением элементов. Фрунзе: Илим, 1979. 109 с.

49. Алимов О.Д., Дворников Л.Т. Бурильные машины. М.: Машиностроение, 1976. 295 с.

50. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э., Невенчаный Ю.В. Расчет динамического внедрения инструмента в обрабатываемую среду. Фрунзе: Илим, 1980. 44 с.

51. Алифанов А.В. Технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения / А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, В. А. Томило. — Минск : Белорусская наука, 2014. — 322 с.

52. Афанасьев Н.Н. Приближенный расчет коэффициента концентрации напряжений, Журнал технической физики, 1936, т. VI, вып.7, стр. 1153-1161

53. Афонин А. В. Концепция применения искусственного интеллекта при изготовлении крупногабаритных деталей ракетных двигателей по технологии прямого лазерного выращивания / А. В. Афонин // Информационно-технологический вестник. – 2024. – № 3(41). – С. 111-119.

54. Афонин А.Н. Повышение эффективности накатывания резьб : диссертация ... доктора технических наук : 05.02.07 / Афонин Андрей Николаевич; [Место защиты: Орлов. гос. техн. ун-т]. - Орел, 2010. - 408 с.

55. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1974. 136 с.

56. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин., Машиностроение, 1968. 196 с.

57. 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. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21960738>

58. Баринов С.В. Исследование возможностей повышения комплекса эксплуатационных свойств волновым деформационным упрочнением // Научные технологии в машиностроении. 2024. №11. С.32-40 DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-32-40>

59. 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

60. 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. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21960738>

61. Баринов С.В. Масштабный эффект волнового деформационного упрочнения // Транспортное машиностроение. 2024. №. 9. С. 21-26. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-9-21-26>

62. Баринов С.В. Повышение сопротивления контактному выкрашиванию гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08, 05.03.01 / Баринов Сергей Владимирович; [Место защиты: Орлов. гос. техн. ун-т]. - Орел, 2009. - 166 с.

63. Баринов С.В. Масштабный эффект волнового деформационного упрочнения / С. В. Баринов // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 9(33). – С. 21-26. – DOI 10.30987/2782-5957-2024-9-21-26

64. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием : диссертация ... доктора технических наук : 05.02.08. - Москва, 2002. - 595 с.

65. Боровской А.С. Разработка комплексной технологии термической обработки сварных соединений крупногабаритных изделий из хромомолибденованадиевой стали : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.01 / Боровской Александр Сергеевич; [Место защиты: С.-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого]. - Санкт-Петербург, 2018. - 179 с.
66. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. М.: Машиностроение, 1975. 160 с.
67. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. М.: Машиностроение, 1975. 160 с.
68. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
69. Влияние обрабатываемой среды на эффективность передачи энергии ударного импульса при волновом деформационном упрочнении / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин [и др.] Константинов А.М., Зайцев А.А. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 11(84). – С. 13-18. – DOI 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.
70. Влияние материала и размеров изделия на параметры упрочнения волной деформации / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин [и др.] Никитина Л.Г., Константинов А.М. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 2(99). – С. 21-27. – DOI 10.30987/1999-8775-2021-2-21-27
71. Волобуев А.В. Определение рациональной режимной области статико-импульсной обработки посредством моделирования процесса : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.07 / Волобуев Александр Владимирович; [Место защиты: Гос. ун-т - учебно-научно-произв. комплекс]. - Орел, 2012. - 172 с.
72. Герасимов В.В. Прогнозирование коррозии металлов. М.: Металлургия, 1969. 152 с.
73. Гидропневмоударные системы исполнительных органов горных и строительно-дорожных машин. А.С. Сагинов, А.Ф. Кичигин, А.Г. Лазуткин, И.А. Янцен. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.

74. ГОСТ 18296-72 Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения М.: Издательство стандартов, 1972. 10 с.
75. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
76. Дрозд М.С., Матлин М.И., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической деформации. М.: Машиностроение, 1986. 244 с.
77. Дятлова В. Н. Коррозионная стойкость металлов и сплавов: Справ.-2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1964. 350с.
78. Зайдес С.А. Теоретические основы охватывающего поверхностного пластического деформирования, технология и оборудование : диссертация ... доктора технических наук : 05.02.08. - Иркутск, 1999. - 413 с.
79. Зайдес, С. А. Механические свойства упрочненного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С. А. Зайдес, Х. Х. Нгуен // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19, № 7(223). – С. 304-311. – DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-7-304-311.
80. Зрунек М. Противокоррозионная защита металлических конструкций. Пер. с чешек. Левина Л.М. / Под ред. Герасименко А.А. -М.: Машиностроение, 1984. 196 с.
81. Иванов Г.П., Картонова Л.В., Худошин А.А. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макро-структуры // Строительные и дорожные машины, 1997. № 1. - С. 33-34.
82. Инженерные методы исследования ударных процессов. Г.С.Батуев, Ю.В.Голубков, А.К.Ефремов, А.А.Федосов. – М.: Машиностроение, 1977. – 240 с.
83. Информационно-аналитическое обеспечение упрочнения статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л.Соловьев, А.Н. Афонин, А.В. Волобуев / Под ред. А.В. Киричека. М.: Машиностроение-1, 2009. – 170 с.
84. Использование упрочнения статико-импульсной обработкой для повышения долговечности деталей машин / Д. Л. Соловьев, А. В. Киричек, А. В. Волобуев [и др.] Баринов С.В., Силантьев С.А.// Новые материалы и технологии в

машиностроении. – 2010. – № 12. – С. 110-113.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22829786>

85. Исследование влияния волнового деформационного упрочнения на механические свойства сварных швов / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин, С. А. Силантьев // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 05–07 октября 2022 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. – С. 86-89.

86. Исследование влияния размеров поперечных сечений стержневой ударной системы на эффективность передачи энергии ударного импульса в очаг деформации / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин, А. М. Константинов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 11–13 ноября 2019 года / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2020. – С. 881-886.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42493499>

87. Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после механической обработки методами сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений / М. С. Махалов, А. А. Кречетов, В. Ю. Блюменштейн, В. В. Горбатенко // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28, № 1. – С. 40-50. – DOI 10.21285/1814-3520-2024-1-40-50.

88. Киричек А.В. Формирование гетерогенно упрочненного поверхностного слоя управляемыми ударными импульсами / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов // Машиностроение - основа технологического развития России (ТМ-2013) : сборник научных статей V Международной научно-технической конференции, Курск, 22–24 мая 2013 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2013. – С. 540-543.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21784124>

89. Киричек А.В. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2008. № 7. С. 9.

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

91. Киричек А.В. Технологические возможности управления эффективной глубиной наклепа поверхностного слоя волновым деформационным упрочнением / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, Баринов С.В. [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 2(194). – С. 73-76. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-02-73-76.

92. Киричек А.В. Волновое деформационное многоконтактное нагружение / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А. В. Яшин [и др.] Зайцев А.А., Константинов А.М. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 7(60). – С. 18-26. – DOI 10.12737/article_5a337fbc06cd34.89965584.

93. Киричек А.В. Моделирование волнового деформационного нагружения алюминиево-магниевого сплава / 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.

94. Киричек А.В. Опытное подтверждение интерференционного механизма ударно-волнового деформационного структурирования материалов / А. П. Кузьменко, М. М. Тан, А. В. Киричек Соловьев Д.Л., Баринов С.В. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 98-120. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119300>

95. 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.

96. Киричек А.В. Подходы к моделированию волнового деформационного упрочнения / А.В. Киричек, С.В. Баринов, К.Ю. Андросов, [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. №12

97. 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. . DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-637300>

98. 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, №6(114) DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-3-XX-XX

99. 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.

100. Киричек А.В., Баринов С.В., Соловьев Д.Л., Тарасов Д.Е., Силантьев С.А. Создание гетерогенно упрочненного поверхностного слоя статико-импульсной обработкой поверхностным пластическим деформированием // Фундаментальные проблемы техники и технологии - Технология-2012: Сборник тезисов и аннотаций научных докладов XV Международная научно-техническая конференция. Москва – Орел: Издательский дом "Спектр", 2012. – С106-108, (448 с).

101. Киричек А.В. Обеспечение качества несоосных винтовых механизмов деформационным упрочнением их сопрягаемых деталей : диссертация ... доктора технических наук : 05.02.08. — Владимир, 1999. — 439 с.

102. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Тарасов Д.Е., Волобуев А.В. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенной структуры / «Высокие технологии в машиностроении»: материалы Всероссийской научно-

технической интернет-конференции с международным участием - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. - 284 с., с 234-236.

103. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А. В. Киричек., Д. Л. Соловьев, А. Г. Лазуткин – Москва : Машиностроение, 2004. – 287 с.

104. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Тарасов Д.Е. Повышение контактной выносливости гетерогенным волновым деформационным упрочнением / Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / С. А. Берберов, В. Ю. Блюменштейн, А. И. Болдырев [и др.]. Том 1. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 438-460, 504 с.

105. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Тарасов Д.Е. Влияние комбинированного упрочнения на контактную выносливость поверхностей деталей из цементуемых подшипниковых сталей // Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: Мат. IV Международной научно-технической конференции в 2-х частях. Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2012. – ч. II. С. 204-207 (498с.).

106. 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.

107. Киричек А.В. Исследование влияния волнового деформационного упрочнения на коррозионную стойкость / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.А Зайцев [и др.] // Вестник машиностроения. 2024. № 12 С.1003-1007

108. 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.

109. 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. №. 01-02. С. 40-52. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-01-02-40-52> .

110. Киричек А.В. Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий / А.В. Киричек, О.Н. Федонин, А.В. Хандожко, [и др.] С.В. Баринов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – № 8(134). – С. 31-38. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-8-31-38>

111. 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, Баринов С.В [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – № 6(63). – С. 8-16. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26008634>

112. Киричек А.В. Микроструктурные изменения в стали 45, вызванные волновым деформационным упрочнением / А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.В. Давыдов [и др.] Яшин А.В., Зайцев А.А., Константинов А.М.// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 8(61). – С. 79-85. – DOI 10.12737/article_5a3779ff9bec74.56692716.

113. 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.

114. Киричек А.В., Лазуткин А.Г., Соловьев Д.Л. Классификация способов поверхностного динамического упрочнения //Информационные и социально-экономические аспекты создания современных технологий: Межвуз. сб. научн. тр. Набережные Челны, КПИ, 1997. С. 22-27.

115. Киричек А.В., Афонин А.Н., Соловьев Д.Л. Экспериментальные измерительные комплексы для исследования процесса нагружения материала волной деформации. // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2004. № 2. С. 63-67.

116. 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

117. Киричек А.В. Исследование влияния геометрических размеров бойка на эффективность передачи энергии ударных импульсов, при волновом деформационном упрочнении / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин // Инновации в машиностроении : Сборник трудов X Международной научно-практической конференция, Кемерово, 26–29 ноября 2019 года / Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 567-571.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41770972>

118. Киричек А.В., Баринов С. В., Никитина Л. Г., Зайцев А. А. Влияние параметров бойка и волновода, внешних форм и внутренних полостей образцов из различных материалов на результаты волнового деформационного упрочнения (моделирование) // Транспортное машиностроение. 2022. №. 3. С. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-3-22-30>

119. Киричек А.В. Особенности влияния конечных размеров детали на распределение микротвердости в поверхностном слое при его упрочнении волной деформации / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин // Физика и технология наноматериалов и структур : сборник научных статей 2-й Международной научно-практической конференции: в 2-х томах, Курск, 24–26 ноября 2015 года. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2015. – С. 165-170.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25203637>

120. Колесников Ю.В. Механика контактного разрушения [Текст] / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. - Изд. 2-е. - Москва : URSS, 2007. - 219 с.

121. Конечно-элементное моделирование создания и испытаний гетерогенно упрочненного поверхностного слоя / А. В. Киричек, С. В. Баринов, Д. Л. Соловьев, А. П. Латаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и

технологии. – 2013. – № 2(298). – С. 87-94.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19405104>

122. Контактная выносливость после деформационного упрочнения статико-импульсной обработки / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов, С. А. Силантьев // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 3(271). – С. 58-61.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12855225>

123. Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий. Коллективная монография. / М.И. Абашин, А.А. Базров, С.В. Баринов, А.Л. Галиновский, В.П. Иванов, А.В. Киричек, и др. Под ред. А.В. Киричек и К.В. Подмастерьев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 338 с., С 294 -329.

124. Корнев А.Б. Разработка стратегии ремонта трибосопряжений крупногабаритных деталей с применением газотермического напыления в судоремонтном производстве : специальность 05.08.04 "Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корнев Андрей Борисович. – Нижний Новгород, 2006. – 220 с.

125. Красноштанов С.Ю. Хрупкое разрушение и восстановление крупногабаритных деталей горного оборудования карьеров / С. Ю. Красноштанов, А. П. Макаров // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 36-37.

126. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул : [Учеб. пособие для втузов] / Е. Н. Львовский. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Высш. шк., 1988. - 238 с.

127. Малахов А.И. Коррозия и основы гальваностегии [Текст] : [Учебник для хим.-технол. техникумов] / А.И. Малахов, К.М. Тютина. - Москва : Химия, 1977. - 216 с.

128. Малинин А.В. Модификация технологии железнения при восстановлении крупногабаритных деталей / А. В. Малинин // Научные труды

студентов Ижевской ГСХА : Электронный ресурс / главный редактор А. И. Любимов; научный редактор Н. М. Итешина; ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. Том № 2 (9). – Ижевск : Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – С. 1158-1162.

129. Маракулин И.В. Краткий справочник технолога тяжелого машиностроения / И. В. Маракулин, А. П. Бунец, В. Г. Коринюк. - Москва : Машиностроение, 1987. - 464 с.

130. Мерчалов А.С. Виброударное упрочнение крупногабаритных деталей в близкорезонансном режиме : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.07 / Мерчалов Александр Сергеевич; [Место защиты: Воронеж. гос. техн. ун-т]. - Воронеж, 2014. - 138 с.

131. Методика испытаний плоских поверхностей деталей машин на сопротивление действию контактных усталостных нагрузок / Д. Л. Соловьев, А. В. Киричек, С. В. Баринов [и др.] Силантьев С.А., Сидоренко В.В. // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2011. – № 14. – С. 105-108.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22798099>

132. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом. А.Ф. Кичигин и др. М.: Недра, 1972. 256 с.

133. Миннубаев А.И. Цементация крупногабаритных деталей (cementation of large parts) / А. И. Миннубаев, А. М. Тимин, В. Х. Абдуллина // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2024) : материалы IX Всероссийской научно-технической конференции, Казань, 03–04 октября 2024 года. – Казань: 2024. – С. 102-103.

134. Митрофанова, К. С. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин методом поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Митрофанова Кристина Сергеевна. – Кемерово, 2023. – 255 с.

135. Морин В.В. Повышение эффективности деформирующе-режущего дорнования статико-импульсным нагружением и эпиламиранием инструмента :

автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Морин Владимир Валерьевич; [Место защиты: Гос. ун-т - учебно-научно-произв. комплекс]. - Орел, 2013. - 16 с.

136. Нгуен, Х. Х. Повышение эффективности упрочнения цилиндрических деталей машин реверсивным выглаживанием : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Хыу Хай, 2024. – 207 с.

137. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

138. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. 232 с.

139. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и перераб. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1976. 320 с.

140. Пат. 2457098 Российская Федерация, В24В 39/02. Способ статико-импульсного упрочнения длинномерных отверстий / Ф 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 Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Орловский государственный технический университет" (ОрелГТУ). - № 2011104281/02; заявл. 07.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. №21.

141. 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 Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Орловский государственный технический университет" (ОрелГТУ). - № 2011104440/02; заявл. 07.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. №21.

142. Пат. 2090342 Российская Федерация, В24В 39/04, Гидроударное устройство для обработки деталей поверхностным пластическим деформированием / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев; заявитель и патентообладатель Лазуткин Александр Григорьевич, Киричек Андрей

Викторович, Соловьев Дмитрий Львович. - № 95122309/02; заявл. 21.12.1995; опубл. 20.09.1997. Бюл. № 26.

143. Пат. 2017860 Российская Федерация, МПК C23C 8/22. Способ газовой цементации крупногабаритных изделий / Ф.С. Полойко, Л.Ф. Короткова, Ю.А. Савлев; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электротермического оборудования, Полойко Феликс Соломонович. - № 4897698/02; заявл. 29.12.1990; опубл. 15.08.1994, Бюл. №15.

144. Пат. 2007495 Российская Федерация, МПК C23C 8/22. Способ газовой цементации крупногабаритных изделий / Ф.С. Полойко, Л.Ф. Короткова, Ю.А. Савлев; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электротермического оборудования, Полойко Феликс Соломонович. - № 4897965/02; заявл. 29.12.1990; опубл. 15.02.1994, Бюл. №10.

145. Пат. 432212 СССР, МПК C21D 1/78. Способ термической обработки крупногабаритных изделий из сталей мартенситного и мартенситно-ферритного классов / Ф.И. Иванов, М.А. Акулинин, Л.Г. Марьюшкин; заявитель и патентообладатель Иванов Ф.И., Акулинин М.А., Марьюшкин Л.Г. - № 3852777; заявл. 28.01.1985; опубл. 15.07.1987, Бюл. №42.

146. Пат. 2219251 Российская Федерация, МПК C21D 1/56. Способ закалки крупногабаритных стальных изделий / Ю.В. Юдин, И.Ю. Пышминцев, Ю.Г. Эйсмонтт; заявитель и патентообладатель Юдин Юрий Вячеславович, Пышминцев Игорь Юрьевич, Эйсмонтт Юрий Георгиевич. - № 2002107008/02; заявл. 18.03.2002; опубл. 20.12.2003, Бюл. №8.

147. Пат. 1323584 СССР, МПК C21D 1/56. Способ закалки массивных изделий цилиндрической формы / А.Н. Минков, И.А. Борисов, В.А. Плеханов, В.Е. Лошкарев, С.Ш. Татаркулов, Ф.И. Жварницкий, В.Д. Дзюба, В.Т. Алексеенко; заявитель и патентообладатель производственное объединение «Ново-Краматорский машиностроительный завод». - № 3852777; заявл. 28.01.1985; опубл. 15.07.1987, Бюл. №26.

148. Пат. 633927 СССР, МПК C22F 1/02 Способ термической обработки крупногабаритных изделий и сварных узлов из сплавов на основе титана / Я.И. Спектор, С.И. Храмов, И.Г. Авербух, А.С. Сысцов, Н.Н. Черкасов, Г.М. Динабурский; заявитель и патентообладатель Спектор Я.И., Храмов С.И., Авербух И.Г., Сысцов А.С., Черкасов Н.Н., Динабурский Г.М. - № 2114727, заявл. 27.02.1975; опубл. 25. 11.1978., Бюл. №43.

149. Пат. 1349977 СССР, МПК B24B 39/00 Способ упрочнения крупногабаритных деталей/ А.П. Романов, И.М. Исаева; заявитель и патентообладатель Романов А.П., Исаева И.М. - № 3934566, заявл. 22.07.1985; опубл. 07.11.1987, Бюл. №41.

150. Пат. № 2098259 РФ. Способ статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев; заявитель и патентообладатель А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев. - № 96110476/02; заявл. 05.23.1996; опубл. 10.12.1997, Бюл. №34.

151. 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: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-11-24-30>

152. Песин И.А. Разработка технологии производства крупногабаритных деталей с криволинейной поверхностью на толстолистовом прокатном стане : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.05 / Песин Илья Александрович; [Место защиты: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова]. - Магнитогорск, 2019. - 120 с.

153. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 166 с.

154. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и коллект. авт. ; Пер. с нем. Г. А. Фомина и Н. С. Лецкой ; Под ред. канд. техн. наук Э. К. Лецкого. - Москва : Мир, 1977. - 552 с.

155. 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. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11707181>

156. Поиск эффективных условий волнового термомеханического упрочнения посредством конечноэлементного моделирования / А. В. Киричек, К. Ю. Андросов, К. А. Пестракова [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в технических системах : Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 30 сентября – 01 октября 2024 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2024. – С. 93-97.

157. Покрытия и обработка поверхности для защиты от коррозии и износа: Сб. ст.: Пер. с англ. /Под ред. С.Н. Страффорда. М.: Металлургия, 1991.

158. Попов А.А. Влияние процесса виброударного упрочнения на деформации крупногабаритных деталей : специальность 05.03.0105.02.08 "Технология машиностроения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Попов Алексей Андреевич. – Воронеж, 2007. – 180 с.

159. Попов В.А. Принципы построения технологии тяжелого машиностроения [Текст]. - Москва : Машгиз, 1963. - 479 с.

160. Похмурский В.И. Коррозионная усталость металлов. М.: Машиностроение, 1985. 205 с.

161. Применение деформационного упрочнения статико-импульсной обработкой для повышения контактной выносливости деталей [Текст]/ Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В. // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Мат. межд. научн.-техн. конф., Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2008. С.16-20. (252 с.).

162. Применение ультразвуковых технологий для обеспечения качества поверхностей изделий аддитивного производства. Обзор. Ч. 1 / С. К. Сундуков, Р. И. Нигметзянов, В. М. Приходько [и др.] // Технология металлов. – 2025. – № 1. – С. 16-25. – DOI 10.31044/1684-2499-2025-0-1-16-25.

163. Приходько В.М. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / В.М. Приходько; под ред. О.В. Абрамова. – М.: Янус-К, 2006. – 688 с.

164. Приходько В.М. Основы ультразвуковых технологий разборки и очистки при ремонте автотракторной техники : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.20.03 / Моск. автомобильно-дорожный ин-т. - Москва, 1996. - 68 с.

165. Прогрессивные узлы и агрегаты технологических машин : 120-летней годовщине со дня рождения выдающегося авиаконструктора, Героя Социалистического Труда, дважды лауреата Государственной премии СССР Н. Н. Поликарпова посвящается / С. В. Баринов, А. А. Буков, В. С. Ванин [и др.]. – Москва : ООО "Спектр", 2012. – 272 с. – (Машиностроение: технологии, оборудование, кадры). – ISBN 978-5-4442-0019-3. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21531865> (Коллективная монография)

166. Прокофьев М.М. Инновации технологий импортозамещения крупногабаритных деталей технологических машин / М. М. Прокофьев, Н. С. Севрюгина, А. С. Апатенко // Актуальные вопросы эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, Химки, 19–20 декабря 2022 года. – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2022. – С. 16-21.

167. 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. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15620573>

168. Ресурсосберегающий технологический процесс термической обработки крупногабаритных штампов / Л. А. Глазков, М. С. Желудкевич, Д. Л. Жилинин [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2009. – № 2. – С. 31-34.

169. Рузанкина Ю.С., Парфенов В. А., Васильев О. С. Повышение коррозионной стойкости стали при помощи лазерной обработки // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2018. № 3. С. 65–72.

170. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.

171. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. -М.: Машиностроение, 1985. -152 с.

172. Сахонько И.М. Контактная выносливость закаленной стали в зависимости от геометрических параметров, соприкасающихся тел. Институт машиноведения АН СССР, 1961, 12 с.

173. Свидерский В.П. Разработка технологического обеспечения изготовления тонкостенных крупногабаритных корпусных деталей летательных аппаратов с применением комбинированной деформирующей обработки : диссертация ... доктора технических наук : 05.07.02 / Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ). - Москва, 2004. - 236 с.

174. Свидетельство о рег. программы для ЭВМ № 2009610110 Расчет параметров статико-импульсной обработки / Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Афонин А.Н., Волобуев А.В.– 2009.

175. Силантьев С.А. Повышение эффективности статико-импульсной обработки управлением технологическими режимами и параметрами генератора импульсов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.03.01, 05.02.08. - Орел, 2003. - 180 с.

176. Симонов, Д. С. Повышение эффективности поверхностного пластического деформирования нежестких валов комбинированными ультразвуковыми технологиями : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Симонов Дмитрий Сергеевич, 2024. – 135 с.

177. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

178. Создание гетерогенно-упрочненной структуры поверхностного слоя деталей машин деформационной статико-импульсной обработкой / А. В. Киричек,

Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов, С. А. Силантьев // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010) : сборник трудов Международной научно-технической конференции, Воронеж, 01–05 октября 2010 года / Воронежский государственный технический университет и др.; Под научной редакцией В. П. Смоленцева, А. В. Бондаря. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2010. – С. 219-223.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25713848>

179. Соловей С.А. Современное состояние методов повышения коррозионной стойкости и сопротивления коррозионной усталости сварных соединений (обзор) // Автоматическая сварка. 2017. № 3. С. 51–58.

180. 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.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15104577>

181. Соловьев Д.Л. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием : диссертация ... доктора технических наук : 05.03.01, 05.02.08. - Орел, 2005. - 384 с.

182. Соловьев Д.Л. Обеспечение качества деталей машин упрочняющей статико-импульсной обработкой : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08. - Муром, 1998. - 161 с.

183. Соловьев Д.Л. Деформационное упрочнение способом статико-импульсного нагружения. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 10.

184. Соловьев Д.Л. Обеспечение качества деталей машин упрочняющей статико-импульсной обработкой : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08. - Муром, 1998. - 161 с.

185. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / С. А. Берберов, В. Ю. Блюменштейн, А. И. Болдырев [и др.]. Под ред. С.А. Зайдеса. Том 1. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – 504 с.

186. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / И. Р. Асланян, С. В. Баринов, В. Ф. Безъязычный [и др.]. Под ред. С.А. Зайдеса. Том 2. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – 584 с.

187. Справочник технолога : Под общей редакцией А.Г. Суслова / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, В.М. Приходько [и др.]. – Москва : Издательство "Инновационное машиностроение", 2019. – 800 с. – ISBN 978-5-907104-23-5.

188. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

189. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

190. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.

191. Тарасов Д.Е. Повышение контактной выносливости комбинированным упрочнением статико-импульсной обработкой и цементацией : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Тарасов Дмитрий Евгеньевич; [Место защиты: Гос. ун-т - учебно-научно-произв. комплекс]. - Орел, 2013. - 173 с.

192. Технология тяжелого машиностроения [Текст] / С. И. Самойлов, В. М. Горелов, В. М. Браславский и др. ; Под ред. проф. С. И. Самойлова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1967. - 595 с.

193. Технология конструкционных материалов : ТКМ : учеб. для студентов машиностроит. вузов / А.М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А.М. Дальского. — 6-е изд., испр. и доп. — Москва : Машиностроение, 2005. — 592 с.

194. Ужик Г.В. О влиянии абсолютных размеров деталей машин на их прочность. Сб. «Вопросы расчета и конструирования деталей машин», Изд. АН СССР, М., 1942. 190 с.

195. Упрочнение многофункциональных электроосажденных покрытий для восстановления крупногабаритных деталей / В. В. Серебровский, Л. Н. Серебровская, Р. И. Сафронов, Ю. П. Гнездилова // Электрика. – 2015. – № 4. – С. 31-34.

196. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении / Б. Н. Гузанов, С. В. Косицын, Н. Б. Пугачева ; Рос. акад. наук, Ур. отд-ние, Ин-т машиноведения, Ин-т физики металлов, Рос. гос. проф.- пед. ун-т. - Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 241 с.

197. Установка для испытаний на контактную выносливость плоских поверхностей деталей машин / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. А. Силантьев, С. В. Баринов // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2007. – № 3. – С. 98-103. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13040908>

198. 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 : 120-летней годовщине со дня рождения выдающегося авиаконструктора, Героя Социалистического Труда, дважды лауреата Государственной премии СССР Н. Н. Поликарпова посвящается. – Москва : ООО "Спектр", 2012. – С. 232-265. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29341710>

199. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. М.: Машиностроение, 2000. 416 с.

200. Федонин О. Н. Технологическое обеспечение коррозионной стойкости деталей из конструкционных сталей в условиях электрохимической коррозии: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Федонин Олег Николаевич. Брянск, 2004. 320 с.

201. Федонина С.О. Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термомодеформационным упрочнением : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Федонина Светлана Олеговна; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»]. - Брянск, 2021. - 186 с.

202. Федотов А.В. Аддитивные технологии для производства ракетного двигателя // Аддитивные технологии. 2020. № 1. С.10-20.

203. Хворостухин Л.А., Шишкин С.В. и др. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.

204. Хейфец Р.Г., Бейлинова Л. А., Марек И. М., Цвиркун О. Ф. Коррозионная стойкость нержавеющей центробежно-литых труб, деформированных горячей раздачей // Защита металлов. 1990. Т.26. №3. С. 415–420.

205. Цирков П.А. Повышение работоспособности крупногабаритных деталей машин машиностроительных и металлургических производств / П. А. Цирков, Д. А. Лебедева, А. В. Бурякин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 4(342). – С. 49-51. – DOI 10.33979/2073-7408-2020-342-4-1-49-51.

206. Чепа П.А., Андрияшин В.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей. Минск: Наука и техника, 1988. 192 с.

207. Шинкарев А.С. Повышение качества поверхностного слоя сварных швов на основе совершенствования ультразвуковой ударной обработки : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.07, 05.02.08 / Шинкарев Артем Сергеевич; [Место защиты: Ижев. гос. техн. ун-т]. - Ижевск, 2010. - 146 с.

208. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. М.: Машиностроение, 1982. 248 с.

209. Экспериментальный стенд для исследования процессов волнового деформационного упрочнения / А. В. Киричек, С. В. Баринов, С. А. Силантьев [и др.] Яшин А.В., Константинов А.М.// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 12(85). – С. 50-57. – DOI 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-50-57.

210. Яшин А.В. Технологическое обеспечение качества каркасных деталей из алюминий-магниевого сплава многоконтakтным волновым деформационным упрочнением : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Яшин Александр Васильевич; [Место защиты: Брянский государственный технический университет]. - Брянск, 2019. - 159 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

«УТВЕРЖДАЮ»

первый заместитель генерального
директора ФГУП «НПО

«ТЕХНОМАШ» им. С.А. Афанасьева»

А.И. Кузин

2020 г.

АКТ

на внедрение научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители исполнителя: сотрудники НИЛ «Волнового деформационного и комбинированного упрочнения в аддитивных и субтрактивных технологиях» Брянского государственного технического университета: научный руководитель - проректор по перспективному развитию Киричек А.В., д.т.н., профессор; нач. отдела Жирков А.А., к.т.н., доцент; научный сотрудник Баринов С.В., к.т.н., доцент; ведущий инженер Федонина С.О. с одной стороны,

и представители потребителя поисковой НИР: и.о. заместителя генерального директора Григорьев М.В., к.т.н.; директор центра аддитивных технологий и цифрового производства к.х.н. Егоров А.В.; начальник отделения аддитивных технологий и цифрового производства Мазуркевич А.Н. с другой стороны,

составили настоящий акт о внедрении результатов поисковой НИР «Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термдеформационным упрочнением (ВТДУ)».

В результате выполнения вышеуказанной НИР получены следующие результаты: проведена разработка конечно-элементной модели аддитивного синтеза деталей из проволоки и определения температурных условий; предложены стратегии и рациональные технологические режимы волнового деформационного упрочнения (ВДУ); разработки технологических рекомендаций по реализации термдеформационного упрочнения в процессе синтеза деталей из проволоки.

Достигнуто: повышение механических свойств материала, параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств ответственных изделий ракетно-космической техники, изготавливаемых из сталей и сплавов хром-никель-молибденовой группы, изготовленных и упрочненных по предлагаемой аддитивно-

упрочняющей (ВТДУ) технологии в 1,5...2,5 раза по сравнению с базовой технологией изготовления деталей из проката.

Работа принята к внедрению в рамках предусмотренных работ по созданию перспективных изделий ракетно-космической техники, в частности в рамках перспективной ОКР «Прогресс-2025», включенной в Федеральную космическую программу России, ожидаемый годовой экономическим эффектом более 1 млн.руб.

Представители заказчика

М.В. Григорьев

А.В. Егоров

А.Н. Мазуркевич

Представители исполнителя

А.В. Киричек

А.А. Жирков

С.В. Баринов

С.О. Федонина



Публичное акционерное общество
НОВОЛИПЕЦКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ

ПАО «НЛМК», пл. Metallургов 2, г. Липецк, 398040
тел.: +7 (4742) 44 42 22 | факс: +7 (4742) 44 11 11
e-mail: info@nlmk.com | www.nlmk.ru

Начальник управления
«Проектный офис ТОиР»
В.В.Истомин



АКТ
использования результатов
диссертационного исследования
Баринаова Сергея Владимировича.

Новолипецкий металлургический комбинат является предприятием с полным металлургическим циклом, ежегодная выручка которого превышает 16 млн, \$. В условиях острой конкурентной борьбы, импортозамещения и санкционной политики зарубежных стран, одной из важнейших задач является повышение рентабельности производства за счет более эффективного использования ресурса прокатного оборудования и качества выпускаемой продукции.

Разработанные технологии и предложенные в диссертационной работе Баринаова Сергея Владимировича технологические рекомендации, обеспечивающие кратное повышение контактной выносливости волновым деформационным упрочнением, имеют большие перспективы применения с целью как работоспособности и долговечности ответственных деталей, прокатных станов в т. ч. (рабочих) валков, (рольгангов, летучих ножниц, м/к клетей, моталок), так и выпускаемых единиц продукции НЛМК (плоского проката и электротехнических сталей).

Технологические рекомендации по упрочнению сварных швов и околошовных зон, повышению прочности и выносливости волновым деформационным упрочнением, целесообразно использовать применительно в технологии производства и электротехнической стали (трансформаторного и динамного проката), для восстановления физических и прочностных характеристик после соединения рулонов стыкосварочной машиной.

Настоящим актом подтверждаем заинтересованность в практическом использовании результатов диссертационной работы Баринаова С.В. на НЛМК, ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения которых составляет более 11 млн. руб.



Главный специалист (инструменты надежности)

Д.А.Мазанов

Руководитель проектов ТОиР

М.Ю.Ульянов

Главный специалист (инструменты планирования)

С.В.Абузов



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ
«АЭМ-ТЕХНОЛОГИИ»
(АО «АЭМ-технологии»)
ВОЛГОДОНСКИЙ ФИЛИАЛ АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА
«ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «АЭМ-ТЕХНОЛОГИИ»
(Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск)**

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор филиала
АО «АЭМ-технологии»
«Атоммаш» в г. Волгодонск



/Жидков М.Е./

2024 г.

«

Акт внедрения.

Результаты диссертационного исследования Барина Сергея Владимировича на тему «Повышение эффективности технологии волнового деформационного упрочнения ресурсопределяющих деталей конечно элементным моделированием» нашли применение в основном производстве Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г.Волгодонск. для повышения качества сварных соединений атомного реактора.

Ожидаемый годовой экономический эффект от применения результатов исследований Барина С.В. в производстве составит 1,9 млн. рублей.

Технический директор
Филиала АО «АЭМ-технологии»
«Атоммаш» в г. Волгодонск

А.В. Фоменко

“Утверждаю”

Генеральный директор ОАО «РИП»

Б.А. Жулин

03 2008 г.



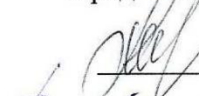
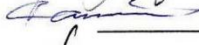
АКТ

о внедрении научно-исследовательской работы

Комиссия в составе: технического директора ОАО «РИП» Мошнина А.К.; начальника механического цеха Катенина С.А.; начальника ОГМЕТ Королева В.С.; директора технологического института ОрелГТУ, д.т.н., профессора Киричека А.В.; д.т.н., профессора каф. «Станки и инструмент» Муромского института ВлГУ Соловьева Д.Л.; доцента каф. «Станки и инструмент» Муромского института ВлГУ Силантьева С.А.; ассистента каф. «Станки и инструмент» Муромского института ВлГУ Барина С.В. по результатам экспериментального исследования установили целесообразность использования в производственных условиях разработанной технологии создания гетерогенной структуры статико-импульсной обработкой поверхностным пластическим деформированием. Полученная гетерогенная структура представляет собой чередующиеся твердые и мягкие локальные области на глубине до 5 мм и более, и позволяет повысить сопротивление контактному выкрашиванию обработанных поверхностей деталей машин в 4...6 раз.

Разработанная технология предназначена для повышения долговечности как деталей оборудования, так и сложного инструмента и принята к внедрению в условиях ОАО «РИП».

Представители ОАО «РИП»

 А.К. Мошнин
 С.А. Катенин
 В.С. Королев

Представители Технологического
института ОрелГТУ и Муромского
института ВлГУ

 А.В. Киричек
 Д.Л. Соловьев
 С.А. Силантьев
 С.В. Барин

«Утверждаю»
Генеральный директор АО «ПО Муромский
Машиностроительный Завод»
Видонов А.И.
30 мая 2019 г.

АКТ

на внедрение научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители исполнителя: проректор по перспективному развитию БГТУ, д.т.н., профессор Киричек А.В.; д.т.н., профессор кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Соловьев Д.Л.; к.т.н., доцент кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Баринов С.В.; аспирант кафедры «МСИИ» БГТУ Яшин А.В., с одной стороны, и представители заказчика: заместитель генерального директора, начальник ИТЦ Костаков А.А.; главный инженер Демин Д.Г.; начальник технического бюро Диков А.Г., с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов поисковой НИР «Технологическое обеспечение качества каркасных деталей из алюминиево-магниевого сплавов многоконтактным волновым деформационным упрочнением».

В результате внедрения НИР: разработки конечно-элементной модели многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ) и определения рациональных технологических режимов упрочнения волной деформации; разработки конечно-элементной модели исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) изделия; разработки инструментальной многоконтактной оснастки для упрочняющей обработки; разработки технологических рекомендаций по реализации процесса МК ВДУ достигнуто: Повышение параметров качества поверхностного слоя и сопротивления усталости ответственных изделий изготавливаемых из алюминиево-магниевого сплава (АМг), упрочненных по предлагаемой многоконтактной технологии в 1,5...3 раза по сравнению с базовой технологией изготовления.

Работа внедрена в производство специального изделия «Лодыга» с экономическим эффектом до 120 тыс. руб./ед.

Представители заказчика

А.А. Костаков

Д.Г. Демин

А.Г. Диков

Представители исполнителя

А.В. Киричек, д.т.н. проф.

Д.Л. Соловьев, д.т.н., проф.

С.В. Баринов, к.т.н., доц.

А.В. Яшин

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
НПП «Гидротехника», д.т.н.

Сухочев Г.А.

2007 г.



АКТ

на внедрение научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители исполнителя: директор Технологического института имени Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», д.т.н., профессор Киричек А.В., д.т.н., профессор каф. «Станки и инструмент» Муромского института ВлГУ Соловьев Д.Л., к.т.н. Силантьев С.А., к.т.н. Баринов С.А., заведующий лабораторией, старший преподаватель кафедры ТМиКТИ Технологического института имени Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» Тарасов Д.Е. с одной стороны, и представители заказчика «Научно-производственного предприятия «Гидротехника»: начальник производства Москалев А.А., главный бухгалтер Н.И. Иванова, ответственная за внедрение к.т.н. Смольяникова Е.Г. с другой стороны, составили настоящий акт на внедрение результатов поисковой НИР «Повышение несущей способности деталей машин гетерогенным упрочнением волной деформации», выполненной в период с «01» октября 2005 г. по «30» декабря 2007 г.

В результате внедрения результатов НИР: Разработки оборудования и технологической оснастки для упрочнения волной деформации деталей машин в процессе статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием (САО ППД), определения рациональных технологических режимов упрочнения для создания гетерогенных структур в сплошном материале; экспериментальной оценки контактной выносливости поверхностей ответственных деталей и разработки технологических рекомендаций достигнуто: Повышение контактной выносливости гетерогенно упрочненных поверхностей ответственных изделий в 2...7 раз, по сравнению с равномерным упрочнением.

Работа внедрена в производство насосов циркуляционных НЦ50, НЦ25 с экономическим эффектом 452000 руб./год.

Представители заказчика

А.А. Москалев

Н.И. Иванова

Е.Г. Смольяникова, к.т.н.

Представители исполнителя

А.В. Киричек, д.т.н., проф.

Д.Л. Соловьев, д.т.н., проф.

С.А. Силантьев, к.т.н.

С.В. Баринов, к.т.н.

Д.Е. Тарасов

«Утверждаю»
 Генеральный директор ОАО «КЗМК»
 Д.В. Зюков
 29 2008 г.

АКТ

о внедрении научно-исследовательской работы

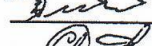
Комиссия в составе: технического директора ОАО «КЗМК» Попова В.В.; первого заместителя генерального директора Соколова К.В.; главного технолога Смирнова Д.Н.; директора технологического института ОрелГТУ, д.т.н., профессора Киричека А.В.; заведующего лабораториями кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологической информатики» технологического института ОрелГТУ Тарасова Д.Е.; д.т.н., профессора кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов» Муромского института (филиал) ВлГУ Соловьева Д.Л.; к.т.н., доцента кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов» Муромского института (филиал) ВлГУ Барина С.В.; к.т.н., доцента кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов» Муромского института (филиал) ВлГУ Силантьева С.А., рассмотрела результаты испытаний технологии деформационного упрочнения статико-импульсной обработкой, в ходе которых была установлена возможность получения упрочненного поверхностного слоя с различной равномерностью упрочнения глубиной до 5...6 мм и более и твердостью, достигающей 6500 МПа.

Принято решение, рекомендовать технологию упрочнения статико-импульсной обработкой для повышения долговечности и несущей способности деталей оборудования ОАО «КЗМК».

Представители ОАО «КЗМК»

 В.В. Попов
 К.В. Соколов
 Д.Н. Смирнов

Представители
 Технологического института ОрелГТУ
 и Муромского института (филиал) ВлГУ

 А.В. Киричек
 Д.Л. Соловьев
 С.В. Барин
 С.А. Силантьев
 Д.Е. Тарасов

«Утверждаю»

Генеральный директор АО «Муромский
ремонтно-механический завод»

Е.Ф. Чумазин

29 мая 2019 г.

АКТ

о внедрении научно-исследовательской работы



Комиссия в составе: первого заместителя генерального директора - директора по развитию Хомутова А.В., заместителя директора по развитию - начальника управления по продажам и развитию специальной и коммунальной техники Медникова И.И., заместителя начальника отдела инструментального хозяйства Семёнова А.Ю., проректора по перспективному развитию БГТУ, д.т.н., профессора Киричека А.В.; д.т.н., профессора кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Соловьева Д.Л.; к.т.н., доцента кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Барина С.В.; аспиранта кафедры «МСИИ» БГТУ Яшина А.В., рассмотрела результаты испытаний технологии многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ), в ходе которых установлена возможность создания упрочненного поверхностного слоя в алюминиево-магниево-магневых сплавах (АМг) глубиной 6-10 мм со степенью упрочнения до 2,1 раза выше исходной.

Принято решение, рекомендовать технологию многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ) для повышения эксплуатационных характеристик деталей и изделий из сплавов группы АМг, выпускаемых на АО «МРМЗ».

Представители АО «МРМЗ»

 А.В. Хомутов
 И.И. Медников
 А.Ю. Семёнов

Представители

БГТУ и МИ ВлГУ

 А.В. Киричек
 Д.Л. Соловьев
 С.В. Барин
 А.В. Яшин