

На правах рукописи

ФЕДОНИНА СВЕТЛАНА ОЛЕГОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ ПРОВОЛОКИ
ДЕТАЛЕЙ ВОЛНОВЫМ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫМ
УПРОЧНЕНИЕМ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Брянск 2021

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Киричек Андрей Викторович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Афонин Андрей Николаевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет», профессор кафедры
«Информационные и робототехнические
системы»

Лебедев Валерий Александрович,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», профессор кафедры
«Технология машиностроения»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»

Защита состоится «21» апреля 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу:
<https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/fedonina-svetlana-olegovna>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 999.155.03
доктор технических наук, профессор

О.Н. Кириллов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из основных тенденций современного наукоемкого аэрокосмического и автомобильного машиностроения является все более активное применение аддитивных технологий (АТ, Additive Manufacturing), предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или САД-модели) методом послойного добавления материала. Аддитивный синтез имеет множество достоинств: возможность создания сложнопрофильных и биметаллических деталей за один технологический передел из порошка или проволоки, сокращение количества операций и межоперационных заделов, повышение коэффициента использования материала и т.д. Одними из наиболее перспективных для применения АТ являются детали типа «оболочка» из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы, достаточно широко применяющиеся в аэрокосмической отрасли.

Из всего многообразия АТ, наиболее перспективными сегодня являются технологии синтеза деталей из проволоки, которые по сравнению с порошковыми АТ обладают многократно более высокой производительностью и не имеют жестких ограничений по размерам выращиваемых изделий. Появление 3DMP-метода (3D Metal Print – осаждение/наплавка проволоки методом электродуговой сварки (gas metal arc welding, GMA welding, GMAW)) синтеза деталей создало реальную конкуренцию традиционным технологиям механической обработки даже по экономической эффективности. Однако, вследствие недостаточного качества и прочности синтезируемого изделия, присущего всем АТ, до сих пор сохраняется трудно преодолимое процентное соотношение между синтезируемыми моделями и деталями, составляющее от 60/40 до 80/20 даже в передовых странах мира.

Технологическое обеспечение необходимого качества поверхностного слоя, механических свойств материала и эксплуатационных свойств деталей, непосредственно связано с применением отделочно-упрочняющих операций. Большими технологическими возможностями управления параметрами поверхностного слоя обладают методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Несмотря на то, что идея применения ППД в АТ предлагалась и американскими и Российскими исследователями, теория и практика реализации такой технологии полностью отсутствует.

Обработка ППД полностью синтезированной детали часто нецелесообразна вследствие сложности формы, а небольшая толщина стенки не позволяет работать со значительными силами деформирования. Характерная для подавляющего большинства способов ППД небольшая глубина упрочненного слоя, также накладывает серьезные ограничения на применимость технологии как в процессе аддитивного синтеза, так и после него.

Идея деформационного упрочнения синтезируемой детали, впервые предложенная в 2007 г. в американском патенте (US 20070122560), до

настоящего времени оставалась нереализованной вследствие уверенности в том, что нагрев до высоких температур, тем более до температуры плавления, полностью уничтожает эффект деформационного упрочнения.

Однако, в соответствии с законом технологического наследования, выявленного А.М. Дальским и его последователями в МГТУ им. Н.Э.Баумана, положительными результатами применения ППД перед ХТО, полученными научными коллективами под руководством Папшева Д.Д. (Самара), Балтер М.А., Киричека А.В., успешным опытом реализации процессов ВТМО, НТМО, ЭМО, разработанных научными школами Берштейна М.Л., Аскинази Б.М., Сулова А.Г., и др., установлена целесообразность объединения термического и деформационного воздействия на материал.

В качестве деформационного метода наиболее перспективным является волновое деформационное упрочнение в процессе статико-импульсной обработки, разработанное в 1997 г. Киричеком А.В. и Соловьевым Д.Л., позволяющее получать глубокий упрочненный слой, предположительно, больше глубины зоны рекристаллизации, формирующейся в процессе синтеза детали 3DMP-методом.

Следовательно, исследование целесообразности и эффективности волнового термдеформационного упрочнения (ВТДУ) деталей из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы, синтезируемой из проволоки 3DMP-методом, закономерностей влияния температуры и технологических режимов ВДУ на параметры качества поверхностного слоя и прочность – актуально.

Цель работы – повышение качества (улучшение микроструктуры, уменьшение характерного размера фазовых элементов микроструктуры, твердости, повышение предела прочности и предела текучести) деталей, синтезированных из проволоки, изготовленной из сталей и сплавов группы Cr-Ni и Cr-Ni-Mo, технологией волнового термдеформационного упрочнения.

Объект исследования – технологический процесс послойного (периодического) ВТДУ синтезируемых деталей 3DMP-методом.

Предмет исследования – влияние ВТДУ на микроструктуру, твердость, предел прочности и предел текучести материала синтезируемых из проволоки деталей 3DMP-методом.

Задачи:

1. Разработать феноменологическую модель и модель типа «черный ящик» технологического процесса, включающего 3DMP-синтез, упрочнение волной деформации и механическую обработку, выявить наиболее значимые технологические факторы и выходные параметры процесса, разработать классификацию родственных термдеформационных процессов.

2. Разработать конечно-элементную динамическую модель формирования температурных полей при синтезе детали из проволоки 3DMP-методом (на примере детали типа «оболочка»).

3. Теоретически и экспериментально исследовать закономерности нагрева и охлаждения отдельных синтезируемых слоев и детали в целом, выявить влияние энергетической интенсивности наплавки 3DMP-методом на глубину и время выдержки элементарных объемов синтезированного металла при температуре рекристаллизации.

4. Разработать технологическую стратегию реализации волнового термомодеформационного упрочнения при синтезе детали 3DMP-методом, выявить рациональные значения температуры упрочнения, интервала времени между воздействиями проволочного фидстока и деформирующего инструмента на элементарный участок обрабатываемой (синтезируемой) поверхности, периодичности деформирующего воздействия (через один или несколько наплавленных слоев).

5. Исследовать закономерности формирования микроструктуры, влияния на твердость, пределы прочности и текучести технологических факторов ВТДУ на образцах из сталей и сплавов группы Cr-Ni и Cr-Ni-Mo, синтезированных из проволоки 3DMP-методом.

6. Разработать и апробировать на практике технологические рекомендации по реализации ВТДУ при синтезе деталей из проволоки 3DMP-методом.

Методы исследований основаны на теоретических положениях технологии машиностроения и теплофизики технологических процессов, планирования эксперимента, математической статистики, математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ).

Достоверность полученных результатов достигается: использованием современного аналитического и станочного оборудования; корректным применением МКЭ при моделировании в признанном программном комплексе ANSYS; экспериментальной оценкой адекватности полученных моделей и сравнением полученных результатов исследования на непротиворечивость данным, опубликованным другими авторами.

Научная новизна

1. Впервые разработана технология волнового термомодеформационного упрочнения (ВТДУ) синтезируемой из проволоки поверхности детали, установлена связь технологических факторов и стратегии реализации ВТДУ с микроструктурой, твердостью и прочностью упрочненного материала (п. 2, 4, 6, 7 паспорта научной специальности 05.02.08):

- установлены закономерности технологического наследования особенностей строения и свойств поверхностного слоя синтезируемой из проволоки 3DMP-методом детали, вызванных послойным и периодическим (через несколько слоев) волновым деформационным упрочнением;

- установлен рациональный диапазон варьирования технологических факторов волнового деформационного упрочнения во взаимосвязи с механическими свойствами материала детали и параметрами качества поверхностного слоя, а также формой и размерами синтезируемой 3DMP-методом детали и обрабатываемой поверхности;

- установлено, что в отличие от неупрочненных, синтезированные с применением ВТДУ образцы из сталей и сплавов группы Cr-Ni и Cr-Ni-Mo имеют мелкозернистую микроструктуру, не содержащую грубых дендритов, и более высокие механические свойства: твердость - в 2,5...2,6 раза, предел текучести - в 2...2,2 раза, предел прочности - в 1,5...1,7 раза, что существенно (в 1,4...2,5 раза) превышает аналогичные свойства проката из материала той же марки.

2. 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 (п. 3, 4, 5 паспорта научной специальности 05.02.08):

- выявлен благоприятный температурный диапазон волнового деформационного упрочнения синтезированного материала – 200...600 °С;

- выявлены закономерности для определения расстояния при одновременном движении и допустимого интервала времени между воздействиями проволочного фидстока и деформирующего инструмента на элементарный участок обрабатываемой поверхности;

- установлены закономерности для определения рациональной периодичности деформирующего воздействия (через несколько слоев) с частотой, обеспечивающей высокую производительность обработки и высокие механические свойства материала, во взаимосвязи с глубиной и временем выдержки элементарных объемов синтезированного металла при температуре рекристаллизации.

Практическая ценность работы заключается в разработанных технологических рекомендациях по послойному и периодическому межслойному волновому термдеформационному упрочнению синтезированных 3DMP-методом деталей из легированных группы Cr-Ni и Cr-Ni-Mo сталей и сплавов.

На защиту выносятся:

- технологические рекомендации по стратегии и режимам ВТДУ синтезируемых 3DMP-методом деталей из Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы сталей и сплавов;

- феноменологическая модель и модель типа «черный ящик» технологического процесса, включающего 3DMP-синтез, упрочнение волной деформации и механическую обработку, классификация родственных ВТДУ термдеформационных процессов;

- динамическая модель (МКЭ) формирования температурных полей при синтезе детали из проволоки и результаты теоретических исследований закономерностей нагрева и охлаждения отдельных слоев и детали в целом во взаимосвязи с энергетической интенсивностью 3DMP-метода;

- результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов ВТДУ на микроструктуру и параметры качества

поверхностного слоя, твердость, прочность синтезируемых из проволоки деталей из сталей и сплавов группы Cr-Ni и Cr-Ni-Mo.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международном симпозиуме технологов-машиностроителей «Наукоемкие и виброволновые технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий» (г. Ростов-на-Дону, 2018 г.); научном семинаре «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств машин и их соединений» посвященный 90-летию Рыжова Э.В. (г. Брянск, 2018 г.); научном семинаре памяти А.П. Бабичева «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий» (Ростов-на-Дону, 2019 г.); международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon (г. Брянск - 2019 г., г. Санкт-Петербург - 2020 г.); международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», (г. Брянск, 2020 г.); научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (Ростов-на-Дону, 2020 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 6 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из 5 глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 154 страницах, содержит 14 таблиц, 57 рисунков, 12 приложений и список литературы из 90 наименований.

Исследования выполнены при поддержке ФПИ, проект «Таймень 2».

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности решаемой проблемы, цель, задачи, практическая ценность и научная новизна исследования.

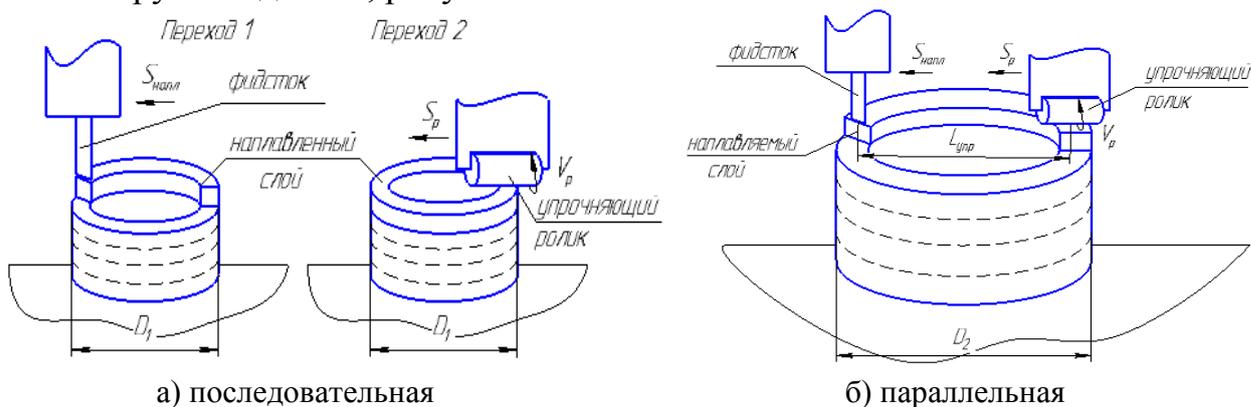
В первой главе приведен анализ современного состояния АТ, выявлена группа деталей типа «оболочка» из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы, применяющихся в аэрокосмической отрасли, для которых актуален переход на технологии аддитивного синтеза.

Выбраны наиболее значимые для производства 3DMP-методом и упрочнения параметры качества (микроструктура, твердость (микротвердость), прочность, глубина упрочненного поверхностного слоя).

Во второй главе описана общая методика исследований повышения параметров качества деталей, синтезируемых из Cr-Ni и Cr-Ni-Mo проволоки. Подобрано оборудование для проведения экспериментальных исследований: цифровой автоматизированный микроскоп Leica DVM6A, микротвердомер KB30, тепловизор TiX660 Fluke. Экспериментальная часть проводилась на

экспериментальной установке для реализации аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии (АСУТ). Приведена методика планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных.

В третьей главе разработана феноменологическая модель технологии аддитивного синтеза деталей из проволоки и ВТДУ, описывающая закономерности технологического наследования особенностей строения и свойств поверхностного слоя синтезируемой из проволоки 3DMP-методом детали, вызванных послойным и периодическим (через несколько слоев) волновым деформационным упрочнением. Предложены параллельная и последовательная стратегии упрочнения, целесообразность применения которых в каждом конкретном случае определяется формой и размерами синтезируемой детали, рисунок 1.



а) последовательная
Рисунок 1 – Стратегии волнового термдеформационного упрочнения

Доказана эффективность применения ВТДУ и разработана классификация на основании сравнительного анализа с родственными технологическими процессами, основанными на комбинировании термической и деформационной обработки (ВТМО, НТМО, ЭМО).

Разработана модель типа «черный ящик» технологического процесса, включающего 3DMP-синтез, упрочнение волной деформации и механическую обработку, с целью выявления наиболее значимых входных независимых технологических факторов и выходных параметров процесса, рисунок 2.

Входные данные:

Стратегия упрочнения
Коэффициент перекрытия отпечатков K
Температура упрочняемой поверхности $t_{упр}$, °С
Энергия удара E , Дж



Выходные данные:

Твердость (HV , $h_{упр}$)
Микроструктура
Предел прочности
Предел текучести

Рисунок 2 – Модель «черный ящик» технологического процесса АСУТ

В четвертой главе разработана конечно-элементная динамическая модель формирования температурных полей (ДМТП) при синтезе детали из проволоки 3DMP-методом (на примере детали типа «оболочка»).

Для разработки тепловой КЭМ ВТДУ и исследования закономерностей нагрева и охлаждения отдельных синтезируемых слоев и детали в целом, выбрано программное обеспечение ANSYS/LS-DYNA, которое позволяет исследовать нелинейные быстропротекающие динамические процессы, происходящие в неупругих средах. В качестве выходных параметров модели приняты время выдержки элементарных объемов синтезированного металла и глубина материала, прогретых до температур рекристаллизации, а также характер распределения тепловых полей при синтезе детали. Данные параметры являются основными и позволяют выявить рациональные значения температуры упрочнения $t_{упр}$, допустимого интервала времени между воздействиями проволочного фидстока и деформирующего инструмента на элементарный участок обрабатываемой поверхности, разработать технологическую стратегию реализации ВТДУ.

Для создания адекватной тепловой модели процесса синтеза при задании граничных условий и выявления ключевых входных параметров моделирования (размер и количество элементарных ячеек, геометрические размеры «оболочки» и подложки, режимы наплавки, длительность пребывания элементарной ячейки в жидком состоянии и т.д.), проводился предварительный эксперимент синтеза моделируемой детали. Свойства обрабатываемого материала ($\rho, c, \lambda, E, \alpha, G, \sigma_{0,2}$) заданы с учетом зависимости от температурного диапазона $y=f(t)$, где t – температура обрабатываемой поверхности, °С.

Графическими средствами ANSYS/LS-DYNA создана трехмерная модель моделируемой «оболочки» и осуществлено разбиение на конечные элементы. Всем объектам присвоены соответствующие модели материалов и их характеристики. Для моделирования процесса наплавки материала применялись функции, обеспечивающие внутренний нагрев выбранного объема материала и имитацию поэтапного нанесения металла при перемещении сварочной ванны слой за слоем.

Разработанная конечно-элементная динамическая модель формирования температурных полей при синтезе детали из проволоки 3DMP-методом позволила выявить закономерности нагрева и охлаждения отдельных синтезируемых слоев и детали в целом, а также установить, что температурный баланс наступает после наплавки 5...6 слоев синтезируемой детали.

Оценка адекватности моделирования и визуализации КЭМ 3DMP-наплавки «оболочки» из легированной стали осуществлялся экспериментальным путем в процессе синтеза «оболочки» из 18 слоев на экспериментальном оборудовании аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии (АСУТ). Определение характера изменения температур и распределения тепловых потоков в процессе выращивания детали осуществлялось тепловизором Fluke Tix660.

Для наибольшей достоверности эксперимент проводился несколько раз с фиксацией результатов измерений внешней стороны наплавляемой оболочки

на видео съемку при разных температурных диапазонах тепловизора: 0...500°C и 0...1200 °С (использовалось комбинирование диапазонов: 0...500°C и 250...1200 °С).

На основании сравнительного анализа полученных экспериментальных данных по сечению внешней стороны «оболочки», с результатами расчета по ДМТП, сделан вывод о соответствии КЭМ формирования температурных полей при синтезе детали из проволоки 3DMP и результатов эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95, следовательно, модель адекватна, рисунок 3.

На основании анализа графических зависимостей температурных диапазонов от тепло- и энергетической интенсивности элементарных ячеек (ванн расплава) определен диапазон допустимых энергий аддитивного синтеза 1530...1970 Дж или 18,85...24,15 Дж/(мм³·с).

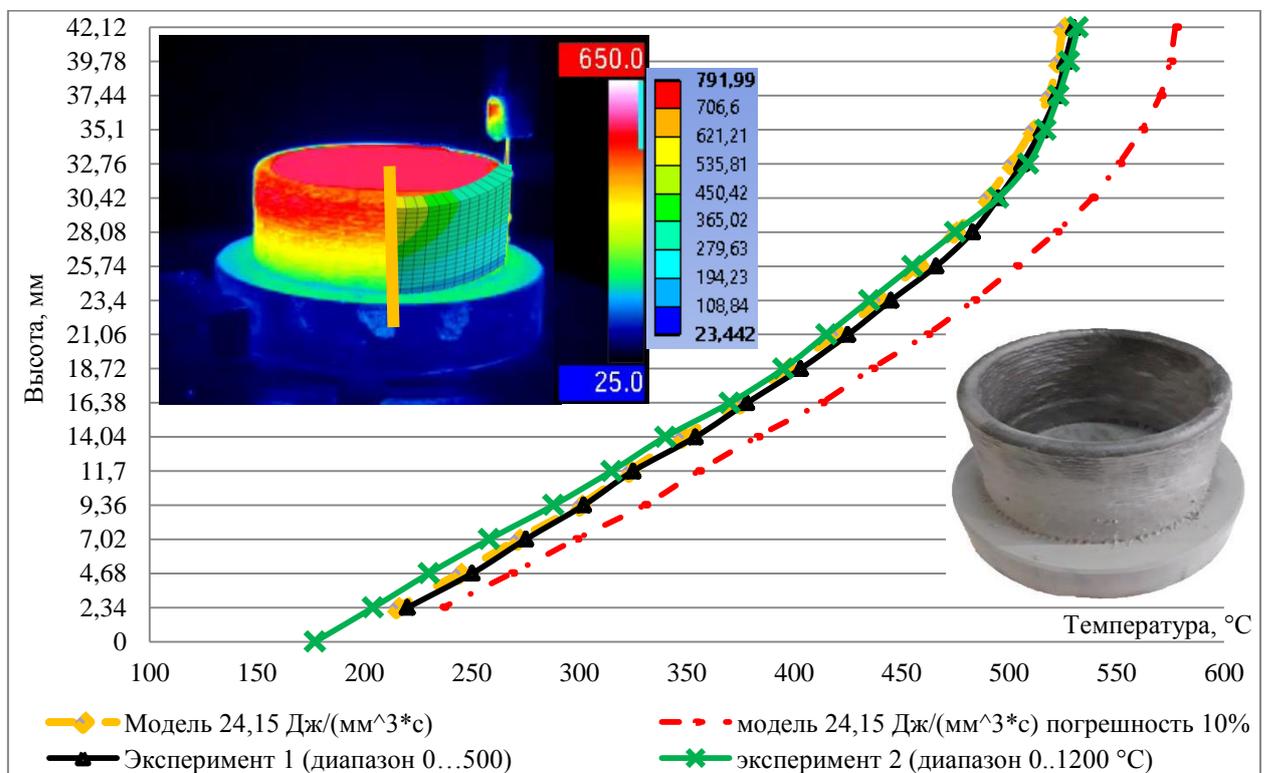


Рисунок 3 – Оценка адекватности ДМТП по сечению внешней стороны оболочки после синтеза 18 слоев «оболочки» по сечению внешней стороны

Определена максимальная скорость охлаждения синтезируемого изделия «оболочка», соответствующая скорости охлаждения ванны расплава. Локализованы области синтезируемой детали, нагревающиеся выше температуры рекристаллизации и время существования таких температур.

Приведено обоснование выбора диапазона температур упрочняемой поверхности и стратегии ВТДУ при последовательной схеме обработки в зависимости от изменения температурных полей за время выполнения вспомогательных движений установки (отвода фидстока и подвода упрочняющего ролика): при выдержке в течение 10 секунд возможно упрочнение при 700...600 °С, 600...400 °С и 400...200 °С, при 20 секундах –

упрочнение возможно только при 500...400 °С и 400...200 °С. С учетом диапазона температур рекристаллизации установлен оптимальный диапазон ВТДУ синтезированного материала при температуре $t_{\text{упр}}$ 200...600°С.

Установлен вид связи распределения тепловых полей в общем виде при синтезе деталей длиной до 350 мм, описывающейся математическим законом вида $t = a \cdot \ln(L) + b$. Где t – температура наплавленного слоя на выбранном участке, °С, L – расстояние от фидстока до участка с требуемой температурой, мм. Значения коэффициентов приведены в таблице.

t	a	b
$t_{12 \text{ слой}}$	-398	2393
$t_{15 \text{ слой}}$	-397	2502,6
$t_{18 \text{ слой}}$	-441	2824,6

С вероятностью аппроксимации более 0,93 получены математические зависимости изменения температуры, рисунок 4, в наплавленном слое длиной до 500 мм.

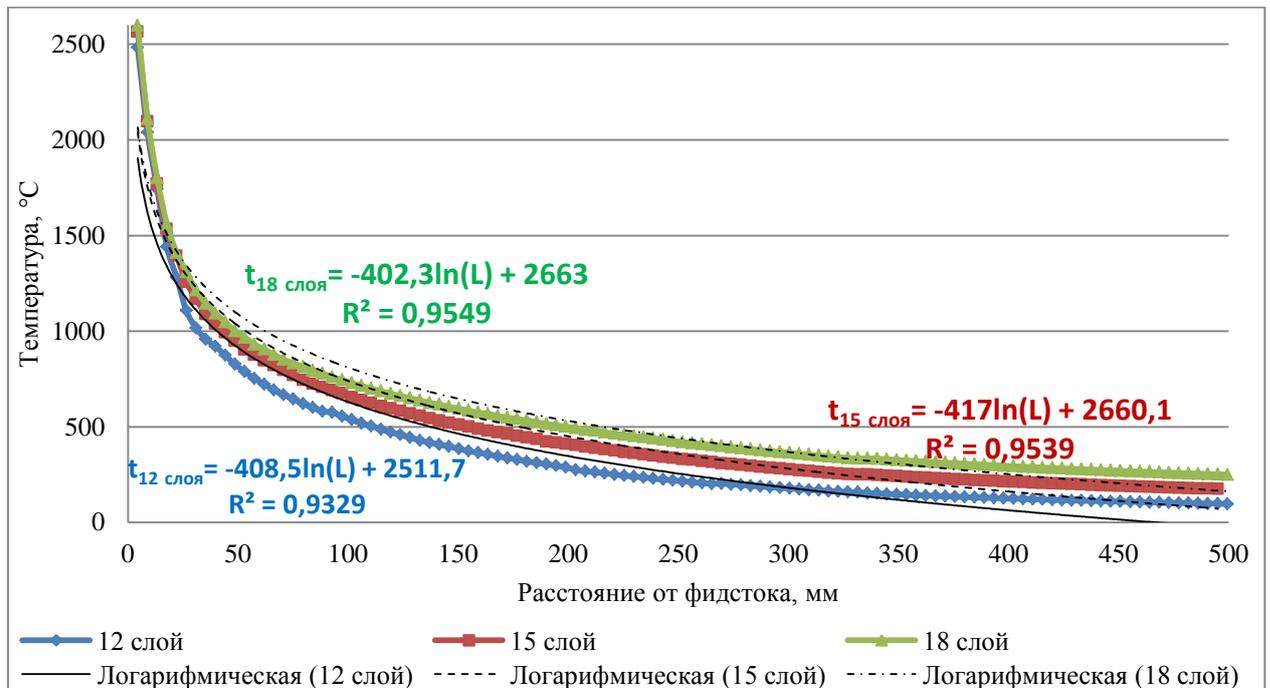


Рисунок 4 – Моделирование распределения тепла при синтезе 12, 15 и 18 слоев длинномерной детали длиной до 500 мм из стали хромо-никель-молибденовой группы

Исходя из приведенных зависимостей, определен оптимальный диапазон расстояний между фидстоком и упрочняющим индентором $L_{\text{упр}}$: при $t_{\text{упр}} = 200 \dots 400$ °С – 140...400 мм; при $t_{\text{упр}} = 400 \dots 600$ °С – 85...200 мм. С увеличением количества наплаваемых слоев принимается большее расстояние.

В пятой главе выявлены закономерности технологического наследования особенностей строения материала и свойств поверхностного слоя (твердость, микротвердость, пределы прочности и текучести), синтезируемой из проволоки 3DMP-методом детали, вызванных послойным и периодическим (через несколько слоев) волновым деформационным

упрочнением и приведены технологические рекомендации по повышению параметров качества поверхностного слоя ВТДУ деталей из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы, синтезированных из проволоки 3DMP-методом.

Проведены эксперименты по выявлению влияния ВТДУ в диапазонах температуры упрочняемой поверхности 600...200 °С и различных стратегий упрочнения на изменение микроструктуры синтезированных образцов в сравнении с микроструктурой неупрочненных синтезированных образцов. Выявлены закономерности технологической наследственности, проявляющиеся через микроструктуру (размер и расположение частиц в слоях) и влияющие на механические свойства материала.

При синтезе детали из проволоки 3DMP-методом исследовались технологические стратегии реализации ВТДУ: послойная – с послойным ВТДУ, периодическая – с периодическим ВТДУ.

Микроструктура сечения, перпендикулярного оси вращения неупрочненного образца из сплава ЭИ868 имеет дендритное строение, рисунок 5, дендриты значительной протяженности (более 800 мкм), неравномерно распределенные по матрице материала. Под действием ВТДУ мелкодисперсные частицы длиной 8...25 мкм равномерно перераспределены по матрице материала. Т.о. ВТДУ способствует уменьшению размера частиц более чем в 10 раз.

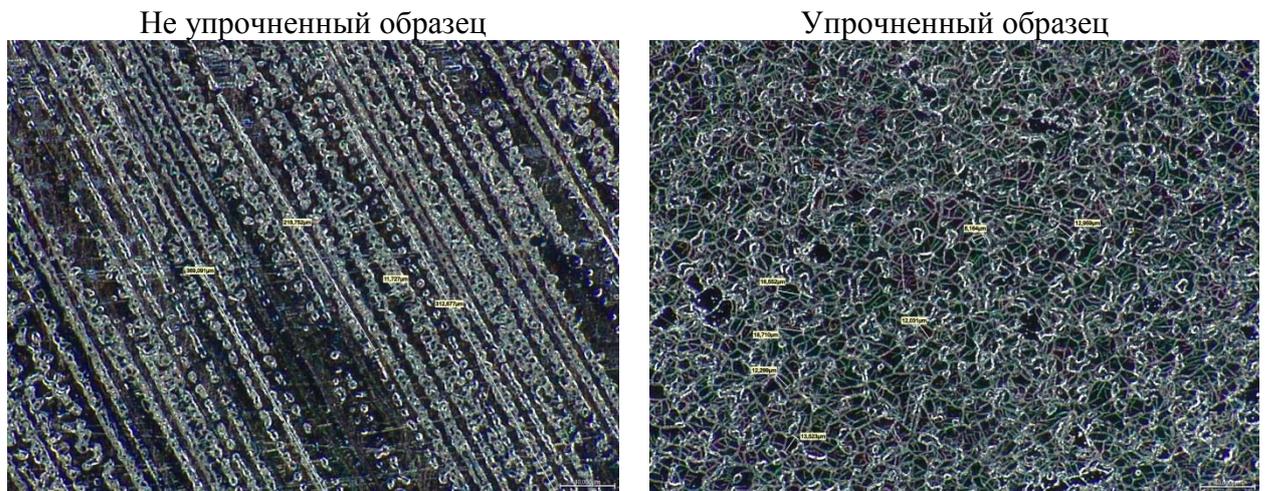


Рисунок 5 – Микроструктура синтезированного образца из проволоки марки ЭИ868 в сечении, перпендикулярном оси вращения образца, x1000

Исследования влияния послойного ВТДУ на микроструктуру детали, синтезированной из хромо-никель-молибденовой проволоки 309LSi, доказали благотворное действие обработки для создания более мелкодисперсной структуры за счет дробления столбчатых кристаллитов значительной протяженности (более 2100 мкм) и формирования колоний частиц длиной 250...40 мкм и диффундирующих частиц размером до 10...15 мкм, рисунок 6. Структура подповерхностного слоя на глубине до 700...1000 мкм представляет собой равномерно распределенные мелкодисперсные частицы размером до 30 мкм. Замечено, что по мере углубления слоев степень диффузии частиц в матрицу материала повышается, способствуя

уменьшению длины колоний частиц. Это объясняется различной кратностью воздействия на слои: на 9 слой оказывается воздействие при упрочнении 9 и 10 слоев (т.е. 2 раза), на 6 слой – при упрочнении 6...10 слоев (т.е. 5 раз). Структура послойно упрочненных слоев комбинированная: в верхней части образца присутствуют колонии частиц, в нижней (около 1/3 слоя) – мелкодисперсные частицы, равномерно распределенные по матрице материала.

Для упрочненных согласно периодической стратегии синтезированных из проволоки 309LSi образцов из стали хромо-никель-молибденовой группы структура слоев идентична верхней части послойно упрочненных образцов. Длина колоний частиц дендритов уменьшается по мере углубления слоя, так в 9 слое длина составляет 160...280 мкм, в 6 слое – 80...140 мкм.

Независимо от стратегии ВТДУ в отличие от не упрочненных образцов с транскристаллитной грубой дендритной структурой, упрочненные образцы из стали 309 LSi во всех слоях имеют мелкодисперсную микроструктуру раздробленных дендритов, с более чем в 8...10 раз меньшим характерным размером фазовых частиц.

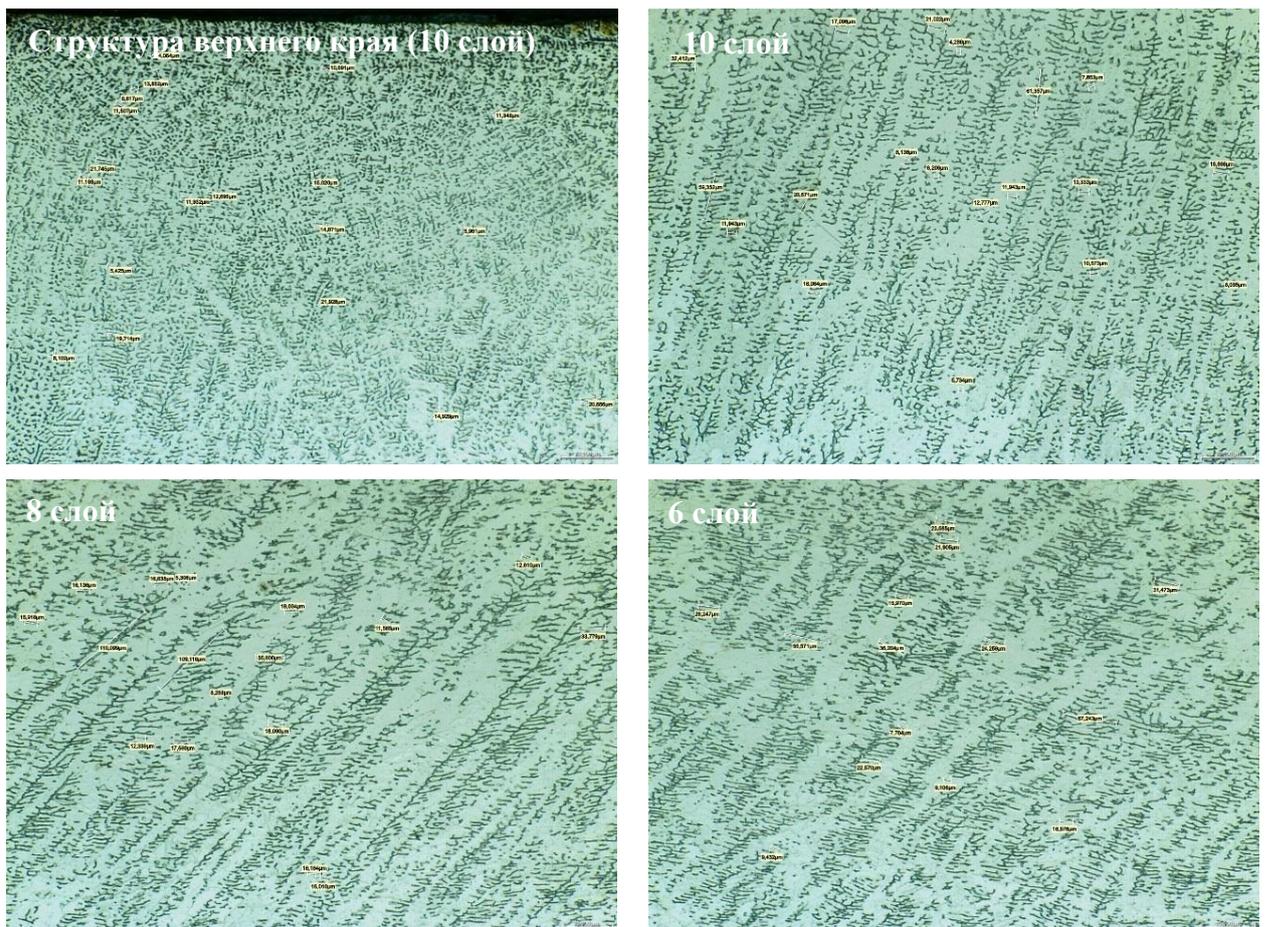


Рисунок 6 – Микроструктура верхней части слоев с послойным ВТДУ синтезированного из проволоки образца из стали 309LSi хромо-никель-молибденовой группы, х600

Измерение микротвердости для синтезированных из проволоки 309LSi образцов проводилось по методу Виккерса с нагрузкой на индентор 1 кг. Согласно графику распределения микротвердости по сечению образцов,

рисунок 7, все упрочненные образцы имеют микротвердость в 1,5 раза больше исходного неупрочненного образца. Для всех упрочненных образцов, независимо от стратегии упрочнения, характерно равномерное распределение микротвердости по сечению образца от максимальных значений на верхних слоях на глубине 0...5 мм, с плавным понижением к более глубинным слоям. На глубине более 5...5,7 мм происходит понижение до значений микротвердости, в минимум 1,3 раза превышающий микротвердость неупрочненного образца.

Сравнение графиков образцов, упрочненных по периодической стратегии (с упрочнением 5 и 10 слоев и только 10 слоя) показало незначительную разницу (до 3%) величин микротвердости на глубине 0...5 мм. Глубже 5 мм прирост микротвердости образца с периодичностью упрочнения 5 слоев составляет 6...15%, что доказывает эффективность применения стратегии упрочнения с чередованием нескольких слоев. В целях достижения наибольшей производительности комбинированного процесса при обеспечении высоких параметров качества поверхностного слоя необходимо и достаточно проводить ВТДУ каждого второго-пятого слоя.

Измерение микротвердости для синтезированных из проволоки ЭИ868 образцов проводилось по методу Виккерса с нагрузкой на индентор 10 кг. Применение ВТДУ, по сравнению с неупрочненными образцами, синтезированными из проволоки из хромо-никелевого сплава ЭИ868 позволило повысить механические свойства: твердость в 2,5 раза, предел прочности в 1,5 раза, предел текучести в 2 раза, при уменьшении относительного удлинения в 3 раза и сохранении ударной вязкости на достаточно высоком уровне, рисунок 8.

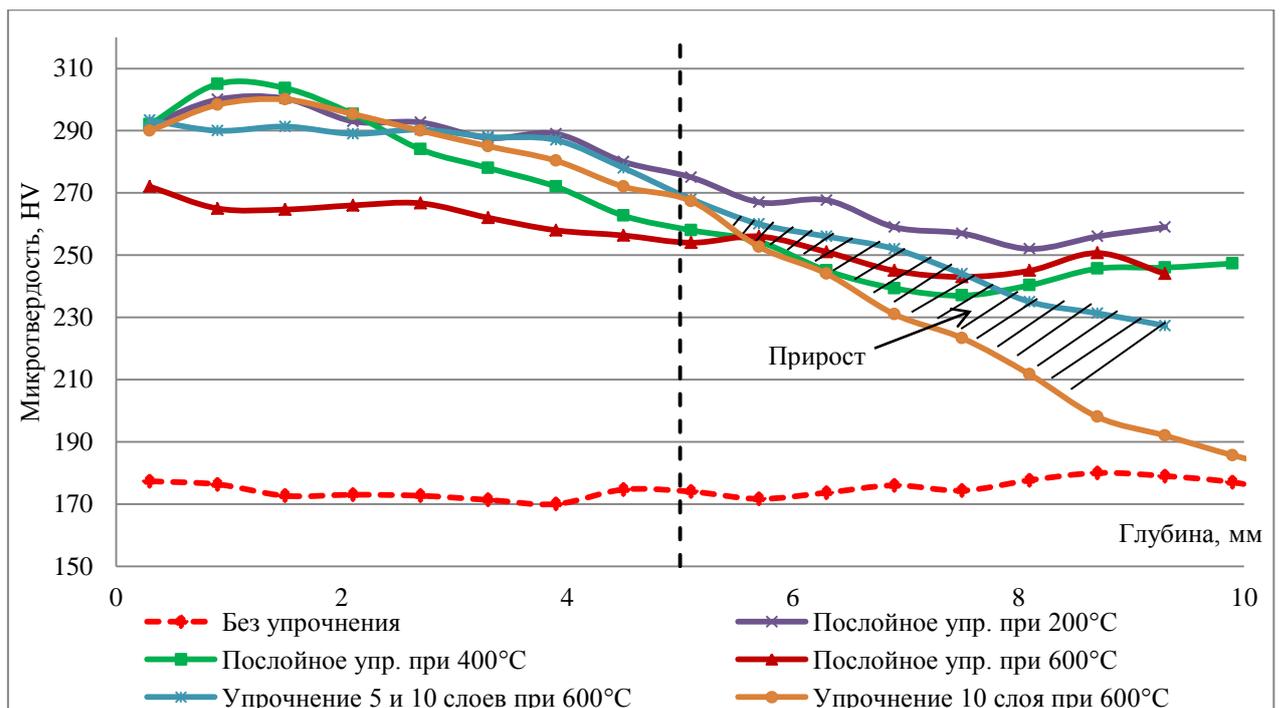


Рисунок 7 – Графики микротвердости неупрочненного и упрочненных образцов из стали 309LSi хромо-никель-молибденовой группы

С целью определения оптимальных технологических режимов ВТДУ проведен эксперимент по выявлению математической зависимости размеров отпечатков d от температуры упрочняемой поверхности $t_{упр}$ в расширенном диапазоне 20...900 °С:

$$d = -2e - 13t_{упр}^5 + 3e - 10t_{упр}^4 - 2e - 7t_{упр}^3 + 7e - 5t_{упр}^2 - 0,001t_{упр} + 8,0014$$

и рассматриваемом в работе диапазоне упрочнения 200...600 °С:

$$d = 6,56 t_{упр}^{0,06}$$

Тогда, основные закономерности для определения технологических режимов ВДУ, адаптированные под ВТДУ, их влияния на глубину упрочнения поверхностного слоя имеют вид:

$$h = \frac{2,75}{\sqrt{\pi ab}} \sqrt{\frac{2\phi AR_{пр}}{НДn_d}} = \frac{3,93}{\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{At_{упр}^{0,06}}{НДn_d}}$$

где: a и b – большая и малая полуось эллипса образованного в контакте инструмента и упрочняемой поверхности, мм; n_d – динамический коэффициент пластической твердости; ϕ – коэффициент, $\phi = 0,92...0,98$ (для более твердых материалов выбирается меньшее значение); $R_{пр}$ – приведенный радиус кривизны контакта инструмента и нагружаемой поверхности, мм; $НД$ – пластическая твердость упрочняемого материала, МПа.

Полученные зависимости $d=f(t_{упр})$ имеют величину достоверности более 0,99, что позволяет скорректировать ключевой параметр d и рассчитать наиболее благоприятные технологические режимы для ВТДУ по методике расчета режимов ВДУ: при толщине наплавляемого слоя 1...2,5 мм энергия удара $E = 60...120$ Дж, коэффициент перекрытия отпечатков $K = 0,3...0,5$; при толщине наплавляемого слоя 2,5...5 мм – $E = 80...150$ Дж, $K = 0,4...0,8$.

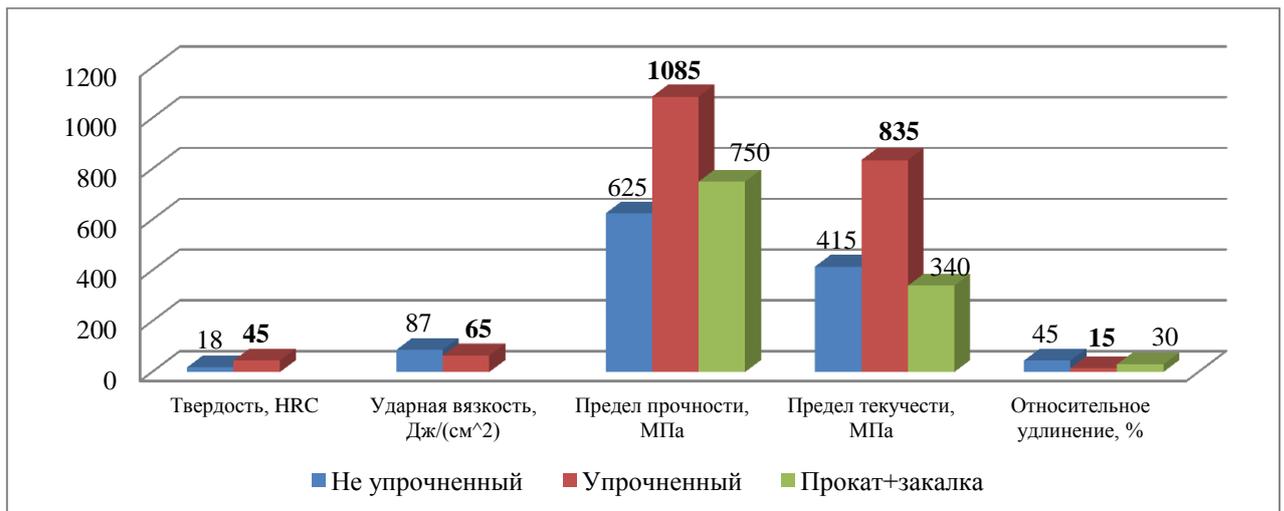


Рисунок 8 – Изменение механических свойств синтезированных из хромо-никелевого сплава ЭИ868 после ВТДУ

Исходя из предложенной в 3 главе модели типа «черный ящик», полученных экспериментальных данных по исследованию влияния ВТДУ на

твердость синтезированных образцов из проволоки Cr-Ni и Cr-Ni-Mo групп, предлагается регрессионная математическая модель, описывающая закономерность изменения величины микротвердости поверхностного слоя в зависимости от входных технологических параметров упрочнения:

$$HV = 0,06t_{ynp} + 25,04K + 0,38E - 0,85 h_{ynp} - 0,06t_{ynp} K + 237,17$$

Оценка адекватности полученных данных проводилась по критерию Фишера: $F_{расч} = 1,678$ меньше $F_{крит} = 2,54$ (при уровне значимости 5%).

Разработаны технологические рекомендации по назначению рациональных режимов ВТДУ в процессе синтеза деталей из проволоки Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы в зависимости от предъявляемых требований по качеству.

Технологические рекомендации для повышения качества синтезированных из проволоки деталей ВТДУ

	Требования к HV, h _{ynp}				
	Низкие: 180...220 HV; до 5 мм	Умеренные: 220...260 HV; 5...7 мм		Повышенные: 260...300 HV; 8...10 мм	Высокие: 300...450 HV; 10 и более, мм
Количество проходов	1	1		1	верхний слой – 2 нижележащие – 1
Периодичность	верхний слой	верхний слой	$\frac{5 \text{ слоев}}{3 \text{ слоя}}$	$\frac{\text{не более 4 слоев}}{\text{не более 3 слоев}}$	$\frac{\text{не более 3 слоев}}{\text{не более 2 слоев}}$
t _{ynp} , °C	200...400	400...600		200...400	верхний слой: 1 проход – 600...800 2 проход – 200...400 нижележащие слои: 200...400
K	$\frac{0,3}{0,4}$	$\frac{0,3 \dots 0,5}{0,4 \dots 0,6}$		$\frac{0,4 \dots 0,5}{0,6 \dots 0,8}$	$\frac{0,4 \dots 0,5}{0,6 \dots 0,8}$
E, Дж	$\frac{60 \dots 70}{80 \dots 90}$	$\frac{100 \dots 120}{120 \dots 150}$		$\frac{90 \dots 120}{100 \dots 150}$	$\frac{90 \dots 120}{100 \dots 150}$

Примечание: в числителе технологические режимы ВТДУ для толщины наплавляемого слоя 1...2,5 мм; в знаменателе – 2,5...5 мм.

Заключение.

Работа содержит комплекс технологических решений, направленных на повышение качества (твердости и прочности, улучшение микроструктуры) синтезированных из проволоки деталей из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы, путем разработки новой технологии волнового термомеханического упрочнения (ВТДУ). Получены следующие основные выводы, научные и практические результаты:

1. Разработана феноменологическая модель и модель типа «черный ящик» технологического процесса, включающего 3DMP-синтез, упрочнение волной деформации и механическую обработку резанием, выявлены наиболее значимые технологические факторы, оказывающие определяющее влияние на параметры качества поверхностного слоя детали: удельная энергия удара при волновом деформирующем воздействии, коэффициент

перекрытия пластических отпечатков, толщина наплавляемого слоя, температура упрочняемого металла.

2. На примере детали типа «оболочка» разработана конечно-элементная динамическая модель формирования температурных полей при синтезе детали из проволоки 3DMP-методом, выявлены закономерности нагрева и охлаждения отдельных синтезируемых слоев и детали в целом. Установлено, что температурный баланс наступает после наплавки 5...6 слоев синтезируемой детали.

3. Установлено, что для достижения наибольшей производительности комбинированного процесса при обеспечении высоких параметров качества поверхностного слоя необходимо и достаточно проводить ВТДУ каждого второго-пятого слоя синтезированного материала при температуре 200...600°C, а энергетическая интенсивность наплавки 3DMP-методом не должна превышать 1970 Дж или 24,15 Дж/(мм³·с).

4. Разработаны варианты технологической стратегии реализации ВТДУ при синтезе детали из проволоки 3DMP-методом: послойная – с послойным ВТДУ, и периодическая – с периодическим ВТДУ; параллельная – с одновременно-согласованной работой проволочного фидстока и деформирующего инструмента (индентора) в одном технологическом переходе, и последовательная – с независимой работой проволочного фидстока и деформирующего инструмента в различных технологических переходах.

5. Установлено, что при параллельной работе фидстока и индентора расстояние между ними должно составлять 140...400 мм при упрочнении поверхностного слоя при 200...400 °С, а вспомогательное время, затрачиваемое на холостые ходы исполнительных органов станка и смену инструмента при последовательной работе фидстока и индентора не должно превышать 0,17...0,33 мин.

6. Адаптированы для ВТДУ и уточнены известные формулы для определения режимов волнового деформационного упрочнения в части установления вида связи между температурой ВТДУ и характерным размером отпечатка на обрабатываемой поверхности: $(d = 6,56 * t^{0,06})$.

7. Установлена связь технологических факторов и стратегии реализации ВТДУ с микроструктурой, твердостью и прочностью упрочненного материала, рекомендованы рациональные диапазоны варьирования технологических факторов ВТДУ: при толщине наплавляемого слоя 1...2,5 мм – $E = 60...120$ Дж, $K=0,3...0,5$; при толщине наплавляемого слоя 2,5...5 мм – $E = 80...150$ Дж, $K=0,4...0,8$.

8. Выявлены закономерности технологического наследования особенностей строения и свойств поверхностного слоя, зависящие от степени и температуры деформации при ВТДУ. В отличие от неупрочненных образцов с транскристаллитной грубой дендритной структурой, образцы после ВТДУ во всех слоях имеют мелкодисперсную микроструктуру раздробленных дендритов, с более чем в 8...10 раз меньшим характерным

размером фазовых частиц, зависящих от условий ВТДУ и меняющихся в диапазоне от 10-70 мкм (частицы) до 140-280 мкм (колонии частиц).

9. Установлено, что в зависимости от принятой стратегии и режимов ВТДУ, формируется упрочненная структура, степень упрочнения возрастает в 1,6...1,9 раз, по сравнению с синтезированной без ВТДУ из проволоки марки 309LSi детали, а глубина упрочнения достигает 10 мм.

10. Установлено, что в отличие от неупрочненных, синтезированные с применением ВТДУ образцы из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы (ESAB ОК Autrod 309LSi, ЭИ868 и др.) имеют более высокие механические свойства: твердость - в 2,5...2,6 раза, предел текучести - в 2...2,2 раза, предел прочности - в 1,5...1,7 раза, что существенно (в 1,4...2,5 раза) превышает аналогичные свойства проката из материала той же марки.

11. Разработаны технология ВТДУ и технологические рекомендации по стратегии реализации и назначению режимов ВТДУ, исходя из условия обеспечения заданных параметров качества синтезированных из проволоки деталей из сталей и сплавов Cr-Ni и Cr-Ni-Mo группы, а также формы и размеров синтезируемой детали.

12. Выполнена апробация разработанной технологии ВТДУ, работа принята к внедрению на ФГУП «НПО ТЕХНОМАШ им. С.А. Афанасьева» с ожидаемым экономическим эффектом более 1 000 000 рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных списком ВАК:

1. Киричек А.В. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков, О.Н. Федонин, **С.О. Федонина**, А.В. Хандожко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (52). – С. 151-160.

2. Киричек А.В. Технологическое обеспечение параметров несущего слоя деформационным и комбинированным упрочнением [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.В. Хандожко, **С.О. Федонина** // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – №10 (88). – С. 43-48.

3. Киричек А.В. Технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств упрочнением волной деформации [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, **С.О. Федонина** // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Том 22, №12 (143). – С. 46-55.

4. Киричек А.В. Влияние процесса упрочнения волной деформации на микроструктуру материала [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, **С.О. Федонина** // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 4 (94). – С. 13-17.

5. Федонина С.О. Механическая обработка резанием деформационно упрочненных наплавленных высоколегированных сплавов [Текст] / **С.О. Федонина**, А.В. Киричек, Б.Я. Мокрицкий, А.И. Еруков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – №10 (178). – С. 4488-450

6. Киричек А.В. Проявление технологической наследственности при исследовании твердости деформационно-термически упрочненных сталей [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, **С.О. Федонина** // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 8 (98). – С. 25-28.

Статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

7. Kirichek A.V. Problems of Analyzing Microstructure Images in Assessing the Impact of Technological Parameters of Combined Strain Wave Hardening on the Quality of the Surface Layer [Text] / Kirichek A.V., Soloviev D.L., Khandozhko, A.V., **Fedonina S.O.** // CEUR Workshop Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2019), Vol. 2485, pp. 261-264.

8. Kirichek A.V. Expanding Technological Capabilities of The Combined Hardening of Steel by Deformation [Text] / Kirichek A.V., Fedonin O.N., Soloviev D.L., **Fedonina S.O.** // X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019). MATEC Web of Conferences, Vol. 297, 05004 pp. 6 (2019) (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705004>).

9. Kirichek A.V. Finite Element Modeling and Visualization of additive ring growing by 3DMP method [Text] / Kirichek A.V., Barinov S.V., **Fedonina S.O.** // CEUR Workshop Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2019), Vol. 2744, pp.

Публикации в материалах конференций:

10. Киричек А.В. Исследование влияния параметров упрочнения на структурные составляющие материала [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.В. Хандожко, С.А. Силантьев, С.О. Федонина, В.А. Маслюков, А.С. Шмат // Научно-технические материалы международного симпозиума технологов-машиностроителей. - Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2018г. – С. 277-282.

11. Киричек А.В. Влияние комбинированного упрочнения на изменения микроструктуры материала [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, А.В. Хандожко, **С.О. Федонина** // Сб. тр. «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий» науч. семинара памяти А.П. Бабичева. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. - С.58-61

12. Киричек А.В. Выбор концевых фрез для обработки наплавленно-нагартованных материалов [Текст] / А.В. Киричек, Б.Я. Мокрицкий, А.В. Морозова, Е.Б. Мокрицкая, **С.О. Федонина** // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники, международная научно-техническая конференция, материалы международной научно-технической конференции. – Брянск: БГТУ, 2020. – с. 147-154.

Подписано в печать 18.02.2021. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Офсетная печать.

Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 49. Бесплатно

Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
Лаборатория оперативной печати БГТУ, ул. Институтская, 16