

На правах рукописи



Ненахов Николай Николаевич

**Технология комбинированного электромагнитного импульсного
восстановления эксплуатационных характеристик
высоконагруженных изделий**

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель **Смоленцев Владислав Павлович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лукина Светлана Валентиновна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
кафедра экономики и управления
предприятием, профессор

Козлов Андрей Александрович,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», кафедра
технологии машиностроения, доцент

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Брянский государственный
технический университет», г. Брянск

Защита состоится 9 октября 2024 г. в 12⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <http://www.cchgeu.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Автореферат разослан «03» июня 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических
наук, доцент



Мандрыкин Андрей
Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы работы.

Регулирование внутренних напряжений высоконагруженных деталей, определяющих качество и надежность изделий в условиях их эксплуатации в основном для перспективных объектов современной техники, осуществляется послойным выравниванием внутренних напряжений и нанесением покрытий, обладающих или создающих требуемые эксплуатационные характеристики у изделий.

Работа учитывает запросы авиакосмической и других отраслей машиностроения при выполнении государственных программ. Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась в рамках федеральной космической программы России на 2016-2025 годы под шифром «Феникс», утвержденной в уточненном варианте постановлением Правительства РФ от 09.12.2017 года № 1513.

Степень разработанности темы

Анализ доступных публикаций отечественных и зарубежных ученых и специалистов показывает, что научные достижения и опыт использования результатов научных школ Брянска, Орла, Курска, Воронежа, Казани, Москвы, Самары, С-Петербурга, Тулы, Уфы, Перми, Новосибирска, Ростова и других городов России, ведущих фирм Китая, Японии, США, Болгарии, Швеции, Германии, Франции создают научную базу для развития направления по технологии комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий в направлении совершенствования технологии изготовления перспективной авиакосмической техники.

Цель и задачи выполняемой работы

Целью работы является расширение области использования аддитивных технологий на управление комбинированными процессами с использованием электромагнитных воздействий послойным выравниванием внутренних напряжений высоконагруженных деталей, работающих в условиях импульсных нагрузений.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи, включающие:

1. Технологические методы восстановления качества изделий путем управления системой остаточных напряжений высоконагруженных деталей.
2. Аддитивное управление величиной и знаком внутренних напряжений импульсными воздействиями электромагнитных полей и комбинированным нанесением покрытий.
3. Разработку комбинированных процессов подготовки поверхности объектов обработки под технологию выравнивания внутренних напряжений высоконагруженных деталей с различной геометрией.
4. Проектирование комбинированных методов обработки с обоснованием выбора воздействий, нивелирующих остаточные напряжения в поверхностном слое материала после предшествующих технологических операций.
5. Разработку путей стабилизации сборных конструкций импульсными электромагнитными полями и комбинированным нанесением покрытий.

Объекты исследований.

Изделия авиакосмической техники с высоким уровнем производственной технологичности высоконагруженных деталей, работающие в условиях импульсных воздействий, а также востребованная отечественная продукция, выделенная в Государственных программах для их импортозамещения с использованием достижений ведущих отраслей машиностроения.

Предмет исследований:

Аддитивные технологии для управления послойным выравниванием внутренних напряжений с использованием комбинированных методов подготовки базовых слоев

заготовок и нанесения покрытий, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики изделий

Область исследований.

Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.5.5: п. 2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий»; п. 4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки»; п. 7 «Новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации».

Способы исследований, обоснованность, достоверность результатов.

Теоретические и прикладные исследования технологии комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик объектов исследований выполнялись с использованием современной аттестованной научной, в том числе вычислительной, базы, а также оригинальной, разработанной авторами по собственным патентам, экспериментальной и опытно-промышленной техники при многократном (не ниже критерия оценки по Стьюденту) дублировании результатов. Оценка достоверности проводилась по степени сходимости с исследованиями других ученых, а также данными о производстве объектов при запуске изделий в серийное производство.

Научная новизна включает:

1. Установление закономерностей взаимного комбинированного импульсного электромагнитного воздействия на крупногабаритные напряженные материалы для выравнивания поверхностных и внутренних напряжений до исключения деформации изделий.
2. Разработку аддитивных методов и средств технологического оснащения для управления динамикой комбинированного импульсного электромагнитного воздействия.
3. Изучение процессов взаимодействия накладываемых импульсов на распределение внутренних напряжений, вызывающих деформацию и разрушение крупногабаритных деталей.

Вклад в технологическую науку.

В классической литературе понятие «аддитивный метод» определяется как возможность создания цельного объекта, равного сумме величин, соответствующих его частям при всех способах разделения объекта. Применительно к аддитивным технологиям в машиностроении это можно трактовать как получение геометрических размеров и формы детали путем наращивания слоев в единую конструкцию с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Проведенные ранее и реализованные в работе исследования показывают, что принятое понятие «наращивание слоев при изготовлении детали» не способно в полной мере охватить достигнутые технологические возможности аддитивных технологий, ограниченные только послойным увеличением геометрических размеров объекта производства, а должно еще включать процесс послойного взаимосвязанного изменения физических параметров без изменения геометрии объекта путем, например, изменения (и не только наращивания, в частности, покрытий) внутренних напряжений уже сформированного объекта за счет управляемого выравнивания этих параметров электромагнитным или другим лучевым воздействием. На современном этапе развития науки по комбинированным методам обработки требуется расширить термин «аддитивные технологии», где вместо понятия

«аддитивное изготовление деталей путем наращивания слоев» использовать словосочетание «изменение размеров и (или) физических свойств изделий, определяющих эксплуатационные свойства объектов», к которым, применительно к машиностроению, можно отнести исследуемые воздействия комбинированных методов обработки с наложением механических, тепловых, химических, лучевых и, возможно, ядерных процессов. Рассматриваемое в работе применение электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий осуществляется без использования термических операций и сложного, энергозатратного оборудования за счет выполнения аналогичных действий путем управляемых электромагнитных воздействий, для чего в рамках решенной задачи 2 в работе создана оригинальная теория управления взаимным влиянием на качество изделий различных воздействий с использованием электромагнитных полей, что позволило снять ограничения по размерам деталей, комплексов и расширить зону эффективного использования комбинированных методов обработки. В приведенных материалах разработаны и научно обоснованы новые закономерности комбинированного воздействия импульсного электромагнитного поля на динамику перераспределения остаточных напряжений и снижение деформаций \ при управляемых внешних воздействиях. Разработаны и научно обоснованы новые закономерности комбинированного импульсного электромагнитного поля на динамику перераспределения остаточных напряжений и снижение деформаций при управляемых внешних лучевых воздействиях.

Практические результаты работы.

Создание методических материалов по проектированию и применению комбинированных технологических процессов и средств технологического оснащения с управляемым воздействием на объект обработки импульсного электромагнитного поля и обеспечение заданного качества и уровня работоспособности силовых крупногабаритных деталей.

Личный вклад соискателя в выполнение работы. Личное участие при решении поставленных задач и достижения требуемых научных результатов, способствующих развитию технологической науки.

Научное обоснование механизма комбинированного электромагнитного импульсного воздействия для восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий.

Создание новых, на уровне изобретений, способов, устройств и технологических методов восстановления качества изделий путем управления системой остаточных напряжений высоконагруженных деталей.

Научное обоснование и проектирование комбинированных методов обработки, технологических режимов с обоснованием выбора воздействий, нивелирующих остаточные напряжения в поверхностном слое материала после предшествующих технологических операций для формирования путей стабилизации геометрии сборных конструкций импульсными электромагнитными полями и комбинированным нанесением покрытий для деталей сложной геометрической формы типа, приведенных в работе титановых баллонов больших габаритов и толщины стенки, что ранее в доступной литературе не рассматривалось.

Реализация и внедрение результатов работы. Материалы прошли проверку в цехах «ВМЗ» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» (г. Воронеж), доказали свою достоверность и приняты к производству ракетных двигателей в АО КБХА с реальным экономическим эффектом. Результаты работы использованы при создании двигателей новых поколений на предприятиях Роскосмоса и в станкостроении страны. Основные положения

теоретических и прикладных разработок переданы для использования с поставляемым оборудованием в КНР.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и отраслевых научно-технических конференциях: 5-th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2019), (Сочи, 2019); X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019), (Кемерово, Шерегеш, 2019); X Международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы» (Казань, 2019); XI Международной научно-научно технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (Калининград, 2019); XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении» (Тамбов, 2020); конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021) (Севастополь, 2021); 14 Международной научно-практической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянск, 2022); International Scientific Conference "Scientific research of the sco countries: synergy and integration" Пекин, Китай – 9 декабря 2023 г.; XIV Международной научно-практической конференции 26 ноября - 2 декабря 2023, – Кемерово: КузГТУ, 2023;. 15-й МНТК "Наукоёмкие технологии в машиностроении," , Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках конгресса «Русский инженер» 1-3 ноября 2023.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ. В их числе: коллективная монография; 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 патента РФ; 3 – в зарубежных научных источниках, рецензируемых в базе «Scopus»; 4 публикации в научных сборниках и материалах конференций, где соискателю принадлежат: постановка, развитие научной проблемы, механизм протекания процессов импульсного электромагнитного воздействия и реализация результатов в авиакосмической отрасли и в машиностроении. В работах, изданных в соавторстве, все авторы в равной степени принимали участие в проведении исследований по теме работы.

Структура и объем работы. Работа включает введение, 5 глав, заключение, список литературы из 130 наименований, 3 приложения. Материал изложен на 124 страницах с 3 таблицами, 30 рисунками.

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, показаны цель и задачи исследования. приведена научная новизна и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы, раскрыт личный вклад соискателя в выполнение и реализацию результатов исследований.

В первой главе выполнен анализ доступных отечественных и зарубежных публикаций и опыта использования лучевых технологических систем в авиакосмической и других отраслях машиностроения. приведен анализ методов магнитной импульсной обработки с учетом возможности стабилизации геометрии и крупных размеров заготовок.

Было рассмотрено состояние исследований последних лет и успехи Российских научных школ Москвы, Санкт-Петербурга, Воронежа, Казани, Ростова-на-Дону, Рыбинска, Брянска, Перми, Кемерово и других городов, а также работы ученых США, Японии, Англии, Швеции, Китая, Белоруссии.

Анализ материалов главы 1 позволил установить, что использование в комбинированных методах электромагнитных импульсных воздействий дает возможность достичь поставленной в работе цели по восстановлению эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий.

При этом требуется решить задачи, базирующиеся на следующих положениях достоверно изученных в рассмотренных теоретических и прикладных исследованиях:

1. Анализ литературных источников и опыт изготовления крупногабаритного оборудования с индивидуальными требованиями показал, что имеющиеся сведения о влиянии различных видов стабилизирующей обработки на изменение в нужном направлении остаточных напряжений охватывают в основном изучение изделий, не захватывающих выпуска серийного оборудования и крупногабаритных деталей, и, как правило, ранее выполнялось только на предприятиях машиностроения, оснащенных требуемым термическим оборудованием для объектов различных габаритов, материалов и конструкции, после обработки на котором стабилизировались внутренние структуры материалов и обеспечивалась требуемая стабильность размеров изделий. Переход на новые виды продукции с различными габаритами требует перехода на комбинированные методы обработки с возможностью стабилизации внутренних напряжений на заключительной стадии изготовления изделий различной сложности и габаритов с управлением процессом выравнивания внутренних напряжений.

2. Механизм и процесс управления формированием внутренних напряжений в поверхностном слое при комбинированной импульсной обработке имеет много общего с теоретическими положениями для проектирования технологий с использованием электромагнитной обработки, применяемой в машиностроении и рассмотренной в состоянии вопроса, и такой материал востребован для проектирования изделий с управляемой стабилизацией характеристик поверхностного слоя, гарантирующей получение заданной стабильности геометрических форм крупногабаритных деталей в течение периода их изготовления и эксплуатации в изделиях.

3. Требуется разработка технических требований для выпуска оборудования, обеспечивающего стабилизацию внутренних напряжений изделий любой формы и габаритов без термической обработки объектов производства.

4. Анализ имеющегося состояния вопроса позволяет сформулировать цель и задачи исследований, приведенные во введении.

Во второй главе рассмотрены технологические методы и пути решения поставленных задач для достижения цели работы.

Приведены высоконагруженные изделия авиакосмического машиностроения.

Баллоны из титановых сплавов на рис. 1 устанавливаются в баках для ракетных двигателей для создания в жидком топливе давления до 45-50 МПа, обеспечивающим его подачу в зону горения.

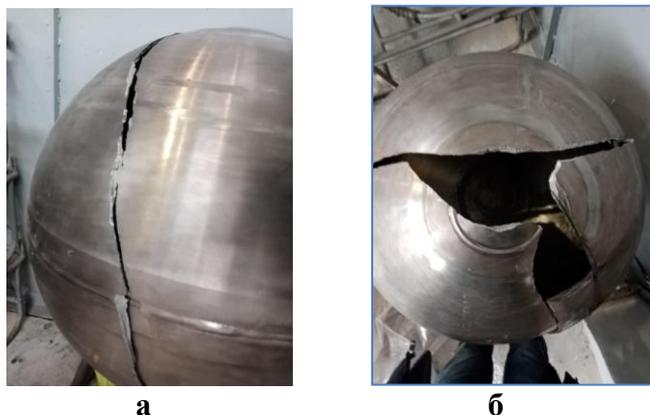


Рис.1 – Разрушение при испытаниях баллонов высокого давления

- а – трещинообразование в направлении перпендикулярном к сварному шву;
- б – разрушение баллона при импульсном воздействии внутреннего давления

В результате выравнивания внутренних напряжений были получены цилиндрические и шаровидные баллоны различных габаритов с ресурсом, обеспечивающим их надежную эксплуатацию в создаваемых изделиях.

На базе анализа в главе 1 проведенных исследований сформулированы научные гипотезы, включающие следующие положения:

1. Возможность совмещения в едином комбинированном процессе действия электромагнитных полей с механическим, тепловым и другими воздействиями.

2. Обоснованность создания устойчивых методов и процессов управления силами, изменяющими внутренние напряжения, особенно в сборных конструкциях, до выравнивания их величины в пределах, не вызывающих дополнительную деформацию объектов до границ разрушения конструкции.

3. Целесообразность использования при проектировании комбинированных процессов с наложением полей теоретических положений аддитивных технологий с адаптацией к напряжениям в подповерхностных слоях высоконагруженных изделий в процессе выравнивания и перераспределения внутренних сил.

4. Специфика использования аддитивных технологий для управления электромагнитными полями, которая заключается в выравнивании между слоями по глубине остаточных напряжений без изменения геометрических размеров и формы деталей.

5. Требуется научно обоснованное применение в перспективных конструкциях покрытий, имеющих эксплуатационные показатели не ниже требуемых для силовых деталей изделия, где значительные достоинства имеют гальваномеханические поверхностные слои с высокими критериями оценки технологичности с учетом расширения зоны обработки крупногабаритных изделий.

Материальная база для решения поставленных задач базируется на имеющихся на предприятии установках со средствами технологического оснащения, приведенных в состоянии вопроса. и созданного экспериментального оборудования, часть которого показана в патентах, полученных с участием соискателя.

Выполнен анализ применяемых в промышленности и использованных в работе видов серийных и созданных соискателем средств для выполнения достоверных экспериментальных исследований комбинированных методов обработки высоконагруженных крупногабаритных деталей и сборочных единиц.

Проведен анализ и рассмотрены перспективы применения известных способов комбинированной обработки, что является базой для создания новых способов и устройств для формирования теоретических основ новых технологических процессов с научно обоснованным использованием покрытий управляемыми электромагнитными воздействиями.

Разработаны направления действий по проектированию технологических процессов для восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий с учетом требований технологичности для перспективных изделий.

Разработан алгоритм проведения исследований для достижения поставленной цели, в котором обоснована последовательность выполнения работ, создана база для проведения теоретических, экспериментальных работ и использования результатов в промышленности.

В главе 3 приведен механизм протекания и управления процессом комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий.

В основу построения механизма положена физическая модель процесса, определяющая возможности управления электромагнитными воздействиями через установление закономерностей распределения магнитных силовых линий в индукторе, что дает возможность проектировать математические модели для расчета технологических режимов при проектировании электромагнитного импульсного процесса

Внутренние напряжения, вызываемые электромагнитными силами, возникающими в процессе импульсных воздействий, зависят от распределения магнитных силовых линий (рис.2), формируемых в межэлектродном зазоре разрядника в зависимости от условий работы индуктора, типовая конструкция которого приведена в главе 1 работы.

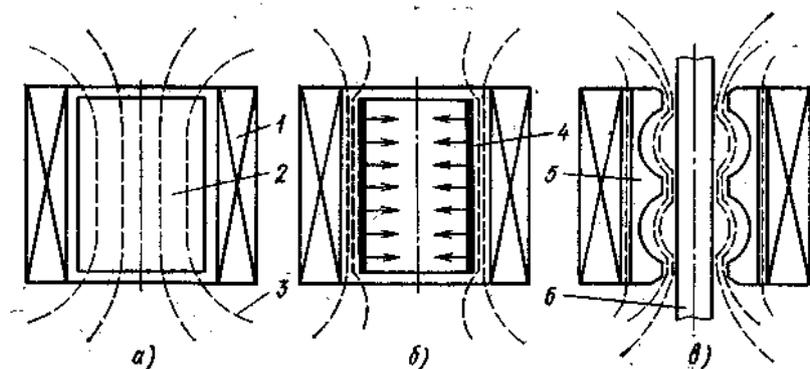


Рис. 2 – Распределение магнитных силовых линий в зависимости от условий работы индуктора

Для описания процесса образования электромагнитных воздействий и их взаимодействия с остаточными напряжениями в слоях заготовки используют схему на рис. 2, где индуктор 1 содержит (рис. 2,а) диэлектрический цилиндр 2, в котором образуются силовые линии 3, характеризующие плотность распределения в индукторе магнитного потока. От размещения линий зависят силы, определяющие внутренние напряжения в детали или сборном узле. В работе обоснован выбор минимально возможного без саморазряда расстояния между электродами, которое обеспечивает высокую плотность распределения силовых линий и определяет построение в цилиндре сильного магнитного поля, требуемого для выравнивания и стабилизации внутренних напряжений, в том числе между наносимыми слоями покрытий. При этом установлено, что энергия разряда пропорциональна квадрату интенсивности поля, а большая ее часть воздействует на площадь в пределах витка обмотки индуктора.

Если внутрь индуктора установлен металлический цилиндр 4 (см. рис. 2б), то на его поверхности возникают вихревые токи, которые усиливают поле в пространстве между индуктором и цилиндром, перераспределяют внутренние напряжения с нарастанием локальных воздействий, что может привести к деформации и разрушению детали или, в нашем случае, цилиндра.

Энергия электромагнитных воздействий, определяется как сумма механической энергии, определяемой внутренним давлением для рассматриваемых на рис.1 баллонов и магнитного поля, а также энергии, расходуемой на образование выделяющейся теплоты. При рабочих температурах эксплуатации магнитоэлектрических установок не существует металлов с идеальной проводимостью, сила давления после импульса не способна поддерживаться в течение длительного времени и магнитное поле, проходящее через металлический цилиндр, снижает скорость течения тока, которая зависит от электрического сопротивления металла детали или цилиндра. Таким образом после магнитной импульсной обработки при регулировании процесса наружное воздействие поля уравнивается внутренними силами, и перепад внутренних напряжений может выравниваться. Для большей эффективности процесса рекомендуется применять короткие импульсы с продолжительностью 10-20 мкс, чтобы проникновение магнитного поля в заготовку ограничивалось тонкими поверхностными слоями, где закономерности управления близки к процессам для аддитивных технологий.

Энергию импульсного магнитного поля для деталей увеличенных размеров можно локализовать и выравнивать по площади заготовки б (рис. 2, в), концентрируя поле по слоям на одном участке заготовки и ослабляя его на другом. Для этого используют специальные металлические концентраторы 5, которые могут иметь разнообразную форму и в сочетании с различными по форме индукторами способны обеспечивать управление внутренними напряжениями для большого числа технологических операций с электромагнитным воздействием, используемым для выравнивания внутреннего состояния напряжений в объекте обработки.

Для раскрытия законов управления внутренними напряжениями в заготовках требуется раскрыть физические процессы, протекающие при разрядах. Разрядная цепь электроимпульсной установки обладает емкостью C , индуктивностью $L_{\text{экв}}$ и сопротивлением $R_{\text{экв}}$. Индуктивность разрядной цепи $L_{\text{экв}}$ зависит от магнитного потока рассеяния. При перераспределении внутренних напряжений в процессе выравнивания деформации заготовки эквивалентная индуктивность $B_{\text{экв}}$ может незначительно изменяться. Однако, этим в расчетах можно пренебречь, т.к. колебание величины эквивалентной индуктивности $L_{\text{экв}}$ даже для крупных заготовок не превышает 1 мкГн.

Эквивалентное сопротивление $R_{\text{экв}}$ включает необратимые потери энергии в разрядной цепи: на электрический нагрев элементов, работу деформации и т.д. Точно рассчитать эквивалентное сопротивление практически не удастся, поэтому при разработке режимов управления процессом используют коэффициенты, отражающие приближенные средние или экспериментальные значения. Параметры разрядной цепи C , $L_{\text{экв}}$, $R_{\text{экв}}$ выбирают такими, чтобы ток I был периодически затухающим, а скорость его изменения в начале разряда конденсаторов -наибольшей. При $R_{\text{экв}} = \sqrt{L_{\text{экв}}/C}$ период собственных колебаний разрядного тока может быть рассчитан через постоянную времени τ_n . При этом максимальный ток I_{max} наблюдается в конце первой четверти T_1 периода T ($T_1 = 0,25T$).

Если заготовка выполнена из ферромагнетика, то индуктивность $B_{\text{экв}}$ увеличивается, а частота соответственно уменьшается. Обычно частота собственных колебаний разрядной цепи $f_0 = 10$ кГц ($T_1 = 100$ мкс).

Для увеличения электромагнитной силы F_3 необходимо повысить напряженность магнитного поля H_1 на внешней стороне заготовки и уменьшить величину H_2 на внутренней (см. рис. 2). Это происходит при большой силе тока разряда и высокой скорости его изменения. Особенно велики электромагнитные силы в первой четверти периода разряда. Поэтому в дальнейшем преимущественно рассматриваются характеристики импульса в течение времени $\leq 0,25T$. Физика процесса электромагнитного импульсного формообразования подробно исследовалась в работе на примерах обжатия цилиндрической заготовки 4 индукционным способом, что дало возможность создать теоретические основы управления электромагнитными силами на различных слоях заготовки при аддитивных процессах выравнивания внутренних сил.

Если принять, что сила тока в начале разряда увеличивается по линейному закону, то скорость нарастания тока в первой четверти периода

$$dI/d\tau = I_{\text{max}}/0,25T = 0,3U_c/L_{\text{экв}} , \quad (1)$$

откуда для напряжения на конденсаторе U_c

$$I = (0,3U_c/L_{\text{экв}})\tau \quad (2)$$

Для контура на рис. 2 напряженность магнитного поля на внешней стороне заготовки

$$H_1 = K_{n1}NI , \quad (3)$$

где K_{n1} - постоянная процесса. Для типовых случаев выбирается по справочникам; N — число витков обмотки возбуждителя; I — сила тока.

Напряженность магнитного поля H_2 внутри заготовки изменяется значительно медленнее. Для контура L_2 напряженность поля H_2 рассчитывают через силу разрядного тока в обмотке возбуждителя I и наведенным в заготовке током I_n , который препятствует изменению поля внутри

$$H_2 = K_{H_1} N I - K_{H_3} I_H, \quad (4)$$

где K_{H_2} – постоянная, численные значения которой выбираются по справочникам или рекомендациям в рассматриваемой работе.

В цепи заготовки, включающей активное сопротивление R_H и индуктивность L_H , нарастание наведенного тока оценивается по зависимости (5) через постоянную времени τ_H , требуемую для определения параметров импульса при расчете технологических режимов комбинированной обработки с учетом аддитивных процессов и при выборе параметров создаваемых установок для электромагнитной импульсной обработки.

$$\tau_H = L_H / R_H. \quad (5)$$

При возрастании силы разрядного тока ЭДС ток в заготовке стремится к стабильному значению. Как было ранее показано, напряженность магнитного поля H_2 на внутренней стороне заготовки в начале разряда постепенно увеличивается, возникает «магнитная подушка», а электромагнитная сила F падает. Количественно это прямо пропорционально зависит от постоянной времени τ_H .

Для цилиндрической заготовки (рис. 2) длина кольцевой цепи наведенного тока равна $2\pi r_3$, где r_3 – радиус заготовки. Площадь токопроводящей части равна $l_3 \delta_3$, где l_3 – высота заготовки; δ_3 – толщина поверхностного слоя, по которому проходит наведенный ток. Тогда активное сопротивление кольцевой цепи наведенного тока R_H рассчитывают по зависимости

$$R_H = 2 \pi r_3 / (\rho_3 \delta_3 l_3), \quad (6)$$

где ρ_3 – удельная проводимость материала заготовки.

Толщина слоя δ_3 , определяемая поверхностным эффектом, зависит от удельной проводимости ρ_3 магнитной проницаемости μ_3 заготовки и частоты f разрядного тока. Переменный ток протекает в тонком слое (δ_3) в поверхностном слое

$$\delta_3 = 1 / \sqrt{\pi^2 \rho_3 \mu_3 f} \quad (7)$$

При обработке заготовок из электропроводных или ферромагнитных материалов установленный выше «поверхностный эффект» активно влияет на частоту разряда. Чем меньше толщина δ_3 поверхностного слоя, тем больше сопротивление R_H и меньше постоянная времени τ_H .

Индуктивность L_H цепи наведенного тока можно подсчитать по соотношениям, принятым при расчете соленоидов

$$L_H = K_L r_3^2 / l_3, \quad (8)$$

где r_3 и l_3 – радиус и высота заготовки; K_L – постоянная, зависящая от отношения l_3 / r_3 (выбираются по справочникам)

Для постоянной времени τ_H с учетом поверхностного эффекта получена зависимость (9),

$$\tau_H = K_L r_3 \sqrt{\rho_3 / \mu_3 f} \quad (9)$$

Показатели технологических режимов в комбинированных методах обработки определяются параметрами магнитоимпульсного воздействия и находятся через соотношения между постоянной времени τ_H и периодом разрядного тока T . Если постоянная

времени значительно меньше периода ($\tau_n < 0,25T$), то в течение первой четверти периода формируется большой наведенный ток. Для заготовок из материалов с низкой удельной проводимостью или с высокой магнитной проницаемостью наблюдается процесс, где при минимальных радиусах скругления участка детали возможно использование магнитоимпульсных установок с учетом выполнения условий проведения операции на деталях больших габаритов. Здесь минимальный радиус скругления у заготовки тем больше, чем выше магнитная проницаемость и чем меньше удельная проводимость материала детали. При обработке, например, стальных заготовок их радиус $r_{3 \min} \geq 10\text{мм}$.

Научно обоснованное использование установленных для магнитоимпульсного процесса физических закономерностей позволяет разработать механизм его управления для стабилизации внутренних напряжений, назначить технологические режимы и создать методику расчета параметров создаваемого оборудования с магнитоимпульсным воздействием.

Необходимым условием магнитоимпульсного воздействия является выполнение критерия (10) для постоянной времени τ_n

$$\tau_n > 0,25T = 0,25/f \quad (10)$$

Если τ_n превышает четверть периода, то необходимо установить допустимые текущие значения напряженности на внутренней поверхности заготовки при условии, что за время разряда колебания заготовки незначительны, не могут вызывать остаточных деформаций и не нарушают качественные показатели поверхностных слоев зоны обработки.

Для эффективного управления процессом магнитоимпульсных воздействий для управления состоянием внутренних напряжений первичный магнитный поток $\Phi(\tau)$ внутри заготовки должен быть пропорционален силе разрядного тока, что следует учитывать при проектировании или выборе магнитоимпульсной установки.

Общий магнитный поток $\Phi_2(\tau)$

$$\Phi_2(\tau) = \Phi(\tau) - \Phi_n(\tau), \quad (11)$$

где $\Phi_n(\tau)$ -магнитный поток, созданный наведенным током I_n . ($\Phi_n(\tau) = L_n I_n$)

Силу тока I_n определяют по электромагнитной индукции и закону Ома:

$$\frac{d\Phi_2(\tau)}{d\tau} = e_n = R_n I_n, \quad (12)$$

где e_n – ЭДС в цепи наведенного тока.

Из соотношений (12) получают дифференциальное уравнение, решая которое в процессе математического моделирования процесса, для линейно нарастающего разрядного тока находят силу наведенного тока и магнитный поток $\Phi_2(\tau)$ внутри заготовки. В начале разряда $\Phi_2(0) = 0$. Затем компенсирующее действие наведенного тока ослабевает, и магнитный поток внутри заготовки увеличивается. При $\tau \rightarrow \infty$ этот поток, как и разрядный ток, растет линейно, что упрощает управление магнитоимпульсным воздействием.

Внутри заготовки создается искомая напряженность поля, что открывает возможность изменять параметры внутренних напряжений и достигать выравнивания поля.

$$H_2 = \Phi_2(\tau) / (\mu_0 \pi r_3^2) \quad (13)$$

Если постоянная времени τ_n цепи наведенного тока невелика, то напряженности магнитного поля по обе стороны заготовки быстро выравниваются и плотность f_s поверхностных сил после кратковременного переходного процесса падает. Тогда

магнитоимпульсное воздействие для комбинированного процесса, особенно для выравнивания свойств крупных изделий, в большинстве случаев нецелесообразно.

В остальных случаях постоянная времени τ_n , а, следовательно, и электромагнитная сила, возрастают с увеличением радиуса заготовки. Показатели качества обработки наиболее выигрышные, если радиус заготовки приближается к размеру обмотки возбуждателя и зазор между заготовкой и обмоткой минимальный, что учитывается при расчете параметров импульсов. Тогда индуктивность разрядной цепи наименьшая. При этом H_2 стремится к 0, а плотность электромагнитных сил рассчитывают по (14).

$$f_3 = 0,5\mu_0(K_{H1}N)^2J^2 \quad (14)$$

Плотность сил, определяющая режимы управления лучевым воздействием, в комбинированном процессе с аддитивным действием растет с увеличением начального напряжения U_c конденсаторов, числа витков N обмотки возбуждателя, уменьшением ее высоты и индуктивности. Если принять плотность электромагнитных сил равной в начале разряда нулю, то изменение плотности электромагнитных сил в течение импульса раскрыто на рис. 3.

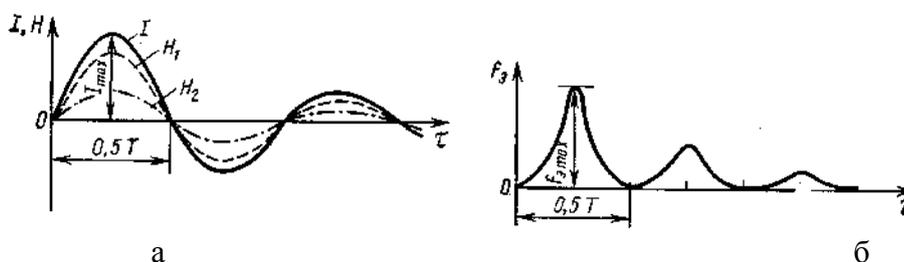


Рис. 3 – Законы управления плотностью электромагнитных сил во время импульса
а – сила тока; б – плотность электромагнитных сил

Для закона изменения сил, приведенного на рис. 3, их расчет может быть выполнен по (15).

$$f_{3max} = 0,12\mu_0 (K_{H1}N)^2U_c^2C/L_{ЭКВ} \quad (15)$$

Если для управления процессом требуется увеличение электромагнитных сил то применяют обмотку возбуждателя с большим числом витков N , но малой индуктивностью. При этом начальное напряжение U_c и емкость разрядной цепи C должны быть высокими. Величина f_{3max} определяется плотностью энергии в установке, т.е. отношением энергии, накопленной в конденсаторах, к объему рабочего пространства внутри возбуждателя.

В первом полупериоде разряда (рис. 3) выделяется основная часть энергии, накопленной конденсаторной батареей. Во втором полупериоде меняются направления магнитных полей по обе стороны заготовки, хотя направление электромагнитной силы сохраняется.

Приведенный анализ, проведенный для цилиндрической заготовки, правомерен и для заготовок других конфигураций различных размеров.

Разработана методика расчета параметров магнитоимпульсной установки.

Для расчета параметров, включая характер действия сил и управление магнитоимпульсным процессом комбинированного метода обработки, следует установить закономерности распределения плотности электромагнитных сил по толщине крупных заготовок (рис. 4), что влияет на свойства поверхностного слоя и распределение внутренних напряжений с учетом действия закономерностей для аддитивных технологий. Приведенные в работе исследования подтверждают качественные изменения на рис. 4 доказывают, что заявленные нами изменения магнитной индукции в поверхностном слое заготовки вызывают появление достаточно значимых электромагнитных сил от наведенного тока плотностью I_n ,

стабилизирующего процесс за счет противодействия изменению магнитной индукции в заготовке.

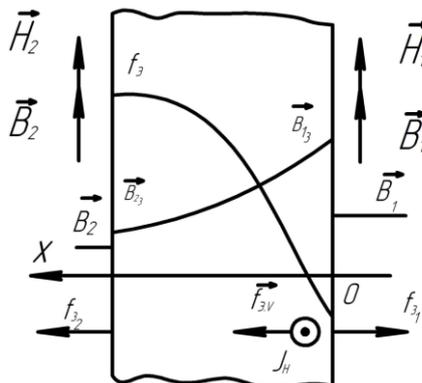


Рис. 4 – Распределение плотности электромагнитных сил

Показанная на рис. 4 объемная плотность электромагнитных сил может быть рассчитана по (16)

$$\vec{f}_{эВ} = \vec{J}_H \times \vec{B}_1 \quad (16)$$

Индукция B_1 магнитного поля снаружи заготовки в поверхностном слое становится равной B_{13} и изменяется до значения B_{23} на внутренней поверхности. За пределами заготовки индукция магнитного поля равна B_2 .

На внешней границе заготовки плотность поверхностных сил:

$$f_{э1} = 0,5H_{13}B_{13} - 0,5H_1^2(\mu_0 - \mu_3), \quad (17)$$

где H_1, B_{13} – соответственно напряженность поля и магнитная индукция на внешней поверхности заготовки.

Правомерность установленных в главе закономерностей импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий подтверждена опытом практического применения установленных теоретических зависимостей и приведенными в работе экспериментальными результатами. Основным показателем является хорошая сходимость установленных в главе закономерностей импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий.

Правомерность установленных в главе закономерностей импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий подтверждена опытом практического применения установленных теоретических зависимостей и приведенными в работе экспериментальными результатами. Основным показателем является хорошая (в пределах 5 %) сходимость, приведенная на рис. 5.

В работе рассмотрено влияние изучаемых параметров на эксплуатационные характеристики деталей, на примерах типовых изделий типа баллонов, в том числе с покрытием, отвечающим требованиям обеспечения качества при эксплуатации изделий.

На рис.5 приведено изменение величины и характера остаточных напряжений, восстановленных участков детали слоем хрома, наносимого на шток толкателя гидравлического агрегата из стали 30ХГСА при плотности тока 20 кА/м^2 , температуре 340К.

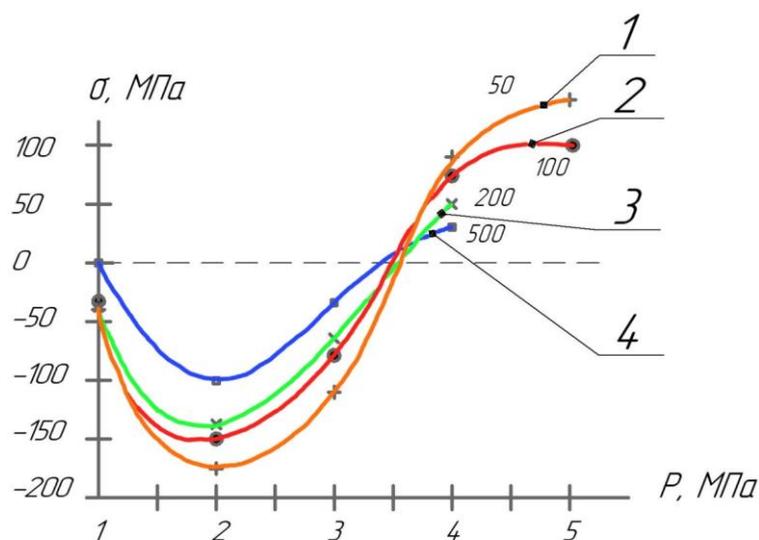


Рис. 5 – Остаточные напряжения в поверхностном слое при различных силах послойного давления (P) инструмента на нанесенное покрытие.
Толщина покрытия, мкм: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 500

На рис. 5 точками показаны результаты экспериментов на деталях, где предельная глубина исследованных слоев находится в пределах толщин нанесенных покрытий.,которые многократно обработаны электромагнитными импульсами.Изучение материалов для широкого диапазона внешних силовых воздействий, полученных действием внутренних напряжений, а в экспериментах – механическим эквивалентным воздействием и облучением, показало, что при расчете параметров электромагнитного воздействия выравнивание внутренних напряжений не следует обнулять, а требуется их формировать в зависимости от условий эксплуатации изделия и выравнивать с соблюдением показателей качества.

В рассматриваемом случае для большинства деталей с хрупким толстослойным покрытием (например, однородных слоев из химически чистого хрома) необходимо получить после восстановления детали сжимающие остаточные напряжения. Анализ рис. 5 показывает, что для этого давление инструмента следует назначать в диапазоне 1,5–3 МПа. Величина сжимающих напряжений снижается по мере возрастания толщины наносимого покрытия, поэтому превышение этого показателя сверх 500 мкм нежелательно, т.к.из-за перепада сил между слоями,рассчитанных по законам аддитивных технологий и подтвержденных экспериментами, возникает вероятность растрескивания слоя и его осыпания. Это эквивалентно действию внутренних напряжений в деталях на рис. 1, вызвавших их разрушение при испытаниях.

Кроме давления инструмента на остаточные напряжения значительное воздействие оказывает применяемая при импульсном воздействии средняя плотность тока (рис. 6.а) и температура в зоне действия импульса (рис. 6,б).

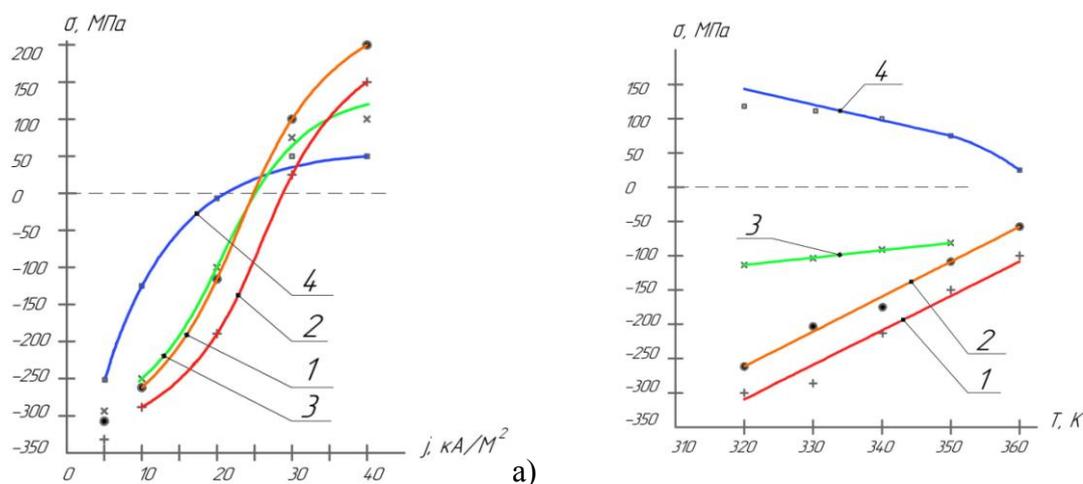


Рис. 6 – Остаточные напряжения при различных режимах нанесения покрытий и при их магнитоимпульсной обработке

а) при различной средней плотности тока.

Толщина покрытия, мкм: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 350; 4 – 500.

Давление инструмента – 2,0 МПа, температура электролита – 340 К

б) при различной температуре в зоне обработки.

Толщина покрытия, мкм: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 400

Давление инструмента – 2,0 МПа, плотность тока – 12 кА/м².

Было установлено, что сжимающие напряжения (рис. 6.а) для получения качественных гальванических покрытий с толщиной до 500 мкм обеспечиваются, если средняя плотность тока не превышает 30 кА/м².

Влияние температуры электролита на величину остаточных напряжений приведено на рис. 6.б, откуда видно, что рабочий диапазон этого параметра для заготовок любой геометрии и размеров целесообразно ограничить 330-350 К.

Управляемые электромагнитные воздействия с расчетными параметрами позволяют снизить высоту микронеровностей деталей, в том числе для рассматриваемого случая нанесения хромовых покрытий, наносимых на сталь, с Ra=5 мкм до 0,03–0,06 мкм. Шероховатость поверхности существенно зависит от воздействия силовых факторов на покрытие (рис. 7.а) и температуры рабочей среды (рис. 7.б). Анализ рис. 7 позволяет подтвердить положительное влияние расчетных технологических параметров комбинированного процесса с выравниванием внутренних напряжений в рассматриваемом покрытии на качество поверхностного слоя детали, в том числе с покрытием, и назначать режимы обработки с учетом эксплуатационных условий работы детали.

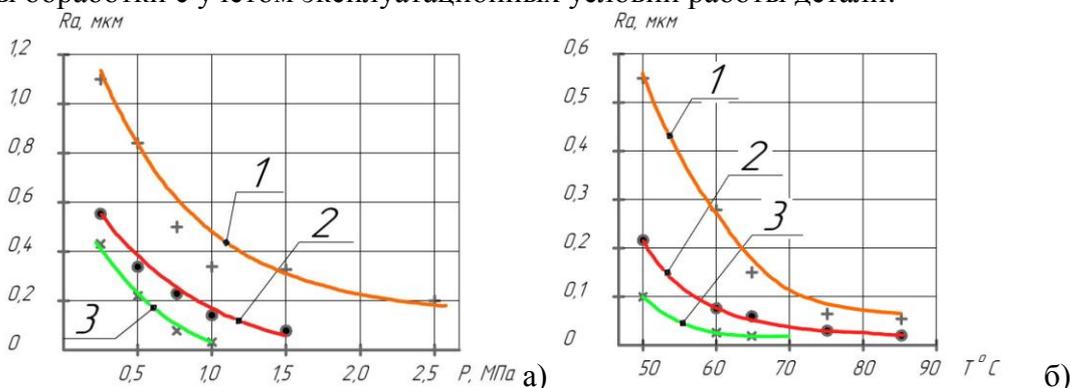


Рис. 7 – Зависимость шероховатости поверхности от режимных параметров после послыонного выравнивания внутренних напряжений в покрытии

а) от внешнего давления при режимах гальванического нанесения хромового покрытия. Температура электролита – 330 К. Плотность тока кА/м²: 1 – 16; 2 – 9,5; 3 – 6.

б) от температуры жидкой рабочей среды (электролита)

Давление от внешнего воздействия 1,5 МПа. Плотность тока кА/м²: 1 – 22; 2 – 16; 3 – 6

Гальваноконтактное восстановление с использованием импульсного электромагнитного воздействия обеспечивает получение деталей с покрытием с точностью 7-8 качества, что соответствует или превышает требуемые показатели качества новой детали и доказывает перспективность использования комбинированных процессов с управляемым выравниванием внутренних напряжений по установленным закономерностям для электромагнитных и химических воздействий. Однородный слой, получаемый покрытиями, дает основания утверждать, что установленные количественные зависимости справедливы для проектирования технологических режимов и средств технологического оснащения.

Микротвердость участков с покрытием после выравнивания внутренних напряжений достигает 11000-11500 МПа, что на 15-20 % выше, чем при стандартном хромировании. Новый процесс в несколько раз повышает износостойкость узлов трения. Там же указывается, что хромированные детали после восстановления геометрии при ремонте устойчивы к действию агрессивных сред. Сходимость, приведенная на рис. 6–8, составила величину в пределах $\pm 5\%$, что доказало правомерность установленных закономерностей, в том числе полученных при проектировании наукоемких перспективных комбинированных технологических процессов для заготовок с покрытиями.

Таким образом, в главе 3 работы подтверждена правомерность механизма протекания процесса и механизма комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий, позволившая создать физическую модель, определяющую возможности управления электромагнитными воздействиями. На базе физической модели установлены закономерности построения механизма, выполнено описание и комбинированного электромагнитного импульсного процесса для деталей различных габаритов. В результате раскрыт механизм импульсных взаимодействий, требуемый для решения задачи 4 и подтверждения других результатов работы.

Кроме того, в главе сформированы доказательства правомерности закономерностей для их использования при восстановлении эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий, раскрыты возможности комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик крупногабаритных объектов, выпускаемых в машиностроении. На базе физической модели по законам аддитивных технологий и механизма протекания комбинированной обработки созданы математические модели для расчета параметров режимов выполнения процесса..

В главе 4 приведены методологии проектирования технологического процесса качественной магнитоимпульсной обработки заготовок и математическое моделирование для расчета режимов, настройки и изготовления оригинальных узлов оборудования. Для получения максимального ресурса многофазового возбудителя, на котором наблюдается активная эрозия, в период действия импульсов требуется научно обоснованный выбор напряжения на конденсаторах, базирующийся на физических закономерностях и механизме протекания электромагнитного воздействия, рассмотренного в главе 3 работы. Диапазон напряжений в применяемых установках составляет от 1 до 50 кВ и рассчитывается с учетом физических закономерностей и механизма протекания комбинированного процесса, рассмотренного в главе 3 работы.

Математическое моделирование процесса получения параметров технологического режима магнитоимпульсного воздействия выполняется по представленной в работе методологии и позволяет найти требуемую предельную емкость конденсаторной батареи

$$C = \frac{\sigma T}{K_2 \mu_0 K_{H_1}^2 N^2 U_c J_{\max}}, \quad (18)$$

где σ_τ – предел текучести материала заготовки (кг/м·сек²);
 Т – период действия импульса;

K_2 – коэффициент, учитывающий взаимное влияние параметров импульсов магнитоимпульсной обработки.

Для рассматриваемого случая $K_2 = 1,6$; μ_0 – магнитная постоянная среды, в которой происходит процесс обработки (Гн/м). Для воздушной среды $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; K_H – коэффициент, учитывающий интенсивность нарастания тока в импульсе по направлению действия магнитного поля (1/м); N – количество витков обмотки многократного возбуждателя. По рекомендациям, обоснованным в работе, $N = 3-6$.

Выбор напряжения U_c на конденсаторах выполняют с учетом получения максимального ресурса многократного возбуждателя, на котором наблюдается активная эрозия в период действия импульсов. Диапазон напряжений в применяемых установках составляет от 1 до 50 кВ.

Для комбинированного процесса управляющей функцией, характеризующей граничные условия импульсной обработки, является критерий

$$F_{эм} < \sigma_t, \quad (19)$$

где $F_{эм}$ – электромагнитная сила, действующая на зону действия импульса; σ_t – предел текучести материала заготовки.

В работе показана процедура расчета $F_{эмmax}$, где применительно к баллонам, дополнительно учитывается внутреннее рабочее давление P_B

$$F_{эмmax} = \frac{0,12 \mu_0 (K_{H1} \cdot N)^2 U_c^2 \cdot C}{L_{экв}} + P_B, \quad (20)$$

где μ_0 – магнитная постоянная среды, в которой происходит процесс обработки (Гн/м). Для воздушной среды $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; K_{H1} – коэффициент, учитывающий интенсивность нарастания тока в импульсе по направлению действия магнитного поля (1/м); N – количество витков обмотки многократного возбуждателя. $N = 3-5$; U_c – напряжение (В) на конденсаторах. Для рассматриваемого случая $U_c = 1-2$ кВ; C – емкость конденсаторной батареи (мкФ). Здесь «С» – расчетный параметр режима управляемой магнитоимпульсной обработки; $L_{экв}$ – эквивалентная индуктивность (Гн) разрядной цепи установки (обычно указывается в паспорте оборудования).

В зависимости (20) даже для крупных заготовок предельные значения энергии импульса W при формообразовании различных материалов, в том числе на крупных одноблочных установках, не превышают 10 кДж. (показатель обычно включается в паспорт установки). В этом случае для выравнивания внутренних напряжений многоэлементных сварных конструкций расчетную энергию снижают на 20-25 % и находят U_c по упрощенной зависимости

$$U_c = \sqrt{2K_3 W / C}, \quad (21)$$

где K_3 – коэффициент, учитывающий снижение энергии импульса для материалов с низкой удельной проводимостью относительно базового показателя, применительно к объемному деформированию и отвечающего критерию (19) ($K_3 = 0,75-0,8$). Его величина зависит от уровня технологичности при обработке, включая качество подготовки поверхности.

Для рассматриваемого случая $U_c = 1-2$ кВ; Здесь «С» – расчетный параметр режима управляемой магнитоимпульсной обработки.

Для некоторых видов сварных заготовок контроль режима обработки выполняют через наибольший ток в импульсе (I_{max}), который составляет

$$L_{экв} = \frac{K_1 U_c T}{I_{max}}, \quad (22)$$

где $L_{\text{экв}}$ – эквивалентная индуктивность (Гн) разрядной цепи установки (обычно указывается в паспорте оборудования); T – длительность протекания разрядов, которая может быть регулируемой величиной или рассчитываться через частоту следования рабочих разрядов с учетом коэффициента полезного использования разрядов $K_{\text{нп}}$ (для наиболее употребительных случаев $K_{\text{нп}} = 0,05-0,1$). Для большинства установок «Т» в формуле (22) должна быть менее 100 мкс.

В (22) K_1 – коэффициент, характеризующий максимальный ток в разряде, который формируется в период $\frac{1}{4}$ от начала импульса и в воздушной среде, равен $K_1=0,075$. Сопротивление R находят через $L_{\text{экв}}$

$$R = \sqrt{L_{\text{экв}}/C} \quad (23)$$

Расчеты по приведенной методологии и экспериментальная проверка результатов позволили получить для деталей типа баллонов, в том числе с сечением более 600 мм и толщиной стенки до 10 мм из титановых сплавов, рабочие режимы, включающие назначение напряжения пробоя величиной 18-20 кВ, которое обеспечивает требуемую напряженность магнитного поля не менее 300 кГс и получение силового импульса до 350 МПа. При использовании постоянной времени по (9) длительность импульсов для баллонов без покрытия составит до 40 мкс, при наличии защитных покрытий применяют импульсы продолжительностью 20-30 мкс. Число импульсов зависит от требуемого уровня выравнивания внутренних напряжений и, как правило, ограничено 5-6 импульсами, а при наличии покрытий достаточно 3-4 импульсов с интервалом между ними 4-5 секунд.

В главе 4 разработаны пути получения качественных показателей комбинированной обработки с использованием импульсного электромагнитного поля и создан алгоритм расчета параметров комбинированных процессов, которые проверены при обработке крупногабаритных сборочных узлов двигателей ракетной техники и деталей летательных аппаратов. Параметры расчетов использованы при выборе и проектировании узлов оборудования для электромагнитной обработки.

Проверка материалов, полученных на стадии испытаний ракетных двигателей, показала, что в настоящий период эксплуатации при использовании созданных технологий обеспечена возможность в 4–5 раз повысить количество безотказных пусков (а в перспективе до 10), которое востребовано для новых изделий космической техники.

В главе 5 обоснованы перспективы применения результатов исследования по комбинированным воздействиям с использованием электромагнитных полей для получения требуемых эксплуатационных характеристик изделий, для чего созданы новые, на уровне изобретений, инструменты и способы управления комбинированным воздействием, изучен и реализован опыт эксплуатации модернизированных и созданных установок по предлагаемой технологии, эксплуатация которой показала целесообразность использования процесса в аддитивных технологиях.

Разработаны способы и устройства для реализации новых видов комбинированной обработки, в том числе с применением покрытий, на которые были получены охранные документы.

Раскрыты пути интенсификации процессов за счет применения импульсных резонансных воздействий, рекомендованных к использованию в комбинированных методах обработки на текущий и последующие периоды развития различных отраслей машиностроения.

Предложены новые процессы для подготовки поверхностей крупногабаритных деталей под покрытия, что позволило расширить область использования комбинированных методов обработки на различные отрасли машиностроения.

Заключение

Выполненный комплекс теоретических и прикладных исследований по обоснованию возможностей и расширению области использования комбинированных методов обработки с аддитивными технологиями доказал что в наукоемком машиностроении одним из эффективных воздействий в перспективных комбинированных процессах является управляемое электромагнитное поле, использование которого практически сняло большинство ограничений по повышению качества деталей и сборных конструкций с любыми габаритами и распределением начальных внутренних напряжений, снижало зависимость страны от крупного термического оборудования, значительная часть которого приобреталась за рубежом и стала недоступной в условиях действия внешних акций.

По материалам работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. Доказана возможность ускорения на порядок и более цикла проведения технологических операций, выполняемых с использованием аддитивных технологий с электромагнитным импульсным воздействием, длительность каждого из которых может быть в пределах 100 мкм, взамен многочасовых термических операций, что снижает показатели производственной технологичности, особенно на стадии запуска в производство наукоемких изделий новых поколений техники, требуемых в авиакосмической промышленности с оборонным и другим назначением.

2. Использование предложенных технологий повышает ресурс изделий авиакосмической техники в 4-5 раз, а в ближайшей перспективе до 10 раз, что оценивается по количеству осуществленных пусков при испытаниях изделий, предназначенных для создаваемых ракетных двигателей с большой тягой и габаритами.

3. Достигнуто многократное снижение затрат на приобретение, установку, эксплуатацию, обслуживание высвобождаемого термического оборудования, особенно для обработки крупногабаритных объектов, межоперационная транспортировка которых к месту выполнения термических операций не всегда осуществима, затратна, что ограничивает возможности разработчиков новой техники на стадии отработки технологичности.

4. Раскрыта возможность ускорения в несколько раз темпов совершенствования комбинированных методов обработки за счет использования проверенных временем научных положений по применению электромагнитных воздействий в комбинированных методах обработки для выравнивания внутренних напряжений, в том числе для крупногабаритных изделий..

5. Обоснована возможность выполнения операций с использованием электромагнитных воздействий без использования для охлаждения жидкостей, что исключает герметизацию магистралей, особенно актуальную при крупных габаритах изделий.

6. Для расширения области использования и повышения качества изделий показана возможность использования покрытий, выполнения операций в закрытых герметичных контейнерах с их заполнением газовыми средами, требуемыми для защиты от внешних помех и изоляции от нежелательных воздействий.

7. Устранены многие помехи, ограничивающие использование в комбинированных процессах электромагнитных импульсных воздействий, часть которых выполнена с участием соискателя на уровне изобретений и внедрена в производство на предприятиях авиакосмического машиностроения и в станкостроении.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Монография

1. Гальваноконтактное восстановление геометрии деталей с использованием поверхностного пластического деформирования: монография: в 2-х т. / В.П. Смоленцев, М.В.

Кондратьев, И.Г. Стародубцев, Н.Н. Ненахов; под ред. С.А. Зайдеса // Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования. – Иркутск: Из-во ИРНИТУ, 2022. – Т. 2 – 584с

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Смоленцев В.П., Поташникова Н.С., Ненахов Н.Н. Расчет и обоснование режимов электроабразивной чистовой обработки многогранных каналов / В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, Н.Н. Ненахов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021.–Т. 17. – № 11 (203). – С. 503–508.

3. Восстановление размеров и качества деталей комбинированным гальваномеханическим покрытием / Н.Н. Ненахов И.Г., Стародубцев, В.П. Смоленцев, В.Л. Мозгалин // Справочник. Инженерный журнал. – 2021. – № 12(287). – С. 3–8.

4. Аддитивные технологии изготовления инструментов для комбинированных методов обработки / В. П. Смоленцев, Н. Н. Ненахов, А. А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С. 3-8.

5. Подготовка поверхности заготовок под теплозащитное покрытие / Н.Н. Ненахов, В.П. Смоленцев, В.Л. Мозгалин, А.И. Портных // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т.17. – №8. – С. 377–381.

Изобретения

6. Пат. № 2778809 Российская Федерация, В23Н/600. Способ гальваноконтактного восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания и раскатки слоев гальванического покрытия / Смоленцев В. П., Ненахов Н. Н., Стародубцев И. Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»; – № 2021116268; заявл. 03.06.2021; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 24. – 10 с.

7. Пат. 2809681 Российская Федерация МПК В23Н. Электрод-инструмент и способ электроабразивной обработки полужакрытой полости детали / Ненахов Н. Н., Смоленцев В. П., Кириллов О. Н., Д. Е. Крохин заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»;- № 2022119062, заявл. 11.07.2022. опубл. 14.12.23, Бюл. № 35.–9 с.

Зарубежные публикации

8. The field of use of additive technologies / Alexandr Izvekov, Vladislav Smolentsev, Nikolai Nenakhov, Igori Starodubtsev // Journal of Clinical Review J.Clin Cast Rep – 2022, Vol.7, Issue .1, P.103.

9. Smolentsev V., Izverov A., Nenahov N / Performance Characteristics of Coatings for Medical Instruments and Equipment // Pharmaceutical Sciences & Analytical Research Journal – 2023, Volume 3, Issue 1

10. Smolentsev Vladislav, Nenakhov Nikolay, Smolentseva Yana / Application of low-frequency magnetic pulses for stabilization of large-sized prefabricated structures // Applied Sciences (ISSN 2076-3417, IF 2.474), 2022, Vol.5, Issue 7, P.96.

Публикации в научных сборниках и материалах конференций

11. Ненахов Н.Н., Кириллов О.Н., Гришина Е.Н. Назначение технологических режимов чистовой обработки электродом-щеткой нежестких деталей // Управление качеством продукции в машиностроении, авиакосмической технике (ТМ18): сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2018. – С. 86-90.

12. Ненахов Н.Н.. Технология комбинированной импульсной обработки в кавитационной жидкой среде / В.П. Смоленцев, О.В. Скрыгин, Н.Н. Ненахов, С.В. Сафонов // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий, под ред. В.А. Лебедева: сб. тр. семинара технологов-машиностроителей. – Ростов/н/Дону: ДГТУ, 2021. – С. 342–345.

13. Ненахов Н.Н., Кириллов О.Н., Джулай А.М. Перспективы использования непрофилированного электрода-щетки для обработки нежестких деталей // Управление

качеством продукции в машиностроении, авиакосмической технике (ТМ18): сб. науч. тр. X междунар. науч. техн. конф. – Воронеж: ВГТУ, 2018. – С.82–86.

14. Гришина А.М., Ненахов Н.Н., Кириллов О.Н. Комбинированная обработка непрофилированным инструментом изделий машиностроения // Инновационные машиностроительные технологии, оборудования и материалы (МНТК «ИМТОМ-2018»): матер. IX междунар. науч.-техн. конф. в 2-х частях – Казань: КНИАТ, – 2018. –Ч. 2.– С. 314–318.

Подписано в печать 20.05.2024

Формат 60x84x16. Бумага для множительных аппаратов

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 90 экз. Заказ №___

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84