

Ученому секретарю
диссертационного совета 24.2.286.06
к.т.н., доценту А.В. Мандрыкину
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет» (ВГТУ)
394026, г. Воронеж, Московский
просп., 14

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу Ненахова Николая Николаевича на тему
«ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИМПУЛЬСНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

1.Актуальность темы диссертационной работы.

Производство, эксплуатация и восстановление высоконагруженных деталей и узлов летательных аппаратов многоразового использования на современном этапе развития технологий сталкиваются с проблемой обеспечения гарантированной надежности при сохранении заданных показателей качества изделий. Геометрия таких деталей чаще всего представляет собой полые и тонкостенные цилиндрические, сферические и криволинейные поверхности. Геометрия узлов формируется путем неразборной или разъемной сборки элементов конструкции, в том числе с применением сварки и при запрессовке с нагревом охватывающей поверхности. Для обеспечения технологических возможностей летательных аппаратов необходим широкий типоразмерный ряд деталей и узлов, включая крупногабаритные. Различное целевое назначение деталей и узлов, а также жесткое требование к минимизации массы, определяет их изготовление из титановых сплавов, жаропрочных сталей и других высокопрочных материалов с применением традиционных и аддитивных технологий. Эксплуатация таких деталей в условиях воздействия высоких нагрузок и агрессивных

технологических сред определяет необходимость применения износостойких покрытий на их рабочих поверхностях. Технологический процесс изготовления таких деталей сложен и трудоемок, ввиду необходимости обеспечения требуемой точности формы, сопряжений поверхностей, обработки криволинейных поверхностей, качества поверхностного слоя и сопровождается возникновением внутренних и поверхностных остаточных напряжений, величины которых увеличивают напряженное состояние деталей и узлов в процессе эксплуатации, снижают их ресурс и могут привести к внезапному выходу из строя.

Существующие на сегодняшний момент методы выравнивания остаточных напряжений с применением термической обработкой изделий, ультразвуковой ударной обработки, низкочастотной виброобработки и т.п. достаточно дороги, трудоемки и не всегда применимы для обработки сложных поверхностей пустотелых и тонкостенных крупногабаритных деталей в том числе на этапе их восстановления. Поэтому тема диссертационного исследования, заключающаяся в разработке концепции и технологии изготовления и восстановления работоспособности высоконагруженных деталей и узлов на основе применения комбинированного воздействия является актуальной.

2. Оценка содержания диссертации и автореферата, степень завершенности исследования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. В состав работы включено 3 таблицы, 30 рисунков, список литературы из 130 наименований и приложений. Общий объем диссертации 123 страницы. Структура и содержание автореферата соответствуют тексту диссертации. Выдвигаемые в работе положения обоснованы и доказаны.

Во введении соискателем освещена актуальность темы диссертационного исследования; сформулированы цель и задачи исследования; определены объект и предмет исследования; отмечена новизна и практическая значимость полученных результатов; представлены результаты, полученные автором лично; приведены данные об апробации результатов работы и подтверждающие их достоверность.

В первой главе приведен обзор и анализ разработанных магнитных и механических воздействий, применяемых на практике для восстановления

эксплуатационных характеристик высоконагруженных деталей простой формы; рассмотрено применяемое для таких процессов оборудование.

Обзор показал, что комбинированные методы воздействия могут быть применены при производстве и восстановлении поверхностей высоконагруженных изделий различной формы, в том числе крупногабаритных; требуется дополнительное изучение процессов воздействия на остаточные напряжения в пустотелых и тонкостенных деталях сложной формы и узлов, используемых в летательных аппаратах.

Во второй главе сформулирована научная гипотеза исследования, заключающаяся в концепции и возможности практического создания технологического процесса, направленного на комбинированное магнитное, механическое, температурное и химическое воздействие на высоконагруженные пустотелые и тонкостенные детали различных форм и габаритов, изготовленных из пара- и ферромагнетиков, позволяющего направленно, путем подбора параметров воздействия, изменять остаточные внутренние и поверхностные напряжения в деталях, в том числе с износостойкими покрытиями, возникающие на этапах их изготовления, эксплуатации и восстановления, путем послойного выравнивания их величины в пределах, не вызывающих дополнительную деформацию объектов до границ разрушения конструкции.

В главе приведено описание высоконагруженных пустотелых цилиндрических и шаровидных баллонов различных габаритов, выполненных из титановых сплавов; рассмотрены проблемы их разрушения, возникающие в том числе за счет воздействия высоких внутренних давлений, агрессивных технологических сред, формы и качества сварного шва; разработана конструкция сборочного приспособления, позволяющая устранить выявленные при экспериментах дефекты внутренних поверхностей, возникающие при сборке, а именно обеспечить более точное базирование и установку в рабочее положение сборочных элементов, позволяющее обеспечить доступ электронного луча в зону сварки при изготовлении изделия. Применение приспособления позволяет исключить из технологического процесса вызывающие остаточные напряжения операции по выравниванию стыка и формы сварного шва.

В третьей главе описывается механизм протекания процесса магнитоимпульсного воздействия на деталь для компенсации остаточных механических напряжений в ней.

Разработана физическая модель, представляющая собой схему распределение магнитных силовых линий, характеризующих плотность распределения магнитного потока в индукторе, в зависимости от условий работы индуктора. Рассмотрено изменение распределения магнитных силовых линий поля при размещении внутри индуктора диэлектрического и металлического цилиндров, описана природа возникновения вихревых токов на поверхности металлического цилиндра и индукционного нагрева материала цилиндра, соответствующие теории протекания электродинамических процессов.

Отмечено, что наибольшая плотность распределения силовых линий, определяющая силу импульсного магнитного поля, зависит в том числе от минимально возможного без саморазряда расстояния между электродами, а локализация поля на участках заготовки возможна за счет размещения на цилиндре специальных металлических концентраторов.

При этом отмеченная автором, как установленная в работе, пропорциональность энергии разряда квадрату интенсивности поля, большая часть которой воздействует на площадь в пределах витка обмотки индуктора, является очевидной, поскольку вытекает из размерности физической величины энергии.

Помещая в импульсное магнитное поле деталь, имеющую остаточные напряжения, путем изменения параметров поля, а именно частоты и продолжительности импульсов, можно управлять глубиной проникновения магнитного поля в материал заготовки, перераспределяя тем самым остаточные напряжения в нем. При этом эффективность процесса будет зависеть от электрического сопротивления металла детали.

По сформированной физической модели разработана математическая модель, представляющая собой совокупность аналитических выражений, связывающих характеристики магнитоэлектрических установок с параметрами импульсного магнитного поля и геометрическими параметрами детали.

При аналитическом описании взаимодействия переменного магнитного поля (импульсного) с деталью, показано, что характерным эффектом такого взаимодействия является скин-эффект, при котором внешнее поле проникает внутрь детали (проводника) не дальше, чем на характерное расстояние δ , то есть его влияние распространяется на приповерхностный слой толщиной δ . Изменяя параметры поля, можно управлять глубиной его проникновения в материал детали и/или покрытия, изменяя тем самым внутренние напряжения

в них. В работе описан механизм управления процессом стабилизации остаточных напряжений в детали путем рассмотрения закона индукции Ленца, однако автор не приводит количественные параметры поля, обеспечивающего этот процесс для рассматриваемых деталей.

По результатам проведенного физического и математического моделирования проведена серия экспериментальных исследований на деталях с покрытием, показавшая высокую сходимость результатов, разработаны рекомендации для выбора параметров установок для магнитоимпульсной обработки.

Четвертая глава посвящена проектированию технологического процесса магнитоимпульсной обработки заготовок, путем расчета режимов работы технологического оборудования для деталей различного целевого назначения, изготовленных из пара- и ферромагнетиков с защитным покрытием и без покрытия; приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие сформулированные в работе гипотезы.

В пятой главе приводится описание новых, на уровне изобретений, средств технологического оснащения операций 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.

В заключении приведены итоги научных и практических результатов и общие выводы, полученные в ходе выполнения данной диссертационной работы.

Структура и содержание работы соответствует цели и задачам исследований. Для достижения поставленной цели соискателем разработан алгоритм проведения исследований, в котором обоснована последовательность выполнения работы, создана база для проведения теоретических, экспериментальных работ, внедрения результатов исследования в промышленности. Каждая глава диссертации завершается соответствующими выводами.

Автореферат диссертации отражает основное содержание исследований и дает полное представление об объеме выполненных работ.

Степень апробации результатов исследования достаточна.

Исследование представляет собой целостную завершенную, практически реализованную работу.

Диссертация Ненахова Н.Н. обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения и свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна.

К наиболее важным научным результатам, полученным автором и обладающих **новизной**, следует отнести раскрытие закономерностей комбинированного импульсного магнитного воздействия на высоконагруженные крупногабаритные пустотелые и тонкостенные детали сложной формы в том числе с износостойким покрытием и механизм выравнивания, в том числе послойного, остаточных напряжений в них до требуемого уровня, путем управления параметрами импульсного магнитного поля, воздействующими на исследуемые участки заготовок с различной технологией получения исходной поверхности

Новизна полученных результатов подтверждается публикациями, сделанными в открытой печати в известных изданиях, доступных широкому кругу читателей, значительным количеством выступлений на специализированных научных конференциях. По теме исследования опубликовано 14 научных работ, в том числе коллективная монография, 4 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 3 в журналах, индексируемых в Scopus, 2 патента РФ.

Положения практической ценности работы, сформулированные на основании материалов глав 2,3,4,5, заключаются в создании методических материалов по проектированию и применению комбинированных технологических процессов с управляемым воздействием импульсного магнитного поля на высоконагруженные крупногабаритные пустотелые и тонкостенные детали сложной формы, в том числе с износостойкими

покрытиями, при их изготовлении и восстановлении, с целью обеспечения их гарантированной надежности при сохранении заданных показателей качества при многократном использовании.

Степень достоверности выводов, результатов и рекомендаций подтверждается корректным использованием известных научных гипотез и теоретических методов в области технологии машиностроения, методов поверхностной модификации, электродинамики материальных сред.

Разработанный технологический процесс осуществления комбинированной магнитоимпульсной обработки реализован на базе сертифицированного экспериментального и опытного производственного оборудования, спроектированных новых, на уровне изобретений, средств технологического оснащения операций.

Использованы классические подходы к сравнению полученных в процессе комбинированной магнитоимпульсной обработки опытных деталей результаты с исследованиями других ученых, анализ которых дан соискателем в разделе 1 и далее по тексту диссертационной работы, а также данными о запуске изделий в серийное производство в авиакосмической и станкостроительной промышленности.

Основные выводы соответствуют поставленным цели и задачам исследования, подтверждают их выполнение.

4.Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». В работе приводится моделирование процессов, разрабатывается, исследуется и испытывается технология комбинированного магнитоимпульсного воздействия на высоконагруженные детали и узлы различного целевого назначения, приводятся рекомендации по выбору параметров технологического оборудования, создаются средства технологического оснащения операций, что соответствует пунктам 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» паспорта научной специальности 2.5.5.

5. Замечания по работе

1. В состоянии вопроса изложен обзор и анализ доступных литературных источников по исследованию внутренних напряжений деталей в основном простой формы. К рассматриваемой тематике ближе всего исследования профессора Мухина В.С., изложенные в монографии «Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД» (М:Наука,2005,296с), обосновывающие в том числе выбор и ограничение методов измерений внутренних напряжений в деталях пустотелой формы, однако, данное исследование в работе не проанализировано.

2. В работе говорится о разработке механизма компенсации остаточных напряжений в высоконагруженных деталях, однако не приводится информация о детектировании величин и полей распределения этих напряжений до и после комбинированного магнитоимпульсного воздействия на исследуемых деталях и узлах, в том числе с износостойкими покрытиями.

3. Известно, что магнитное поле в веществе отличается от приложенного поля, т.к. вещество обладает собственными микроскопическими магнитными свойствами. При приложении внешнего поля вещество формирует отклик. Атомы (молекулы) вещества, будучи носителями собственного магнитного поля вещества, приобретают тенденцию к упорядочению (переупорядочению), что приводит к появлению явных макроскопических магнитных свойств среды. Таким образом, эффективное поле в среде представляется суммой внешнего приложенного поля и отклика среды. В работе исследуемые детали изготовлены из различных материалов, относящихся к разным группам по механизму формирования отклика на магнитное поле, а именно: железо – ферромагнетик, титан – парамагнетик. Разработанная математическая модель не учитывает магнитные свойства среды, поэтому неясны граничные условия ее применимости.

4. Используемый в работе список терминов, описывающий процесс магнитоимпульсной обработки, представляется излишним. Так, например, в различных разделах работы процесс воздействия переменного магнитного

поля (магнитоимпульсный) поименован электромагнитным, вибрационным, лучевым, что затрудняет анализ и восприятие результатов работы.

5. Материал диссертации и автореферата содержит следующие опечатки и неточности в оформлении:

- текстовые опечатки в материале диссертации и автореферата;
- опечатку в номере при описании рисунка в тексте диссертации «на рисунке 5.1» вместо на рисунке 5.4 (с.81);
- опечатку в общем объеме диссертации, указанном в автореферате, «Материал изложен на 124 страницах» вместо на 123 страницах (с.6);
- опечатку в формуле расчета толщины скин-эффекта: « π^2 » вместо 2π (формула 3.7, с.39, диссертация; формула 7, с.11, автореферат);
- ссылки на несуществующие рисунки «фиг.1,2,4,5» (с.86) в диссертации;
- присутствие лишних дублирующих номеров формул в тексте диссертации (номер формулы 3.14, с.43), в тексте автореферата (номер формулы 4, с.11).

В целом, замечания носят локальный, рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно-обоснованные теоретические, технологические и практические решения по созданию и применению технологии комбинированного магнитоимпульсного воздействия при изготовлении и восстановлении высоконагруженных крупногабаритных пустотелых и тонкостенных деталей сложной формы, в том числе с износостойким покрытием, и узлов, сконструированных из них, с применением неразборной или разъемной сборки, с целью обеспечения их гарантированной надежности при сохранении заданных показателей качества при многократном использовании.

Представленная диссертация характеризует автора как грамотного специалиста, способного самостоятельно ставить и решать сложные научные и производственные задачи.

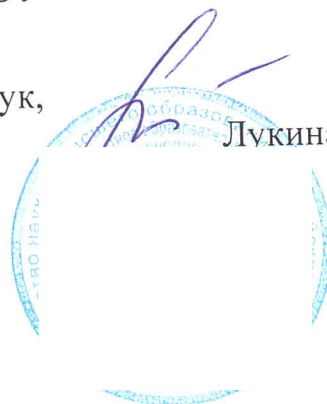
Диссертация на тему «Технология комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий» по своему содержанию

соответствует паспорту специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части пп.2,4,7; удовлетворяет требованиям пп.9-14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 25.01.2024) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Ненахов Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Официальный оппонент:

профессор кафедры экономики и
управления предприятием ФГБОУ
ВО «МГТУ «СТАНКИН»,

доктор технических наук,
профессор



Лукина Светлана Валентиновна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»

127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д.1
(499) 972-95-18, s.lukina@stankin.ru

Докторская диссертация защищена по научной специальности 05.03.01 –
«Процессы механической и физико-технической обработки, станки и
инструмент»

Подпись руки Лукиной С.В. удостоверяю
УД ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Светлой печатью
11.07.2024
Корнилова М.В.