

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Довгалёва Александра Михайловича «Теоретические и технологические основы отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите.

Диссертация Довгалёва А.М. посвящена решению проблемы повышения характеристик качества и эксплуатационных свойств поверхностей нежестких деталей пар трения, изготавливаемых на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь. Для ее решения автором разработан и исследован метод совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем инструмента и импульсно-ударным деформированием. Содержание диссертации соответствует техническим наукам и паспорту специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки, утвержденному Приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 27 мая 2024 г. № 129. Область исследований, согласно паспорту специальности, соответствует пунктам III.1, III.3, III.4, а именно:

III.1. Процессы синтеза или модифицирования структуры и свойств материалов и формирования поверхностей изделий с наложением различных энергетических воздействий и использованием возникающих при этом физических и химических эффектов.

III.3. Механизмы формирования напряженного-деформированного состояния и структурно-фазовых превращений при взаимодействии материалов с инструментом и технологической средой, как при механической обработке, так и при воздействии направленных потоков энергии различной природы, а также при комбинированных воздействиях.

III.4. Теория и практика проектирования, производства и эксплуатации отдельных видов и систем технологического оборудования и инструментов с заданными технико-экономическими показателями для механической и физико-технической обработки, оптимизация компоновки, состава и параметров оборудования и инструментов, в том числе и для специальных видов обработки и послойного синтеза изделий.

Следовательно, диссертация полностью соответствует специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки и отрасли – «Технические науки». Название диссертации в полной мере отражает ее содержание.

2. Актуальность темы диссертации.

На машиностроительных предприятиях Республики Беларусь изготавливается большой ассортимент нежестких деталей машин из ферромагнитных материалов, входящих в состав пар трения, к рабочим поверхностям которых предъявляются высокие требования по точности и качеству обработки, предусматривающих отделочно-упрочняющую обработку их поверхностей для повышения характеристик качества и эксплуатационных свойств. Однако недостаточная жесткость деталей не позволяет использовать для достижения требуемых параметров шероховатости и повышения

*Вх. № 11-52/01
от 03.02.2025*

износостойкости их поверхностей известные методы отделочно-упрочняющей обработки. В связи с этим является актуальным создание новых методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов, отличающихся комбинированным энергетическим воздействием на обрабатываемую поверхность.

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: машиностроение и машиноведение» (Указ Президента Республики Беларусь №156 от 07.05.2020 г.).

Актуальность работы подтверждается проведенными исследованиями, выполненными автором в ходе реализации программ НАН Беларуси по решению важнейших проблем в области естественных и прикладных наук, по заданиям «Повышение эксплуатационных свойств деталей путем наноструктурирования поверхностного слоя совмещенной обработкой концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и динамическим поверхностным пластическим деформированием» и «Исследование и разработка технологии комбинированной модификации поверхностного слоя деталей машин комплексным воздействием вращающимся магнитным полем, импульсно-ударным деформированием и активной технологической средой».

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.

Результаты исследования и научные положения, выносимые на защиту, являются новыми и их новизна заключается в следующем:

- в установлении того, что комбинированное магнитно-силовое воздействие на поверхность нежестких ферромагнитных деталей, осуществляемое вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, обеспечивает получение наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5–4,5 мкм с мелкодисперсной субзеренной структурой наноразмерного диапазона (15–100 нм), характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия в материале слоя, и обеспечивающего кратное повышение износостойкости упрочненных поверхностей;
- в разработке математических моделей процесса совмещенной магнитно-динамической обработки внутренних и наружных цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей и получении соответствующих систем дифференциальных уравнений для расчета кинематических характеристик движения деформирующих шаров в магнитном поле;
- в разработке динамической модели комбинированного инструмента для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности отверстия в нежестких ферромагнитных деталях и получении дифференциального уравнения для расчета величины жесткости связи деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента;
- в разработке математической модели процесса упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой ферромагнитной детали деформирующим шаром при совмещенной магнитно-динамической обработке и получении математических зависимостей для расчета глубины внедрения деформирующего шара в поверхность нежесткой ферромагнитной детали и глубины упрочненного поверхностного слоя;

– в разработке математической модели процесса формирования шероховатости поверхности нежесткой ферромагнитной детали при совмещенной магнитно-динамической обработке и получении математической зависимости для расчета величины шероховатости упрочненной поверхности.

Указанные результаты исследований положены в основу выносимых на защиту положений.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность выводов и рекомендаций обусловлена тем, что они базируются на общепринятых научных положениях и понятиях, не противоречит современным представлениям науки в области отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких деталей, обсуждались на многих международных научно-технических конференциях с участием автора.

Достоверность выводов и рекомендаций подтверждена достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных, апробацией полученных результатов исследований и разработанной технологии совмещенной магнитно-динамической обработки в производственных условиях применительно к упрочнению поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов.

Автореферат и опубликованные работы в достаточной степени отражают содержание диссертации, раскрыты вопросы актуальности, научной новизны, достоверности, практической и экономической значимости работы.

Материалы диссертации и автореферата изложены в соответствии с принятой терминологией, текст диссертации представлен в логической последовательности, иллюстрации в полной мере поясняют основные результаты работы.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Научная значимость заключается в разработке математических моделей процесса совмещенной магнитно-динамической обработки, упругопластической деформации микронеровностей поверхности деформирующим шаром, формирования шероховатости поверхности и получении соответствующих дифференциальных уравнений и математических зависимостей, позволяющих рассчитать кинематические характеристики движения деформирующих шаров в магнитном поле, прогнозировать шероховатость упрочняемой поверхности и глубину упрочненного слоя. Научную значимость имеют также экспериментальные исследования, позволившие установить механизмы снижения исходной шероховатости поверхности, повышения геометрической точности, маслостойкости поверхности, увеличения глубины модифицированного слоя, формирования наноструктурированного поверхностного слоя, повышения износостойкости упрочненных поверхностей.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в разработке новых методов, технологий и средств их технической реализации для различных типов производства на существующем оборудовании машиностроительного производства применительно к отделочно-упрочняющей обработке поверхностей нежестких деталей.

Экономическая значимость результатов исследований подтверждена актами внедрения технологий и операций современной магнитно-динамической обработки на предприятиях машиностроения с фактическим годовым экономическим эффектом, эквивалентным 62 500 долл. США.

Социальная значимость работы заключается в использовании результатов исследований процесса совмещенной магнитно-динамической обработки в учебном процессе Белорусско-Российского университета и в повышении уровня качества подготовки специалистов машиностроительного профиля.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Основное содержание диссертации отражено в 143 научных работах, в том числе одной монографии, 35 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. Одиннадцать работ опубликованы без соавторов. Опубликовано также 42 материала международных научно-технических конференций. По результатам выполнения работы получены 65 патентов Республики Беларусь на изобретения.

Степень опубликованности результатов диссертации в научной печати удовлетворяет требованиям ВАК Республики Беларусь. Все основные результаты, выводы и положения, выносимые на защиту, подтверждены опубликованными материалами.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК РБ.

Диссертация А. М. Довгалева является законченной научно-исследовательской работой, которая выполнена автором самостоятельно, а по объему и содержанию соответствует требованиям главы 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями действующей Инструкцией о порядке оформления диссертации и автореферата диссертации, утвержденной ВАК Республики Беларусь. В диссертации содержатся ссылки на использованные источники и собственные публикации соискателя.

Полученные в диссертации результаты обсуждены на ряде научных конференций различного уровня, опубликованы в профильных научных журналах. Содержание работы, аргументированная интерпретация полученных научных результатов свидетельствуют о высокой научной квалификации А. М. Довгалева и его соответствии ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

8. Замечания по диссертации.

1. С. 21 – При обзоре вариантов отделочно-упрочняющей обработки деталей автор указывает, что метод алмазного выглаживания осуществляют инструментами, *«деформирующие элементы которых изготовлены из сверхтвердых материалов (алмазов, гексанида-Р, эльбора-Р, карбонада и др.) или твердых сплавов»*. Это не совсем корректно, поскольку гексанит-Р, эльбор-Р, карбонадо и твердые сплавы – это не алмазные элементы, а твердые сплавы – не сверхтвердые материалы. Более правильным общим названием метода выглаживания по приведенной схеме с использованием алмазов, КНБ и твердых сплавов было бы выглаживание особо твердым или сверхтвердым материалом.

2. Работа посвящена отделочно-упрочняющей обработке изделий. Одна из важных характеристик процесса упрочнения – твердость материала после обработки. В работе не приводится информация об изменении значения твердости или микротвердости сталей 45, 40Х и чугуна СЧ20, подвергавшихся магнитно-динамическому упрочнению. В таблице 7.2 и Приложении Л приведена информация об увеличении после СМДО микротвердости стали Х12МФ на 30–35 %, стали 45 – на 40%. Однако не указывается, как

проводились измерения микротвердости. Непонятно, почему автор не включил эту информацию в текст диссертации.

3. Не приведена методика определения глубины слоя. Для методов поверхностной упрочняющей обработки параметры слоя (глубина, профиль микротвердости) оцениваются согласно СТБ 2307-2013 «Поверхностно-упрочненные слои металлических изделий. Методы измерения толщины».

4. Разд. 5.4, с. 222 – При СМДО деталей из стали (чугуна) в среде состава: CuSO_4 -глицерин- HCl - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ формируется слой покрытия из «...одновременно упрочняемой меди». Чтобы быть уверенным в том, что медь упрочняется, нужно привести значения её твердости до и после обработки.

5. Разд. 6.2, с. 240 - Приводится полученная оценка остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое образцов из стали 45 величиной -980 МПа, «что косвенно указывает на повышение эксплуатационных свойств поверхности...деталей». Автор как будто высказывает несмелую догадку. Между тем, известно, что наличие остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях металла после различных методов обработки (механических, термических, химико- термических и др.) связано с повышением твердости материала и способствует росту эксплуатационных свойств изделия. Более того, автором в табл. 7.2 и Приложении Л приведены конкретные результаты использования метода СМДО (называемого и операцией, и технологией) для обработки разнообразных деталей, в том числе с повышением их износостойкости до 3-4 раз.

6. При характеристике сформированного при СМДО **поверхностного слоя** и его элементов имеется несогласование формулировок и названий.

Заголовки таблиц 6.9. и 6.10: *Характеристики упрочненного слоя образцов из стали 45 и 40Х*. В подзаголовках таблиц перечисляется, что этот упрочненный слой состоит из еще одного упрочненного слоя, металлического покрытия и наноструктурированного слоя.

Далее в тексте **поверхностный слой** автор называет модифицированным слоем, «который представляет собой расположенные друг за другом *металлическое покрытие, наноструктурированный слой...и мелкодисперсный субзеренный слой*».

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Масштаб решаемых в диссертационной работе задач, их интерпретация и заключение по работе, указывают на высокий профессиональный уровень автора в области отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких деталей и свидетельствует о том, что научная квалификация Довгалёва Александра Михайловича соответствует ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

10. Заключение.

Диссертация Довгалёва А.М. на тему «Теоретические и технологические основы отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов» представляет собой законченную научно-исследовательскую практико-ориентированную, самостоятельно выполненную работу, посвященную решению научно-производственной задачи – разработке теоретических и технологических основ нового метода отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов, позволяющего совместить во времени процессы магнитной обработки и импульсно-

ударного деформирования, обеспечивающего комбинированное магнитно-силовое воздействие на поверхностный слой детали и повышение его механических характеристик и эксплуатационных свойств. Диссертация имеет высокий уровень научной новизны, содержит оригинальные технические решения для реализации процесса совмещенной магнитно-динамической обработки на существующем металлообрабатывающем оборудовании, защищенные патентами на изобретения.

Диссертация отвечает требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к докторским диссертациям. Довгалёву Александру Михайловичу может быть присуждена ученая степень доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки за установленные новые научно обоснованные результаты исследований, **включающие:**

- математические модели процесса совмещенной магнитно-динамической обработки внутренних и наружных цилиндрических поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов, учитывающие движение деформирующих и приводных шаров в постоянном или переменном магнитном поле, создаваемом магнитной системой инструмента и намагниченным поверхностным слоем детали, полученные соответствующие системы дифференциальных уравнений для расчета кинематических характеристик движения деформирующих шаров в магнитном поле, позволивших установить взаимосвязь кинематических характеристик движения деформирующих шаров в магнитном поле с параметрами комбинированного инструмента и режимами процесса совмещенной обработки;

- динамическую модель комбинированного инструмента для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности отверстия в нежесткой детали из ферромагнитного материала, отличающуюся учетом связи деформирующих шаров, расположенных в кольцевой камере, с магнитной системой инструмента, количества и углового расположения источников магнитного поля, дополнительного магнитного воздействия на поверхностный слой детали, полученное дифференциальное уравнение для расчета величины жесткости магнитной связи деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента, позволившую установить взаимосвязь указанного параметра с величиной действующей на деформирующие шары магнитной силы, создаваемой цилиндрическими постоянными магнитами из редкоземельных материалов;

- математическую модель процесса упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой детали из ферромагнитного материала деформирующим шаром при совмещенной магнитно-динамической обработке, учитывающую комбинированное магнитно-силовое воздействие на поверхность детали, полученную математическую зависимость для расчета глубины внедрения деформирующего шара в поверхность детали, позволившую установить взаимосвязь глубины внедрения деформирующего шара с параметрами комбинированного инструмента и режимами процесса совмещенной обработки;

- математическую модель процесса формирования шероховатости поверхности нежесткой детали из ферромагнитного материала при совмещенной магнитно-динамической обработке, учитывающую комплексное магнитно-силовое воздействие, полученную математическую зависимость для расчета величины шероховатости обработанной поверхности;

- экспериментальные исследования влияния параметров и режимов процесса совмещенной магнитно-динамической обработки на качество поверхностного слоя жестких деталей из ферромагнитных материалов, позволившие установить снижение исходной шероховатости поверхности деталей по параметру Ra с 6,3–0,40 мкм до 0,6–0,08 мкм, повышение геометрической точности обработки на 10–27 % и удельной маслосъемкости поверхности в 1,4–2,8 раза, упрочнение поверхностного слоя на глубину 10–25 мкм, увеличение глубины модифицированного поверхностного слоя в 1,6–3,1 раза, формирование наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5–4,5 мкм с мелкодисперсной субзеренной структурой наноразмерного диапазона (15–100 нм), обеспечивающих в совокупности повышение износостойкости упрочненных поверхностей жестких деталей из ферромагнитных материалов в 3,8–4,9 раза.

Разработанная технология совмещенной магнитно-динамической обработки внедрена в производство на шести машиностроительных предприятиях (с фактическим годовым экономическим эффектом, эквивалентным 62,5 тыс. долл. США) и учебный процесс Белорусско-Российского университета.

Официальный оппонент:
начальник отдела электронно-лучевых
технологий и физики плазмы
Государственного научного учреждения
«Физико-технический институт НАН Беларуси»,
доктор технических наук, профессор

И.Л. Поболь

Подпись И.Л. Поболя удостоверяю:
Учетный секретарь Государственного научного учреждения
«Физико-технический институт НАН Беларуси»,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Басалай

Поступил в совет

03.02.2025

Любчик А.К.

с отзывом ознакомлен

03.02.2025

Генерал А.М. Довалев