

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 к защите в совет Д 02.05.03 при БНТУ 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 качества поверхностей нежестких деталей машин путем создания новых способов, инструментов и технологий отделочно-упрочняющей обработки, основанных на комбинированном механическом и магнитном воздействии. По решаемым задачам и объектам исследований, полученным результатам, основным выводам и положениям, выносимым на защиту, диссертация соответствует отрасли технических наук и специальности 05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки паспорта, утвержденного приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 27 мая 2024г. № 129, по следующим признакам:

– предмет исследования соответствует пункту II формулы специальности «процессы синтеза, формирования структуры и свойств поверхностных слоев изделий путем интенсивного механического воздействия, воздействия физических полей различной природы или их комбинации»;

– область исследований соответствует пунктам 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» и 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».

2. Актуальность темы диссертации.

Большинство деталей изделий машиностроения работают в условиях коррозионно-абразивного изнашивания, а также воспринимают ударные нагрузки. Способность материалов деталей противостоять разрушению зависит, прежде всего, от свойств и состояния поверхностного слоя, который наиболее подвержен внешним воздействиям. С повышением скоростных и силовых параметров машин интенсивность протекания процессов разрушения материала деталей значительно возросла. Поэтому за последние годы интенсивно развиваются технологии упрочнения металлов, основанные на использовании концентрированных в пространстве и во времени потоков энергии лучевых и электрофизических полей.

Машиностроение располагает достаточно большим количеством технологий упрочнения поверхностей деталей. Рациональное сочетание материалов трущихся деталей и методов их упрочнения позволяет обеспечивать комплекс физико-механических характеристик поверхностных слоев, соответствующий эксплуатационным требованиям в конкретных условиях работы. Наиболее перспективными являются технологии, основанные на использовании лучевой и магнитной энергий, являющихся естественным неисчерпаемым источником. Эти технологии развиваются быстрыми темпами в силу наличия задела по еще не реализованным возможностям. Вместе с тем, накопленный опыт показывает, что не существует универсальных методов упрочнения поверхностей, обеспечивающих требуемые физико-механические свойства материалов применительно к разнообразным условиям эксплуатации. Из-за многообразия условий работы машин ни один из известных способов упрочнения поверхностей деталей не может претендовать на универсальность. Каждый способ имеет свою конкретную область рационального применения, и многие из них исчерпали свои возможности в плане обеспечения предъявляемых требований. Поэтому разрабатывают технологии, основанные на совмещении различных методов формирования микропрофиля поверхностей и способные создавать в поверхностном слое градиентные структуры функционального назначения, удовлетворяющие по основным физико-механическим свойствам эксплуатационным требованиям. Такие технологии обеспечивают экономию материальных затрат, так как для изготовления нежестких деталей могут использоваться дешевые конструкционные стали. Это особенно важно для условий Республики Беларусь, когда металл приобретает за рубежом.

Исходя из изложенного, тема диссертации Довгалёва А.М., посвященная исследованию и разработке теоретических и технологических основ процесса совмещенного импульсно-ударного деформирования поверхностных слоев металлических изделий и магнитного упрочнения, является актуальной и имеет важное научное и народнохозяйственное значение.

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

Полученные в диссертации основные результаты исследований и научные положения, выносимые на защиту, являются новыми. Их новизна состоит в следующем:

– в разработке концепции и теоретическом обосновании технологии совмещения импульсно-ударного деформирования поверхностных слоев нежестких деталей из ферромагнитных материалов и магнитного упрочнения, при которой на поверхностный слой детали многократно воздействуют деформирующимися шарами с частотой (230–850) Гц и одновременно вращающимся магнитным полем с индукцией (0,05–1,2) Тл и периодически изменяющимся направлением магнитных силовых линий, что *активирует* процессы формирования в поверхностных слоях деталей мелкодисперсной структуры, способствующей повышению их износостойкости;

– в разработке физико-математических моделей

- движения деформирующих шаров в магнитном поле рабочей зоны инструмента,

- динамической связи деформирующих шаров с магнитной системой инструмента с учетом количества и углового расположения в нем источников магнитного поля,

- упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой детали из ферромагнитного материала,

- формирования шероховатости поверхности при совмещенной магнитно-динамической обработке,

что *позволило* определить кинематику и технологические режимы движения деформирующих шаров, действующие на них силы со стороны магнитной системы инструмента, рассчитать глубину внедрения деформирующего шара в упрочняемую поверхность и глубину упрочненного слоя, прогнозировать величину шероховатости упрочняемой поверхности;

– в экспериментально полученных зависимостях геометрической точности и шероховатости поверхности детали от параметров процесса совмещенного упрочнения импульсно-ударным деформированием поверхностного слоя и магнитным упрочнением, *позволивших* установить повышение геометрической точности обработанных поверхностей на (10–27) %, снижение исходной шероховатости поверхности по параметру Ra с (6,3–0,4) мкм до (0,60–0,08) мкм. Экспериментально установлено, что наибольшая деформация исходных микровыступов на поверхности происходит при первом проходе инструмента, а количество рабочих ходов не должно быть более трех;

– в результатах экспериментальных исследований показателей качества упрочненного поверхностного слоя, впервые проведенных для процесса магнитно-динамической обработки, *позволивших* установить глубину упрочненного поверхностного слоя (10–25) мкм, увеличение глубины модифицированного поверхностного слоя в (1,6–3,1) раза, глубину

наноструктурированного поверхностного слоя (1,5–4,5) мкм с мелкодисперсной субзеренной структурой в диапазоне (15–100) нм, плотность дислокаций остаточных напряжений сжатия до 1162 МПа, что в совокупности *обеспечило* повышение износостойкости упрочненных поверхностей в (3,8–4,9) раза.

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

Основные выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, отражают результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые базируются на общие положения теоретической механики, физики, металловедения, теории колебаний и удара, технологической наследственности. Результаты исследований представлены в виде математических зависимостей, графиков, профилограмм, рисунков, таблиц, фотографий микроструктур.

Обоснованность полученных результатов аргументирована тем, что они не противоречат современным представлениям об изучаемых процессах в таких областях науки, как физико-техническая обработка материалов, структурно-фазовые превращения при упруго-пластическом деформировании металлов, электромагнетизм. Основные выводы диссертации обсуждались на научно-технических конференциях при участии автора, что дает основания полагать отсутствие в них противоречий с известными исследованиями в смежных областях.

Достоверность заключительных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается использованием апробированных методик теоретических и экспериментальных исследований, применением прогрессивных методов исследования, современных приборов и оборудования, методов математического планирования экспериментов, а также анализа их результатов и сравнения их с ранее достигнутыми, достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных, результатами производственной апробации разработанных инструментов и технологических процессов. Выводы и рекомендации по результатам проведенных исследований согласуются с фундаментальными положениями технологии машиностроения, физики твердого тела, металловедения.

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

Научную значимость представляют:

– физико-математические модели движения деформирующих шаров в магнитном поле рабочей зоны инструмента и дифференциальные уравнения, *позволившие* рассчитать кинематические характеристики этого движения, и динамической взаимосвязи деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента, устанавливающей величину действующей на

деформирующие шары магнитной силы, создаваемой источниками магнитного поля комбинированного инструмента в зависимости от количества и углового расположения в нем источников магнитного поля;

– математические зависимости глубины внедрения деформирующего шара в упрочняемую поверхность, глубины упрочненного поверхностного слоя от параметров комбинированного инструмента и технологических режимов, а также механизм формирования шероховатости поверхности при совмещенной магнитно-динамической обработке, что *позволяет* производить расчет и прогнозировать глубину упрочненного слоя, величину шероховатости упрочняемой поверхности в зависимости от конструктивных параметров инструмента, высоты исходной шероховатости упрочняемой поверхности и технологических режимов;

– экспериментально полученные зависимости геометрической точности, шероховатости и удельной маслостойкости поверхности деталей от параметров процесса совмещенного упрочнения импульсно-ударным деформированием поверхностного слоя и магнитным упрочнением, *позволившие* установить повышение геометрической точности обработанных шлифованием поверхностей на (10–27) %, снижение исходной шероховатости поверхности по параметру Ra с (6,3–0,4) мкм до (0,60–0,08) мкм и удельной маслостойкости поверхности в (1,4–2,8) раза;

– результаты экспериментальных исследований, на основании которых *установлено* получение наноструктурированного поверхностного слоя глубиной (1,5–4,5) мкм с мелкодисперсной субзеренной структурой наноразмерного диапазона (15–100) нм, характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия, обуславливающего повышение износостойкости упрочненных поверхностей нежестких ферромагнитных деталей в (3,8–4,9) раза при совмещенной магнитно-динамической обработке.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в разработке на основе проведенных исследований новых технологий и инструментов для упрочнения поверхностей нежестких деталей и возможности ее использования на металлообрабатывающем оборудовании в машиностроительном производстве, что позволяет существенно повысить их износостойкость

Экономическая значимость результатов диссертации подтверждается прилагаемыми актами внедрения разработанной технологии на промышленных предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации с фактическим суммарным годовым экономическим эффектом, эквивалентным 62 500 долларов США.

Социальная значимость результатов работы заключается в их использовании в учебном процессе межгосударственного образовательного учреждения высшего образования "Белорусско-Российский университет" и возможности получения студентами новых знаний в области упрочняющих методов обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных

материалов, что повышает уровень подготовки инженеров машиностроительного профиля.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Основные положения диссертации нашли отражение в 143 научных публикациях, в том числе: монография – 1; 35 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикаций результатов диссертационных исследований; 42 тезиса докладов на научно-технических конференциях; 65 патентов на изобретение. Это соответствует требованиям п. 19 «Положения о присуждении ученых степеней и ученых званий в Республике Беларусь».

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями Инструкции «О порядке оформления диссертации и автореферата», утвержденной Постановлением ВАК Республики Беларусь от 28.02.2014 № 3, в редакции от 22.08.2022 № 5), содержит качественно выполненные рисунки, диаграммы, профилограммы, таблицы, фотографии микроструктуры и топографии упрочненных поверхностей, раскрывающие достаточно полно сущность излагаемого материала. В диссертации приведены ссылки на используемые материалы и на собственные публикации соискателя. По каждой главе и работе в целом сделаны выводы.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

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

Уровень решенных в диссертации актуальной проблемы и научных задач характеризует ее автора как сложившегося специалиста в области упрочняющей обработки металлов, способного ставить и решать соответствующие научные и прикладные задачи, обобщать и анализировать полученные результаты. Это 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».

9. Замечания по диссертации.

1. На с.17 (третий абзац) приведены цифры, что в машиностроении от всех изготавливаемых деталей 45% составляют «тела вращения», 40% из которых нежесткие детали. Из какого источника взяты эти данные, не указано и не приведены критерии, по которым производилась оценка жесткости деталей.

2. В главе 1 проблемы отделочно-упрочняющей обработки поверхностей не раскрыты в полной мере. Приведен результат анализа существующих методов, отмечены их достоинства и недостатки, а выводы не содержат

сравнительного анализа их энергетического воздействия для жестких и нежестких деталей по критериям допустимой величины деформации, показателям качества и производительности. Следовало бы привести более подробный анализ родственных методов жестко-упругого выглаживания поверхностей нежестких деталей, в частности, наноструктурирующего алмазного выглаживания с управлением контактным давлением (труды Смелянского В. М., Кузнецова В. П.), а также раскрыть проблемы вибрационной обработки (труды Бабичева А.П., научная школа «Вибротехнология»).

3. Нельзя согласиться с соискателем в том, что динамические силы деформирования не вызывают остаточных деформаций при упрочнении (раздел 1.3, 1-е и 2-е предложения, с.47-48), поскольку ударное воздействие на металл способно не только пластически его деформировать, но и разрушить.

4. Механизмы и технологии формирования шероховатости поверхности и глубины упрочненного слоя при воздействии деформирующим шариком известны, поэтому вызывает сомнение о необходимости математического моделирования этих процессов, поскольку окончательный выбор технологических режимов, как правило, производится по результатам экспериментов.

5. При разработке математической модели механической системы принятые допущения в части магнитного взаимодействия ее ферромагнитных элементов и источников магнитных полей не аргументированы. Для обоснования правомерности указанных на с. 58 допущений следовало бы построить топографию магнитного поля для принятой на рис. 2.1 схемы инструмента, определить величины градиента магнитной индукции и направление его вектора в узловых точках, пользуясь для этого существующими компьютерными программами расчета магнитных полей методом конечных элементов и построения сетки магнитных потоков. При таком подходе картина распределения плотности магнитного потока, показанная на рис. 3.1, может быть другой, так как компьютерный расчет может учитывать суперпозицию магнитных полей.

6. При оптимизации технологических режимов (раздел 5.3) следовало бы при многофакторном планировании в число независимых переменных включить подачу инструмента, поскольку она является одним из главных параметров, определяющих плотность сопряжения множества отпечатков деформирующих шаров и, следовательно, шероховатость поверхности.

7. В диссертации не приведены величины допустимых давлений в зоне контакта инструмента и заготовки для жестких и нежестких деталей. Следовало бы выделить граничные условия и привести значения соответствующих технологических режимов с учетом количества проходов, а также их критические величины, при которых может возникнуть перенаклеп, т.е. разрушение кристаллической решетки в поверхностном слое заготовки, сопровождаемое шелушением и отслаиванием частичек металла.

8. Процесс импульсно-ударного деформирования поверхностей сопровождается вибрациями. Известно, что вибрации интенсифицируют процесс размагничивания постоянных магнитов. В диссертации фактор размагничивания постоянного магнита при исследованиях не учитывался. Неизвестно, как это влияет на стабильность процесса упрочнения.

9. Издержки оформления и пунктуационные ошибки:

- в разделе 1.2 диссертации на с. 40 соискатель со ссылкой на использованные источники (поз. 84 и 85) отмечает, что впервые применение энергии магнитного поля для динамического деформирования поверхности отверстия предложено в 2012г., а реализован этот новый метод в 1993г., т.е. на 19 лет раньше. В таком случае логично предположить, что название методов допускает неоднозначное их толкование, и в указанных источниках не учитывалось отличие в физической сущности между магнитно-динамической обработкой и совмещенной магнитно-динамической обработкой. Поэтому по результатам анализа методов отделочно-упрочняющей обработки было бы целесообразным классифицировать их по виду энергетического воздействия, способам технической реализации и т.п. Это способствует систематизации названий методов и способов в соответствии с ГОСТ 18296-72 и однозначному толкованию их физической сущности при совмещении;

- на с.56, 57 отмечается, что разработка математических моделей является актуальной. Актуальной может быть поставленная задача, а математическая модель – это средство решения задачи;

- непонятно пересечение на рис. 4.2 кривых 1, 2, 4, 5 в одной точке, если учесть, что каждое направление измерений имеет свою точку отсчета;

- в п.1 выводов по главе 3 отмечено, что совмещенная магнитно-динамическая обработка обеспечивает получение на поверхности ферромагнитной детали упрочненного антифрикционного наноструктурированного поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами. Однако в главе 3 такие экспериментальные исследования не проводились, а они приведены в главе 6;

- имеется ряд опечаток, например, на с. 45 в названии абзаца пропущено слово «цилиндрических», на с. 284 (поз.57) – слово «поверхности» излишнее, на с.46 первое предложение является излишним, на рис. 2.1, 2.4, 2.7 и др. должны быть нанесены осевые линии цилиндрических магнитов, на с.162 (первый абзац) термин «удельное давление» неприемлем, на с.43 последний абзац термин «продольная ось отверстия» и др.

10. Заключение.

Диссертация Довгалёва А.М. на тему «Теоретические и технологические основы отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов» является законченной научно-исследовательской работой. Она посвящена решению важной научно-технической задачи – разработке теоретических и технологических основ создания новых технологических процессов

упрочнения поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов, позволяющих повысить их физико-механические и эксплуатационные свойства, содержит новые обоснованные научные положения и достоверные результаты.

В соответствии с пп. 20 и 21 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий ВАК Республики Беларусь» 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 теоретические и экспериментальные результаты исследований, **включающие:**

- разработку концепции, научных принципов и технологических способов повышения качества поверхностного слоя нежестких деталей из ферромагнитных материалов, *отличающихся* совмещением процессов упрочнения поверхностного слоя импульсно-ударным деформированием и магнитным упрочнением, при котором на поверхностный слой детали с частотой (230–850) Гц воздействуют деформирующимися шарами диаметром (6–20) мм из ферромагнитных материалов и одновременно вращающимся магнитным полем, постоянным или переменным (с периодически изменяющимся направлением магнитных силовых линий) с индукцией (0,05...1,2) Тл, что *позволило* активировать процессы модифицирования поверхностного слоя на глубине до 25 мкм, сформировать на глубине до 4,5 мкм градиентную мелкодисперсную субзеренную структуру наноразмерного диапазона (15...100) нм, увеличить плотность дислокаций в (1,1...1,2) раза и величину остаточных напряжений сжатия в (1,1...1,5) раза, повышающих износостойкость поверхностей деталей машин;

- физико-математические модели движения деформирующих шаров в магнитном поле рабочей зоны инструмента, *основанные* на теории машин и механизмов, законах теоретической механики, малых колебаний механических систем и электромагнетизма, *отличающиеся* расчетом кинематики движения деформирующих шаров и динамической взаимосвязи их с магнитной системой комбинированного инструмента, *позволившие* получить соответствующие системы дифференциальных уравнений, по которым *рассчитать* необходимую величину действующей на деформирующие шары силы магнитного поля, создаваемой расположенными в инструменте магнитами в зависимости от их количества и расположения, и *разработать* конструкции новых комбинированных инструментов для упрочнения цилиндрических и плоских поверхностей;

- экспериментальные зависимости влияния технологических параметров совмещенной магнитно-динамической обработки стали 45 на увеличение диаметра отверстий нежестких деталей в диапазоне (8...22) мкм, на снижение исходной шероховатости поверхности по параметру Ra для деталей из стали 45 с (6,3...0,4) мкм до (0,60...0,08) мкм, из серого чугуна СЧ20 с (3,2...0,4) мкм до (0,60...0,09) мкм, *позволившие* определить

оптимальные значения параметров процесса упрочнения поверхностей деталей и *прогнозировать* их величины из диапазонов частоты n вращения инструмента – (1600...4050) мин⁻¹, подачи S – (20...160) мм/мин, магнитной индукции B – (0,1...0,6) Тл, диаметра деформирующих шаров $d_{ш}$ – (6...20) мм, например, для отверстий Ø110 мм деталей из стали 45: $n = 4050$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин; $B = 100$ мТл; $d_{ш} = 11,5$ мм,

что в совокупности позволило разработать основы создания новых энергосберегающих технологий упрочнения поверхностей деталей и комбинированных инструментов, увеличивающих глубину модифицированного поверхностного слоя в (1,6...3,1) раза и износостойкость упрочненных поверхностей в (3,8...4,9) раза, внедрить на 7-ми предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации с суммарным экономическим эффектом в эквиваленте 62,5 тыс. долл. США.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии металлов
Белорусского государственного аграрного
технического университета, г. Минск



Л. М. Акулович



Поступил в совет
05.02.2025
ут. секрет совета
Акулович О.К.