

ОТЗЫВ

официального оппонента Яресько С.И. на диссертацию Морозова Евгения Александровича «Исследование влияния параметров лазерной термической обработки на структуру и свойства порошковых сталей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных источников из 113 наименований и трех приложений. Основная часть работы выполнена на 110 страницах, включая 40 рисунков и 10 таблиц.

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Среди существующих технологических методов повышения ресурса и обеспечения износостойкости поверхностей деталей механизмов и узлов трения можно выделить химико-термические методы, методы объемной термообработки, электрохимические, механотермические методы, наплавку износостойких слоев, напыление покрытий различного типа, ионно-плазменную обработку, механическое упрочнение и др. Эти методы в значительной мере обеспечивают повышение ресурсных и эксплуатационных характеристик деталей машин и механизмов и узлов трения различного назначения.

При этом следует отметить, что возможности традиционных методов инженерии поверхностей с целью повышения уровня эксплуатационных характеристик и свойств материалов в значительной степени исчерпаны. Эта задача не может быть решена одной модификацией исходного состава материала, например, его объемным легированием, хотя это и приводит к улучшению ряда эксплуатационных показателей сталей и сплавов. Такой путь развития машиностроения ориентирован на использование значительных количеств дефицитных материалов. В ряде случаев целевая задача повышения ресурса конкретного изделия не предусматривает качественной модификации структуры используемого материала во всем его объеме, а решается путем применения методов поверхностного упрочнения. В диссертационной работе Морозова Е.А. рассматривается применение поверхностной упрочняющей лазерной обработки для повышения износостойкости псевдосплавов системы железо-медь, что находится в соответствии с представлениями о природе технического ресурса, согласно которым повышение уровня износостойкости деталей машин и механизмов связано не столько с увеличением твердости контактирующих поверхностей, сколько с возможностью управления их физико-химическими свойствами в зависимости от интенсивности механического износа при изменении характера нагружения.

С другой стороны, повышение надежности и долговечности изделий ма-

шиностроительного комплекса, рост износных и коррозионных характеристик деталей возможны с применением новых конструкционных материалов с особыми физико-механическими свойствами, в том числе и получаемых методами порошковой металлургии. Для таких материалов, как и для сталей, полученных традиционными способами, актуально применение упрочняющих технологий, позволяющих целенаправленно регулировать свойства поверхности.

Тема диссертационной работы Морозова Е.А. отвечает важной проблеме – повышению износостойкости порошковых углеродистых и инфильтрованных медью сталей на основе использования технологий лазерной термообработки. Потребность в разработке новых и совершенствовании существующих технологий упрочнения определяет тенденции к снижению интенсивности изнашивания деталей, изготовленных методами порошковой металлургии, и повышения стабильности их характеристик.

Распространение и оптимизация методов лазерной упрочняющей обработки на порошковые углеродистые стали и псевдосплавы системы Fe-Cu заслуживает несомненного одобрения и определяет актуальность диссертационной работы. При этом нельзя не отметить сложность и многофакторность данной задачи, так как при ее решении необходимо учитывать особенности порошковых материалов, такие как пористость и неоднородность химического состава, структуры и свойств.

В диссертационной работе использованы современные методы физического металловедения и триботехники, что позволило автору достаточно подробно в рамках достижения поставленной цели исследовать взаимодействие лазерного излучения с гетерофазными псевдосплавами и разработать рекомендации по лазерной обработке порошковых сталей.

Актуальность работы также определяется востребованностью разработанных методов и подходов на машиностроительных предприятиях, использующих изделия из порошковых сталей, работающие в условиях гидроабразивного износа. Значимость работы подтверждается реализацией ее результатов в учебном процессе по специальностям 15.03.01 «Машиностроение» (бакалавриат) и 15.04.01 «Машиностроение» (магистратура) для подготовки высококвалифицированных специалистов технологов машиностроительного профиля. В целом диссертационное исследование Морозова Е.А. ориентировано на разработку новых перспективных технологических процессов повышения эксплуатационных характеристик изделий из порошковых сталей, совершенствование научно-производственной базы, обеспечивающей проведение комплексных диагностических исследований свойств и характеристик материалов.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации обоснованы автором в достаточной степени. Они базируются на корректном применении апробированно-

го в науке и технике математического аппарата многофакторного планирования физического эксперимента, теории вероятностей и математической статистики, конечно-элементного моделирования, теории теплопроводности, экспериментальных методов физического металловедения и анализа поверхности (металлографии и электронной микроскопии) и триботехники.

Автором выполнены экспериментальные исследования по выбору режимов лазерной обработки спеченных сталей ПА-ЖГр с различной пористостью и инфильтрованной медью стали ПА-ЖГрД15. Сделанные в заключение 3^{ей} главы выводы обоснованно подтверждаются результатами металлофизическими исследованиями структуры сталей после лазерной обработки, результатами дюрометрических испытаний и энергодисперсионного анализа. Таким образом, автор получил обоснованные выводы и рекомендации по упрочняющей лазерной обработке порошковых сталей излучением непрерывного волоконного лазера без образования трещин в зоне термического влияния. Выполненные эксперименты показали целесообразность применения лазерной обработки для упрочнения изделий из сталей ПА-ЖГр и ПА-ЖГрД15 и послужили основой для разработки технологии упрочнения буртов осевых подшипников (снижение скорости износа подтверждено результатами производственных испытаний).

В главе, посвященной анализу трибологических характеристик упрочненных псевдосплавов, примененный комплекс для гидроабразивных испытаний и полученные экспериментальные данные позволили рекомендовать обработку непрерывным излучением волоконного лазера в качестве эффективного метода упрочнения сплавов.

При моделировании процесса лазерной термической обработки максимально подробно в рамках используемого пакета инженерных расчетов COMSOL Multiphysics проанализирован нагрев порошковых сталей с учетом особенностей их строения. При этом автором предпринята попытка расчета теплового поля в зоне лазерной обработки с учетом реально существующих механизмов теплопередачи и фазовых переходов в материале при его нагреве. Это позволило ему получить достоверные данные о распределении температуры в зоне нагрева, коррелирующие с результатами металлографического анализа.

Результаты, полученные с использованием современных методов физического материаловедения и анализа поверхности, не вызывают сомнений. Выводы и рекомендации подтверждены проведенными натурными экспериментами по изучению процесса изнашивания изделий из порошковых сталей и испытаниями деталей в производственных условиях после упрочнения на рекомендованных режимах лазерной обработки.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, следующих из экспериментальных данных по изучению структуры, фазового состава и свойств сплавов, доказана корректным применением апробированных методов испытаний. Сделанные в диссертационной работе выводы не противоречат из-

вестным результатам по применению упрочняющих технологий (например, лазерной термообработки литых углеродистых, конструкционных, инструментальных сталей и сплавов).

Все научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, подтверждены публикациями в ведущих по данной научной специальности рецензируемых журналах: «Металловедение и термическая обработка металлов», «Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия», «Известия Самарского научного центра РАН», СТИН (Russian Engineering Research).

Практической реализацией разработок автора стали рекомендации по применению технологий лазерного упрочнения в производство. Это доказывает обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сделанных автором в диссертационном исследовании.

3. Оценка новизны и достоверности

Диссертационная работа содержит совокупность новых научных положений, которые систематизированы в диссертации и автореферате в виде перечня основных результатов. Достоверность этих результатов подтверждается реализацией разработанных рекомендаций по технологии лазерной термической обработки порошковых сталей в производственных условиях, существенным объемом экспериментальных данных, использованием современных апробированных методик анализа материалов и трибологических свойств сталей, корректностью обработки и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, результатами производственных испытаний осевых подшипников электрических центробежных насосов.

Согласно тексту диссертации и автореферата новизна наиболее важных научных результатов, полученных в работе, состоит в следующем:

1. Установлены закономерности формирования зон упрочнения в порошковых углеродистых сталях ПА-ЖГр с различной пористостью и инфильтрованной медью стали ПА-ЖГрД15 в результате лазерной термообработки непрерывным излучением волоконного лазера и предложены механизмы их формирования. Установлены структуры зон, отличающиеся от структуры зон лазерного влияния в литых сталях, определены их основные характеристики (глубина, микротвердость) при вариации режимов лазерной обработки. Экспериментально найдены режимы лазерной обработки, позволяющие избежать образования трещин в зоне термического влияния. По данным металлофизических исследований и анализа топографии поверхности зон обработки предложен механизм формирования зоны полного оплавления и достижения наибольшей глубины упрочненного слоя. Предложенное объяснение не противоречит известным механизмам структурообразования при лазерной термообработке литых сталей различного назначения.

2. Выявлены закономерности формирования геометрических характеристик зоны упрочнения. Установлена зависимость глубины зоны упрочнения от комплексного параметра $\frac{P}{(d \cdot V)^{0,4}}$ для сталей с различной пористостью, имеющая практически линейный характер, что позволяет прогнозировать глубину зоны упрочнения с изменением параметров лазерной обработки.

3. Разработана конечно-элементная модель для расчета температурного поля в зоне лазерного воздействия при обработке порошковых сталей излучением непрерывного поверхностного источника, движущегося с постоянной скоростью.

Научная новизна перечисленных выше результатов подтверждается патентом на полезную модель и публикациями в рецензируемых журналах по специальности (всего 13 публикаций, включая 7 статей из «Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук», 4 из которых опубликованы в изданиях баз данных Web of Science и Scopus). Результаты работы, в том числе и представляющие ее научную новизну неоднократно обсуждались на профильных конференциях и получили одобрение специалистов.

4. Практическая значимость результатов работы

Практическая ценность диссертационного исследования определяется следующими результатами:

1. Разработана методика выбора режимов лазерной обработки углеродистых литых и порошковых сталей, обеспечивающих заданный уровень микротвердости и глубины упрочненного поверхностного слоя, и ее графическое представление.

2. Достигнуты высокие износные характеристики псевдосплавов системы железо-медь после лазерной обработки в условиях гидроабразивного износа.

3. Разработаны рекомендации по назначению технологических режимов лазерной упрочняющей обработки осевых пар трения электрических центробежных насосов, изготовленных из стали ПА-ЖГрД15, обеспечивающие их высокую работоспособность. Производственные испытания деталей из порошковой стали ПА-ЖГрД15 после лазерной обработки показали существенное снижение скорости гидроабразивного износа осевого подшипника до 6,5 раз и среднего износа бурта на 17-35 %.

4. Предложенное техническое решение по реализации технологии лазерной термической обработки деталей из порошковых сталей защищено патентом РФ на полезную модель «Направляющий аппарат ступени погружного многоступенчатого электроцентробежного насоса».

5. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Основные положения диссертационной работы с достаточной полнотой отражены в автореферате. Он содержит все научные положения, изложенные в диссертации, и раскрывает ее сущность.

6. Общие замечания по диссертационной работе

Все замечания по диссертационной работе Морозова Е.А. можно разделить на несколько групп. К первой группе относятся замечания методического характера, а именно:

1. Диссертационная работа построена методически некорректно, ссылки на ранее опубликованные статьи автора (без конкретизации результатов) затрудняют понимание сути диссертационной работы, которая сама по себе должна быть сосредоточением полученных результатов и их интерпретацией в свете имеющихся представлений о процессах, происходящих при лазерной обработке порошковых сталей. Логичнее было бы излагать вопросы по существу согласно плану и как подтверждение того, что эти данные опубликованы, приводить ссылки на работы автора.
2. Отсутствует полноценный сравнительный анализ с другими методами поверхностной обработки сталей и сплавов, в том числе и порошковых сталей. Приведенные данные не в полном объеме отражают состояние дел в области упрочняющей обработки порошковых материалов. Обращаясь к предыдущим работам в этой области можно отметить, например, диссертацию Блиновского В.А. «Физические и технологические основы методов термического упрочнения порошковых спеченных сталей» (1999, Ростов-на-Дону), где приведен весьма исчерпывающий, на тот момент времени, список работ по данной тематике. Приведенный автором список известных работ из 4-х публикаций, посвященный лазерной обработке порошковых сталей нельзя считать достаточно полным.
3. Логичнее было бы автору сначала представить результаты конечно-элементного моделирования температурного поля, затем полученные результаты проверить экспериментально. В диссертации выполненный расчет и его результаты представляют самостоятельное исследование, практически не связанное с результатами экспериментальных работ.

Вторая группа замечаний – это замечания по существу:

4. К сожалению, многие экспериментальные результаты носят чисто феноменологический характер, практически не вскрываются причин наблюдаемых явлений и процессов.
5. Некорректность в составлении плана многофакторного эксперимента. В отдельных случаях неправильная трактовка основных положений ПФЭ. Обратимся к конкретным примерам. Табл. 2 (стр. 37) план составлен не верно. Где ПФЭ

для линейной модели? Проверка линейной модели на адекватность? Оценка значимости коэффициентов регрессии? Если это все было, то где результаты расчета? Все данные должны быть в работе, хотя бы в приложении. Табл. 6 (стр. 56) как получены данные в последнем столбце? На основании каких соображений были выбраны значения мощности лазерного излучения, диаметра пятна в зоне обработки и скорости движения луча (эта же таблица 6). Далее: уравнение (10) на стр. 55. Проверка адекватности по критерию Фишера. Где? Это уравнение для кодированных значений факторов или натуральных? не понятно? и т.д. практически по каждому моменту, связанному с применением многофакторного эксперимента в диссертационном исследовании. В итоге возникает вопрос: для чего вообще проводился многофакторный эксперимент? Выводы, рекомендации на его базе отсутствуют. Некое недоумение вызывает факт отсутствия ссылок на основополагающие работы в области применения многофакторного эксперимента, в частности в технологии машиностроения. Прежде всего, это работы: Адлера Ю.П., Горского В.Г., Душинского В.В., Налимова В.В., Хартмана К. и др. При этом рекомендации по проведению многофакторного эксперимента, приведенные в указанной в диссертации ссылке, не соблюдаются.

6. Ничего не сказано в работе про импульсную лазерную обработку, упоминание о которой содержится в пункте 2 перечня опытных образцов, представленных на испытания (глава 4, стр. 75-76, табл. 10). Как выбирались режимы этой обработки? Это оптимальные режимы упрочнения? Это авторские исследования или нет?

7. На графиках рис. 11 и рис. 7, приведенных для одной и той же стали ПА-ЖГр с пористостью 10% заметны существенные отличия как по значениям микротвердости, так и по поведению кривой распределения микротвердости по глубине. Как это можно объяснить?

8. Табл. 8 (стр. 61). Измерение диаметра с точностью до 0.01 мм. Как? Зачем? Ведь указана плотность мощности, которая определяет температуру в зоне лазерного воздействия и все структурные превращения. Как обеспечивалась такая точность выдерживания диаметра, почему были выбраны такие значения диаметра?

Неоднократно по тексту диссертации приводятся данные по измерению глубины зоны упрочнения. При этом сведения о методике измерения глубины и критериях ее оценки отсутствуют.

9. Элементарные вычисления показывают, что в таблице 3 (стр. 44, строки 1-9) приведены неверные значения плотности мощности. Как считалась плотность мощности?? С какими значениями плотности мощности был проведен эксперимент?

Ряд вопросов возникает из-за недостаточно полного их освещения в диссертационной работе:

10. В частности на стр. 19 читаем: «У материалов с низкой теплопроводностью (P18, P6M5, BK8 и т.п.) после ЛО могут формироваться трещины в зоне отпуска, которая располагается между зоной закалки и основным материалом». По справочным данным находим, что для сплава BK6 теплопроводность $\lambda=62,8 \text{ Вт/(м·К)}$, для стали P18 $\lambda=0,272 \text{ Вт/(см·град)}$, для ст.45 $\lambda=0,335 \text{ Вт/(см·град)}$, для стали ХВГ $\lambda=0,272 \text{ Вт/(см·град)}$, для стали ШХ15 $\lambda=0,335 \text{ Вт/(см·град)}$, для стали 12X18H10T $\lambda=0,15 \text{ Вт/(см·град)}$. Все стали достаточно хорошо исследованы с точки зрения возможностей лазерной упрочняющей обработки, опыт показывает, что, например, при импульсной лазерной обработке трещин не наблюдается. Возникновение трещин при лазерной обработке твердых сплавов имеет совершенно другую природу и определяется существенными отличиями в теплофизических характеристиках составляющих сплав фаз. Таким образом, приведенная выше формулировка не корректна.

11. Относительно лазерного ударного упрочнения (лазерного наклепа, упомянутого автором на стр. 20) можно только сказать, что данный способ упрочнения в России находится в стадии исследования и вести речь о его промышленном применении преждевременно. Автору можно только порекомендовать аккуратнее подходить к анализу литературных источников, часто, особенно в научно-технических изданиях, публикуется рекламная информация.

По тексту диссертационной работы следует отметить и ошибки терминологического и редакционного характера:

12. Некорректен заголовок табл. 8 (стр.61). Нельзя писать: «... результаты режимов ...».

13. На стр. 60 введен термин «глубина слоя с высокой микротвердостью». Относительно чего высокой, насколько высокой? и т.п.

7. Заключение

Диссертация Морозова Е.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для машиностроения в области развития технологических процессов упрочняющей обработки порошковых сталей и определения области их применения.

Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Содержание автореферата в полной мере соответствует основному содержанию диссертации.

Сделанные замечания не снижают важности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертация соответствует заявленной специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, написана инженерным языком понятным специалистам и аккуратно оформлена.

Основные положения диссертационной работы достаточно полно отра-

жены в печати. По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, их них 7 статей в ведущих рецензируемых профильных журналах, получен патент на полезную модель.

Считаю, что диссертационная работа *«Исследование влияния параметров лазерной термической обработки на структуру и свойства порошковых сталей»* имеет научную и практическую ценность, по научной новизне, практической значимости и объему соответствует критериям, прописанным в пунктах 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор – Морозов Евгений Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – "Порошковая металлургия и композиционные материалы".

Доктор технических наук, ученый секретарь Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

_____ Ярьско С.И.

7 июня 2019 г.

Ярьско Сергей Игоревич, ученый секретарь Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221, тел.: 8-846-3341481; 8-846-3345764; e-mail: laser@fian.smr.ru, sci-sec@fian.smr.ru.

Наименование научной специальности, по которой защищена докторская диссертация: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Я, Ярьско Сергей Игоревич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Морозова Евгения Александровича, и их дальнейшую обработку.

