

МОРОЗОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность

05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Оглезнева Светлана Аркадьевна

Официальные оппоненты: **Беляев Евгений Сергеевич**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», доцент;

Ярьско Сергей Игоревич, доктор технических наук, Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, ученый секретарь;

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Защита состоится 26 июня 2019 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д212.188.10 при Пермском национальном исследовательском политехническом университете по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-кт, 29, ауд. 345

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «__» мая 2019г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Кульметьева В.Б

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших задач машиностроения на современном этапе развития промышленности является повышение надежности и долговечности изделий, их эффективности и конкурентоспособности на мировом рынке. В решении этих задач большая роль принадлежит порошковой металлургии, позволяющей получать изделия сложной формы, износо- и коррозионностойкие, успешно конкурирующие с литыми в экстремальных условиях эксплуатации. Так например, целый ряд износостойких триботехнических изделий для деталей погружных насосов, добывающих 80 % нефти на территории РФ, в настоящее время производится методом порошковой металлургии. Однако, износ осевых пар трения, изготовленных различными методами – как литых, так и порошковой металлургии, - является причиной более 40 % выходов ЭЦН из строя, и увеличение срока их службы является актуальной задачей. Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения является лазерная термообработка (ЛО), но данная задача является сложной и многофакторной, так как при ее решении необходимо дополнительно учитывать особенности порошковых материалов – пористость, неоднородность химического состава, структуры и свойств, особенно для гетерофазных порошковых материалов.

Степень разработанности темы. Многочисленные исследования посвящены изучению процессов, протекающих при ЛО литых материалов (Григорьянц А.Г., Рыкалин Н.Н., Крапошин В.С., Dowden M.J., Mazumder J. и др.), однако, исследования ЛО порошковых сталей ограничены целью снижения пористости или упрочнения поверхностных слоев изделий путем оплавления поверхности или наплавкой износостойких составов (Анциферов В.Н.; Толочко Н.К., Богодухов С.И. и др.); влияния ЛО на порошковые материалы, в том числе, псевдосплавы, на изделия со сложной геометрической формой практически не изучалось. Большая часть работ посвящена лазерному упрочнению порошковых инструментальных материалов.

Цель работы – повышение износостойкости порошкового псевдосплава системы железо-медь с помощью лазерной обработки.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. Определить влияние пористости на параметры ЛО, обеспечивающие упрочнение поверхностного слоя изделий из порошковых сталей ПА-ЖГр.
2. Исследовать влияние параметров ЛО на структуру и свойства порошковых сталей ПА-ЖГр.
3. Установить диапазоны параметров ЛО, обеспечивающих сочетание высокой микротвердости и толщины упрочненного слоя порошковых сталей.
4. Исследовать микротвердость и триботехнические характеристики поверхностного слоя псевдосплавов ПА-ЖГрД15 после ЛО.
5. Разработать математическую модель процесса ЛО порошковых сталей различного структурно-фазового состава, позволяющую прогнозировать свойства упрочненного слоя.
6. Разработать технологические рекомендации по выбору режимов ЛО для обеспечения требуемых характеристик поверхностного слоя изделий из порошковых сталей.

Методология исследований. Для достижения поставленной цели и задач применены способы экспериментальных исследований процессов ЛО с использованием современных методов получения и обработки данных. Теоретическое моделирование базировались на современных достижениях технологии машиностроения, материаловедения, математического моделирования и теории теплопроводности. Математическое мо-

делирование тепловых полей проводилось с помощью комплекса инженерных расчетов «COMSOL Multiphysics».

Научная новизна заключается в следующем:

1. Экспериментально исследованы зависимости между режимами ЛО с использованием волоконного лазера и характеристиками упрочненной зоны порошковых сталей ПА-ЖГр и ПА-ЖГрД15.

2. Установлены структуры зон, формирующихся в порошковых углеродистых сталях с различной пористостью и псевдосплаве в результате термического влияния волоконного лазера, отличающихся от структуры в литых сталях, и предложены механизмы их формирования.

3. На основе компьютерного моделирования методом конечных элементов разработаны модели распределения температурных полей в поверхностном слое порошковых углеродистых и инфильтрированных медью сталей, позволяющие прогнозировать глубину и микротвердость упрочненного слоя после ЛО, учитывающие пористость, структурно-фазовый состав порошковых материалов и три фазовых превращения (перлит-аустенит, плавление и кристаллизация меди, плавление и кристаллизация стали).

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Определены параметры ЛО порошковых сталей с различным уровнем пористости и инфильтрированных медью, обеспечивающие повышение микротвердости и увеличения износостойкости обработанных поверхностей в 2-2,5 раза.

2. Разработана методика выбора режимов ЛО углеродистых литых и порошковых сталей, обеспечивающих заданный уровень микротвердости и глубины поверхностного слоя, и ее графическое представление.

3. Разработана технология лазерного упрочнения осевых пар трения электрических центробежных насосов, использованная для ЛО деталей центробежных насосов на АО «Новомет-Пермь», подтвержденная актом испытаний. Получен патент на полезную модель № 145833 «Направляющий аппарат ступени погружного многоступенчатого электроцентробежного насоса».

4. Результаты внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров на кафедре «Материалы, технологии и конструирование машин» механико-технологического факультета ПНИПУ по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение, дисциплина – «Теория и технология покрытий», а также магистров по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение, дисциплина – «Аддитивные технологии лазерной наплавки и восстановления изделий», при проведении лекций и лабораторных работ по изучению вопросов ЛО заготовок с целью упрочнения поверхностных слоев.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования влияния технологических режимов ЛО и состава порошковых сталей на глубину, микротвердость и трибологические свойства упрочненного слоя в порошковых сталях различного структурно-фазового состава.

2. Технологические рекомендации по выбору режимов ЛО порошковых сталей для получения требуемых значений микротвердости и геометрических характеристик упрочненного слоя.

3. Модель распределения тепловых полей, позволяющая рассчитывать и регулировать геометрические характеристики упрочненного слоя на поверхности порошковых сталей различного структурно-фазового состава.

Степень достоверности результатов обеспечивается применением современного исследовательского оборудования, статистической обработкой и воспроизводимостью результатов. Результаты исследований подтверждены актами испытаний изделий с

упрочненными поверхностями трения.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы и результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на конференциях: Актуальные проблемы порошкового материаловедения. Международная научно-техническая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения академика В.Н. Анциферова, 2018 г. Пермь; Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли, всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 2018 г. Казань; I и II международные научно-практические конференции «Электрофизические методы обработки в современной промышленности», 2017-2018 гг. Пермь.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, 7 из которых в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 4 в изданиях баз цитирования Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка литературы и 3 приложений. Содержит 110 страниц машинописного текста, 40 рисунков, 10 таблиц, список использованных источников из 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и задачи исследования, ее научная новизна, практическая ценность и результаты работы в промышленности, дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлены результаты аналитического обзора научных трудов ведущих ученых в области порошковой металлургии, рассмотрены способы повышения физико-химических, механических и триботехнических свойств порошковых материалов. Рассмотрены условия формирования псевдосплавов (ПС) железо-медь, определены режимы классической печной термообработки для этого класса материалов. Показаны отличия ПС от литых материалов при эксплуатации. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных ЛО литых материалов, для упрочнения порошковых сталей процесс ЛО практически не применяется. Для ПС не определены интервалы параметров ЛО, способствующие формированию требуемых геометрических характеристик зоны закалки, микротвердости и триботехнических свойств.

Во **второй главе** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены методики экспериментального исследования и оборудование.

Экспериментальные исследования проведены на образцах из порошковых сталей ПА-ЖГр (1 % графита, 99 % Fe) с различной пористостью (4, 8 и 10 %) и инфильтрированной медью стали ПА-ЖГрД15 (1 % графита, 15 % Cu, остальное железо), а также литой стали У10 для сравнения с порошковыми.

Для приготовления смесей (1 % графита, 99 % Fe) использовали порошок железа марки ПЖРВ 2.200.28 с размером частиц 160 – 200 мкм, и порошок графита коллоидного марки С-1. Порошки перемешивали в эксцентричном смесителе, 4 ч, с добавлением «Г» - образных мелющих тел в количестве 30 % от массы шихты. Смесью формовали в пресс-форме на гидравлическом прессе П-125 при давлении 500 МПа. Прессовки отжигали в вакуумной печи при температуре 800 °С, 1 час. Для снижения пористости образцы доуплотняли вторично при давлении 550 или 600 МПа. Окончательно образцы спекали при температуре 1150 °С, 2 часа в вакууме. Для эксперимента по ЛО были отобраны образцы с пористостью 4, 8 и 10 %.

Образцы ПА-ЖГрД15 получали методом спекания, совмещенного с инфильтрацией медью, прессовок из шихты ПА-ЖГр, в атмосфере диссоциированного аммиака при

температуре 1180 °С в течение 2-х часов. Часть образцов представляла собой детали «Направляющий аппарат» ступеней погружных многоступенчатых насосов производства АО «Новомет–Пермь», изготовленные методом порошковой металлургии по приведенной выше технологии. Шероховатость поверхности образцов R_a после токарной обработки измеряли с помощью профилографа-профилометра Абрис-ПМ7 по ГОСТ 2789-73.

ЛО выполняли в среде высокочистого аргона с содержанием кислорода не более 0.001 об. %. с использованием волоконного лазера YLR-1000 IPG Photonics с нормальным распределением мощности по пятну круглого сечения, длиной волны излучения 1064 нм и максимальной мощностью 1 кВт. ЛО проводили при плотности мощности излучения (W) 8-16 кВт/см², мощности источника излучения (P) 0,5-1 кВт, диаметре пятна лазера (d) 1,5, 2, 2,5, 4 мм и скорости движения лазера (V) 0,8-1,2 см/с. Эксперименты планировались по схеме ортогонального центрального композиционного планирования со «звездными» точками. При варьировании двух факторов количество экспериментов в матрице составляло 9 для каждого из 5 исследованных материалов.

Микроструктуру образцов исследовали на полированных и травленых шлифах, на микроскопе Olimpus GX-51 при увеличении 50-1000 крат, электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega 3 SEM» (Tescan), совмещенном с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 (Oxford Instruments). Шлифы сталей травили химическим реактивом, содержащим 4 % азотной или пикриновой кислоты в этиловом спирте. Образцы с дорожками лазерной закалки на поверхности разрезали перпендикулярно поверхности образца на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Electronica EcoCut, готовили шлифы и исследовали с поверхности и по глубине обработанного слоя.

Микротвердость ($HV_{0,05}$) поверхности и по глубине обработанного слоя измеряли на автоматическом микротвердомере Durascan 70 при нагрузке 50 г с шагом 50-75 мкм по линиям, перпендикулярным поверхностям образцов в центральной части лазерного трека в соответствии с ГОСТ 9450-76, погрешность измерений не превышала 10 %. Количество измерений по поверхности составляло не менее 20, по глубине – не менее 3 «дорожек» на трек.

Испытания износостойкости деталей «Направляющий аппарат» из порошковой стали ПА-ЖГрД15 с упрочненными поверхностями трения проводились на вертикальном абразивном стенде АО «Новомет», имитирующем работу погружного насоса в реальных условиях, с целью сравнения скорости гидроабразивного износа осевых подшипников степеней электроцентробежного насоса из различных материалов.

Математическое ожидание измеряемых величин определяли по значениям испытаний пяти образцов, рассчитывали доверительный интервал.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования процесса ЛО порошковых сталей.

На первом этапе производилась ЛО образцов 25x25x200 мм из ПА-ЖГр с различной пористостью. Структура порошковых сталей ПА-ЖГр с различной пористостью после спекания состояла из перлита и небольшого количества цементита (Рисунок 1-3, а), с микротвердостью основы 100 $HV_{0,05}$, независимо от пористости. Шероховатость поверхности была $R_a,1,6$. На поперечных микрошлифах образцов после ЛО проанализирован размер зоны закалки, микротвердость и микроструктура. В области закалки выделяются 4 зоны. Зона I – зона оплавления с минимальной пористостью, где не различаются отдельные частицы порошка, со структурой мартенсита и небольшим количеством остаточного аустенита (белого цвета). Малая пористость материала в этой зоне обусловлена благоприятными условиями для выхода пор на поверхность через тонкий

слой жидкой фазы. Высокая скорость образования жидкой фазы при ЛО и малое время ее существования не позволяет порам, находящимся более глубоко от поверхности, выйти на поверхность, и образуется зона II – зона оплавления с исходной пористостью, структура в этой зоне также мартенситная. Микротвердость в зонах I и II высокая, до $1000 \text{ HV}_{0.05}$. Зона III соответствует закалке из твердого состояния со структурой перлита и сеткой цементита. Микротвердость в этой зоне плавно снижается до значений микротвердости основы материала, зоны IV.

На рисунке 2 показана зона ЛО образца из ПА-ЖГр с пористостью 4 %, обработанного по режиму с меньшей интенсивностью теплового воздействия, чем на рисунке 1, в связи с этим, микротвердость значительно ниже, до $600 \text{ HV}_{0.05}$ (Рисунок 2, б). Разделение области закалки на зоны аналогично предыдущему случаю.

На рисунке 3 а, б показана структура образца с пористостью 8 %, обработанного по режиму с более высокой скоростью перемещения луча, чем в случаях, показанных на рис. 1 и 2, и график изменения микротвердости по глубине. Микротвердость на поверхности здесь высока (до $900 \text{ HV}_{0.05}$), но снижена глубина упрочненного слоя из-за более высокой скорости перемещения лазерного луча и уменьшения термического воздействия на материал.

По сравнению с пористыми образцами, зона оплавления образца из стали У10 имеет четкую границу и правильную геометрическую форму. Микротвердость стали У10, обработанной по режиму 4 достигает $800 \text{ HV}_{0.05}$, глубина области закалки меньше, чем в пористых образцах из-за более высокой теплопроводности литой стали и отвода тепла в основу материала. Зона закалки из твердого состояния практически отсутствует, структура на границе с зоной оплавления соответствует перлито-цементитной основе.

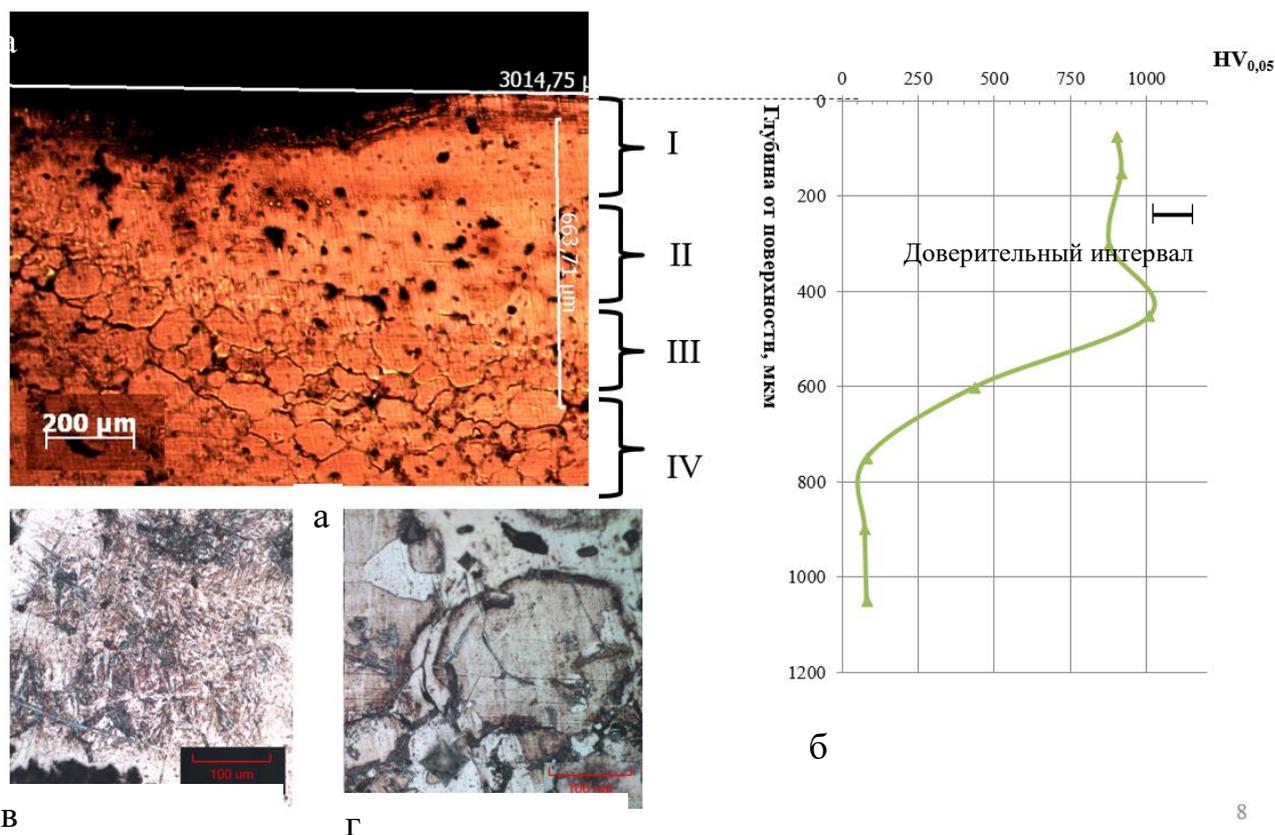


Рисунок 1 – Микроструктура и микротвердость образца из ПА-ЖГр с пористостью 10 % после ЛО по режиму $W=16 \text{ кВт/см}^2$, $V=0,8 \text{ см/с}$, $d=2 \text{ мм}$, а – морфология зоны ЛО, б – график изменения микротвердости, в – микроструктура зоны I, г – микроструктура зоны III

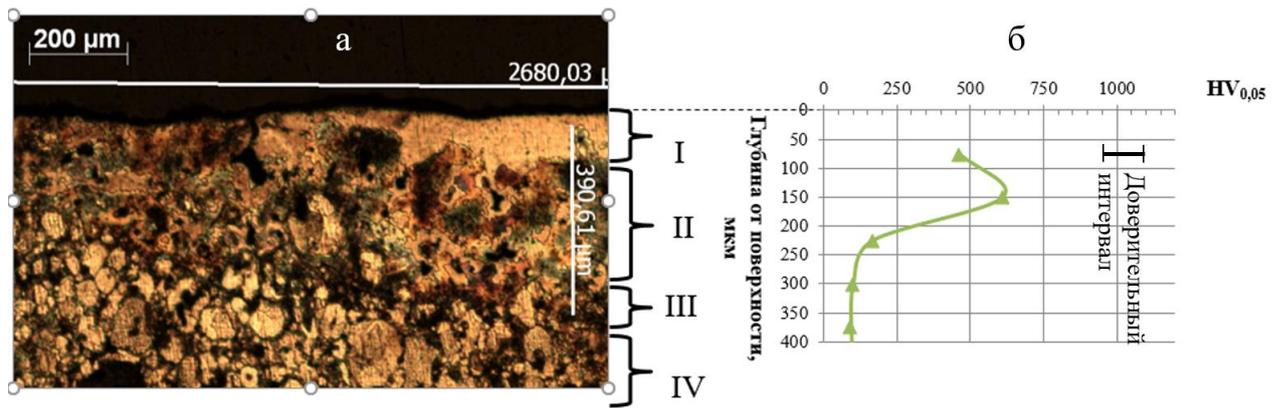


Рисунок 2 - Микроструктура и микротвердость образца из ПА-ЖГр с пористостью 4 % после ЛО по режиму № 5 ($W=12$ кВт/см², $V=0,8$ см/с, $d=2.5$ мм), а – морфология зоны ЛО, б – график изменения микротвердости

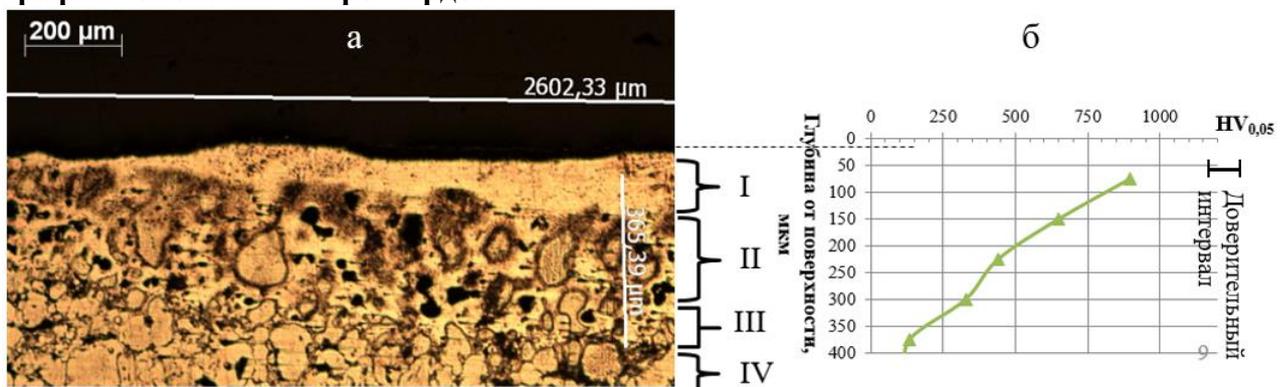


Рисунок 3 – Микроструктура образца из ПА-ЖГр с пористостью 8 % после ЛО по режиму № 4 ($W=16$ кВт/см², $V=1,2$ см/с, $d=2.5$ мм), а – морфология зоны ЛО, б – микротвердость

Сравнение образцов ПА-ЖГр с различной пористостью показали, что микротвердость поверхностного слоя практически не зависела от пористости образцов, рисунок 4, так как при одинаковом химическом составе на поверхности во всех случаях образуется беспористый мартенситный слой, но при повышении пористости наблюдается увеличение глубины зоны упрочнения, связанное с меньшим значением теплопроводности материала и ухудшением условий теплоотвода в основной материал, за счет которого, в основном, и происходит охлаждение образцов. На некоторых образцах вокруг зоны закалки наблюдали образование трещин, причинами возникновения которых является конденсация пор, перемещающихся при оплавлении поверхностного слоя, а также термические напряжения на границе фаз мартенсита и перлита при охлаждении. Установлено, что размеры зоны упрочнения коррелируют с параметром $P/(d \cdot V)^{0.4}$, где P – плотность мощности, кВт, d – диаметр пятна лазерного излучения, мм, V – скорость перемещения лазерного луча, см/с, рисунок 5. Наблюдается линейная зависимость между параметром $P/(d \cdot V)^{0.4}$ и глубиной зоны проплавления, при этом, большие значения $P/(d \cdot V)^{0.4}$ соответствуют более интенсивному тепловому воздействию на материал.

Исследования влияния пористости порошковых сталей на граничные значения параметров ЛО, обеспечивающих повышение микротвердости поверхности без образования трещин в подповерхностной зоне, рисунок 5, показали, что для литой стали У10 ЛО может производиться с любым сочетанием режимов без риска образования трещин, а для порошковых сталей, в зависимости от пористости, параметр $P/(d \cdot v)^{0.4}$ не должен превышать $0,4 \text{ кВт}/((\text{мм} \cdot \text{см})/\text{с})^{0.4}$ для пористости 4 %, $0,32 \text{ кВт}/((\text{мм} \cdot \text{см})/\text{с})^{0.4}$ для пористости 8 % и $0,24 \text{ кВт}/((\text{мм} \cdot \text{см})/\text{с})^{0.4}$ для пористости 10 %.

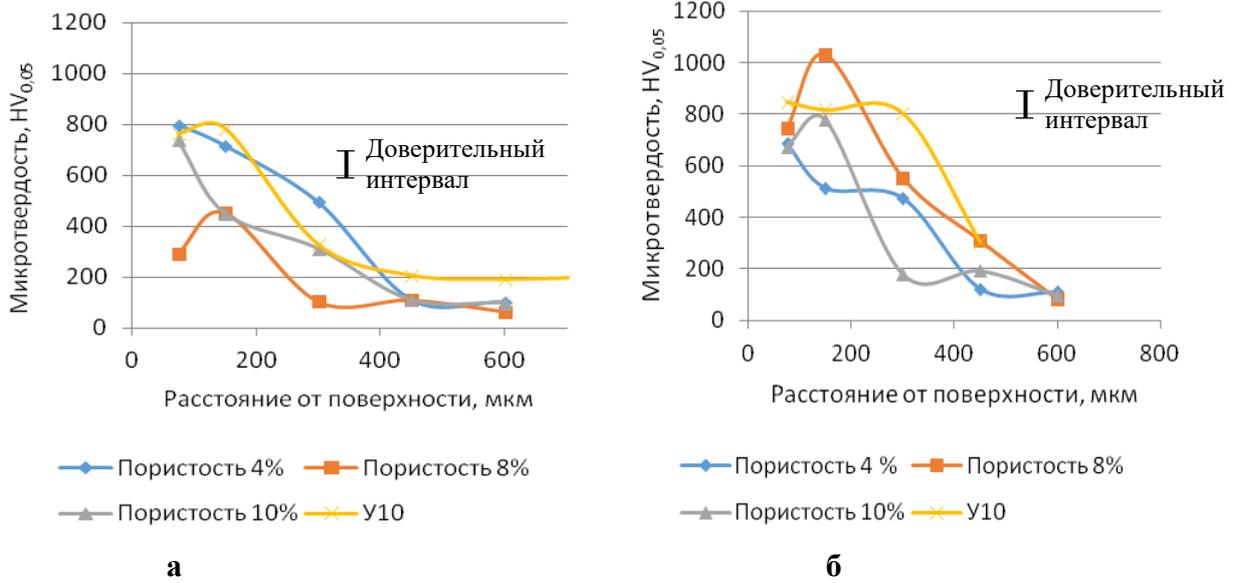


Рисунок 4 - Распределение микротвердости в поверхностных слоях спеченной ПА-ЖГр и У10 после ЛО, а – режим с $W=16$ кВт/см², $V=1,2$ см/с, $d=2$ мм; б – режим $W=16$ кВт/см², $V=1,0$ см/с, $d=2$ мм

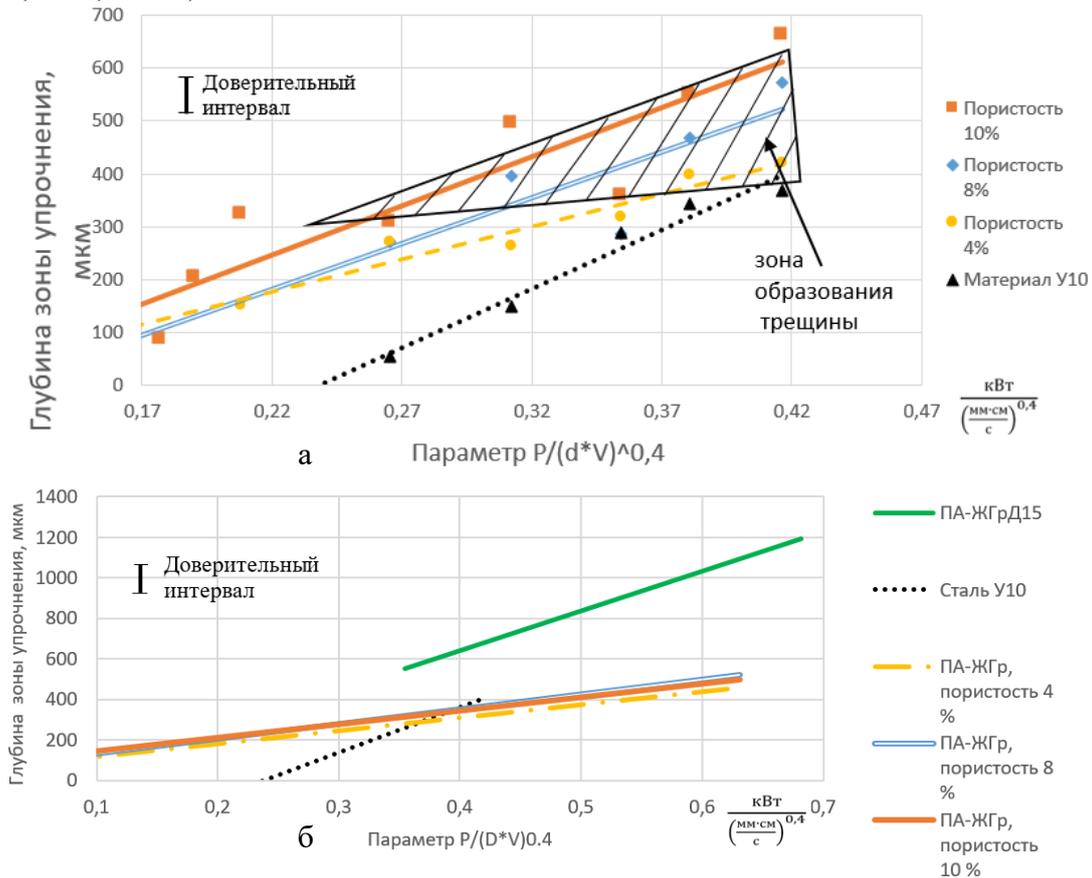


Рисунок 5 - Зависимость глубины упрочнения сталей от режимов ЛО, а - ПА-ЖГр и У10, диаметр пятна лазера 2 мм; б - ПА-ЖГр, У10 и ПА-ЖГрД15, диаметр пятна лазера от 1,5 мм до 4 мм

На втором этапе производилась ЛО образцов из ПА-ЖГрД15. В структуре инфильтрированной стали ПА-ЖГрД15 после спекания сформировался пластинчатый перлит различной степени дисперсности, легированный феррит в небольшом количестве, медь в свободном виде сосредоточена в порах материала. Среднее содержание меди по данным EDX-анализа было 14,2 мас.%. Твердость стали после спекания составляла 70-100

HRB, микротвердость - 250-300 HV_{0,05}. Режимы и результаты ЛО кольцевых образцов из инфильтрированной стали ПА-ЖГрД15 приведены в таблице 1. Значения микротвердости обработанного слоя на глубине до 350 мкм находятся в пределах 765-935 HV_{0,05}, глубина слоя с высокой микротвердостью $L_{зТВ}^1$ – в пределах 0,34-1,25 мм. В микроструктуре обработанной по режиму № 11 области стали ПА-ЖГрД15 выделяются четыре зоны (Рисунок 6, а), расположение которых коррелируют с микротвердостью по глубине. Зона I (Рисунок 6, б) толщиной 90-170 мкм (в зависимости от режима) – это зона расплавления и железной матрицы и включений меди, в которой образуется мелкодисперсная структура мартенсита с элементами дендритной структуры. В зоне II (Рисунок 6, в) температура нагрева при ЛО не достигает температуры плавления железной матрицы, но ее достаточно для расплавления меди. Затем происходит процесс жидкофазного спекания, сопровождающийся слиянием пор. Зона II отличается неоднородной травимостью - зоны с высоким содержанием меди имеют цвет, аналогичный зоне I, более темные участки содержат меньше меди. Ниже зон оплавления, на глубине от 150 до 1000 мкм от поверхности образца, располагается зона III – зона твердофазной закалки, в которой температура при ЛО достаточна для формирования аустенита, но не превышает температуры плавления меди, благодаря чему в зоне III образуется мартенситная структура, твердость этой зоны также высока, до 950 HV_{0,05}. В отличие от предыдущих зон, в структуре зоны закалки из твердого состояния присутствуют поры.

Зона IV (Рисунок 6, г) – участок размером до 150 мкм, в которой температурно-временные условия не достаточны для образования мартенсита во всем объеме. В структуре зоны появляются участки троостита (темного цвета), количество которых увеличивается по глубине. Микротвердость в зоне падает до уровня основного материала, не затронутого ЛО. Глубже зоны IV располагается структура, соответствующая основному материалу – перлит с включениями меди, однако микротвердость основы после ЛО порошковой стали ПА-ЖГрД15 достигает 400 HV_{0,05}, что превышает исходную микротвердость (250-300 HV_{0,05}). Твердость на обработанной поверхности кольцевого выступа составляла 55,5 HRC. На основании проведенных экспериментальных исследований и полученных зависимостей разработана комплексная номограмма (Рисунок 7) для выбора режимов ЛО порошкового псевдосплава ПА-ЖГрД15.

Таблица 1 - Режимы ЛО и микротвердость на кольцевых выступах из ПА-ЖГрД15

№ опыта	P, кВт	W, кВт/см ²	d, мм	V, см/с	L _{пл} , мкм	L _{зТВ¹} , мм	L _{зТВ²} , мм	HV _{0,05} **
1	0,9	16	2,68	1,2	-	0,94		764
2	0,9	8	3,79	1,0	-	1,1		760
3	0,8	16	2,52	1,0	-	0,64	0,83	894
4	0,8	8	3,57	1,2	-	0,91		811
5	0,7	16	2,36	1,2	-	0,62		928
6	0,7	8	3,34	1,0	-	0,69		934
7	0,6	16	2,19	1,0	-	0,34		854
8	0,6	8	3,09	1,2	-	0,77		883
9	1,0	12	3,2	1,2	139	0,92	0,98	807
10	1,0	12	3,2	0,8	287	1,21	1,36	765
11	1,0	8	3,99	1,2	90	1,02	0,96	810
12	1,0	8	3,99	0,8	170	1,25	1,35	800

L_{пл} – зона полного оплавления, * L_{зТВ¹} – глубина слоя с микротвердостью выше, чем 700 HV_{0,05}, * L_{зТВ²} – глубина до границы с перлитной структурой, ** - средняя величина микротвердости по замерам в диапазоне 0-350 мкм

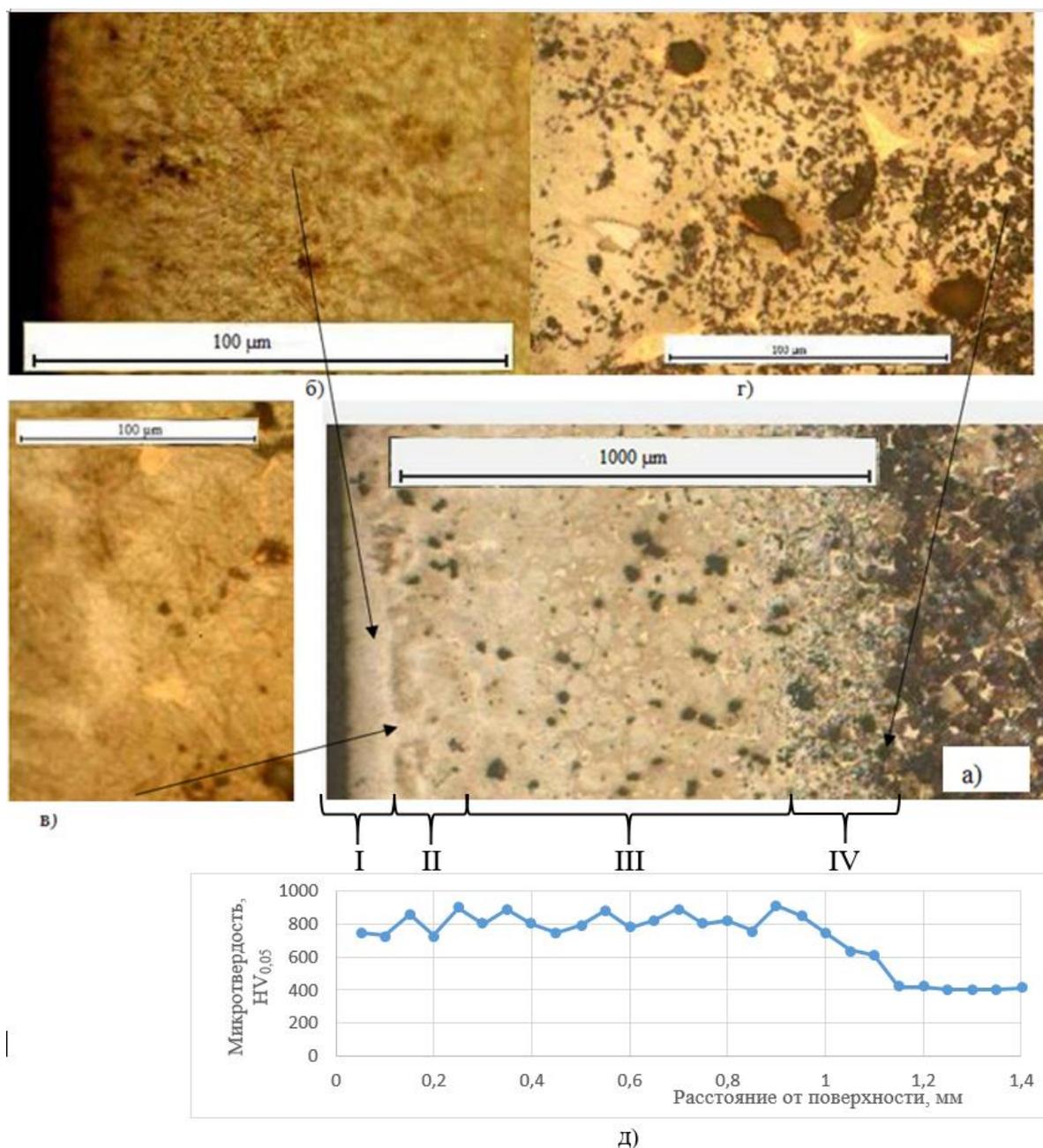


Рисунок 6 - Микроструктура ПА-ЖГрД15 после ЛО, режим № 11: а – сечение зоны ЛО, общий вид; б – структура зоны оплавления; в – структура в зоне частичного оплавления; г – структура переходы от зоны закалки из твердого состояния к основе; д – график распределения микротвердости по глубине зоны закалки

Номограмма позволяет выбрать 2 основных параметра обработанной поверхности: среднюю микротвердость на глубине до 350 мкм и глубину зоны упрочнения. Назначая указанные параметры и задавая плотность мощности (8 или 16 кВт/см²) можно определить мощность лазера, диаметр и скорость перемещения лазерного луча, которые обеспечивают заданные характеристики обработанного слоя. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность разработанной методики также и для других исследованных сталей.

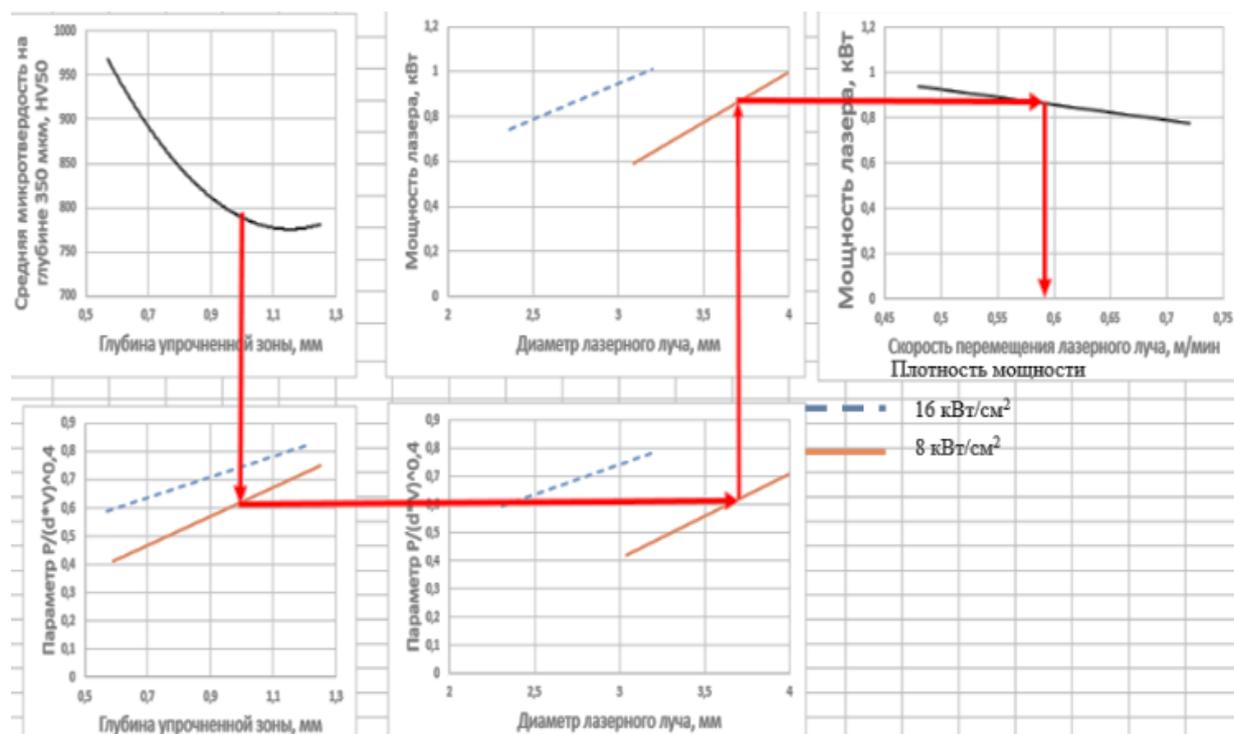


Рисунок 7 - Номограмма для назначения режимов ЛО для ПА-ЖГрД15

В четвертой главе приведены результаты исследования трибологических свойств в условиях гидроабразивного износа ПА-ЖГрД15 после ЛО, таблица 2. Оптимальными режимами ЛО для ПА-ЖГрД15 (Таблица 1) являются №№ 10-12, которые формируют зону полного оплавления на поверхности и обеспечивают наибольшую глубину упрочненного слоя.

Таблица 2 - Величины износа различных сталей при трибологических испытаниях в течение 4 ч

Материал направляющего аппарата	Материал шайбы	Средний износ бурта, мм	Скорость износа осевого подшипника, мм/ч
ПА-ЖГрД15 без ЛО	резина	0,51	0,1275
ПА-ЖГрД15, ЛО режим № 10	резина	0,42	0,105
ПА-ЖГрД15, ЛО режим № 11	резина	0,33	0,0825
ПА-ЖГрД15, ЛО режим № 12	резина	0,36	0,09
ПА-ЖГрД15, закалка импульсным лазером на АО «Авитек»	резина	0,45	0,1125
ПА-ЖГрД15 без ЛО	карбонит	0,15	0,5375*
X12Ф1	резина	0,26	0,065

* - износ карбонитовой шайбы за 4 часа – 2 мм

В пятой главе проведен теоретический анализ тепловых процессов, происходящих при ЛО ПС.

Взаимодействие лазерного излучения с непрозрачными твердыми телами можно условно поделить на несколько этапов, включающих поглощение части лазерного излучения поверхностью, распространение теплоты от поверхности вглубь материала, поглощение или выделение теплоты при фазовых переходах, нагрев вещества в другом фазовом состоянии; при прекращении действия лазерного луча процесс протекает в обратном порядке.

С учетом принятых допущений уравнение теплопроводности может быть сведено к тепловому уравнению модели двухфазной зоны:

$$\Psi(T) \frac{\partial T}{\partial t} = a(\varepsilon_v, \varepsilon_\sigma) \nabla^2 T + F(q_L), \quad (1)$$

где Ψ – безразмерная эффективная теплоемкость, учитывающая выделение скрытой теплоты фазового перехода; T – абсолютная температура, t – время, a – коэффициент температуропроводности, $\varepsilon_v, \varepsilon_\sigma$ – характеристики пористости композитной стальной матрицы, определяемые как объемная доля пор и доля пор в плоском сечении соответственно, $F = \alpha q_L$ – интенсивность объемного источника тепла, связанная с мощностью лазерного воздействия на различной глубине y . α и q_L – коэффициент поглощения светового излучения и плотность потока лазерного излучения соответственно. Коэффициент α зависит как от температуры, так и фазового состава локального объема, определяя в модели изменение глубины проникновения лазерного излучения при оплавлении поверхностного слоя. Расчеты производились в пакете инженерных расчетов COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. Для моделирования использовался модуль «Heat Transfer in Solids», включающий в себя элементы: Boundary Heat Source (тепловой поток лазерного излучения), Heat Flux (тепловой поток конвективного охлаждения поверхности), Thermal insulation (теплоизоляция), Open Boundary (свободная граница), Diffuse Surface (рассеивание тепла посредством излучения), Phase change (фазовые превращения). Геометрия расчетной области задавалась в двухмерном виде, осесимметрично и имитировала прохождение лазерного луча заданной мощности и распределения ее по площади пучка по поверхности материала с заданной скоростью, рисунок 8. Результатом расчетов для заданных режимов ЛО (размер расчетной области: диаметр 40 мм, толщина 4 мм, высота 20 мм, мощность лазера 1 кВт, скорость перемещения лазерного луча 1 см/с, диаметр пучка 4 мм) является картина распределения тепловых полей по сечению кольцевого образца (Рисунок 8). Числами на изотермах указана температура в градусах Цельсия. Область I соответствует зоне полного расплавления материала. В области II происходит расплавление только медной составляющей сплава ПА-ЖГрД15, область III соответствует зоне закалки из твердого состояния, область IV соответствует материалу в исходном состоянии. Расчетная модель позволяет также определить скорость изменения температуры в зоне ЛО. Согласно расчету, скорость охлаждения на поверхности материала превышает $7000^\circ\text{C}/\text{с}$, что значительно выше скорости, необходимой для мартенситного превращения. На рисунке 9,а,б, показано сравнение фазовых полей, полученных компьютерным моделированием и микроструктура образцов после ЛО. На рисунке 10 показаны графики изменения температуры по времени.

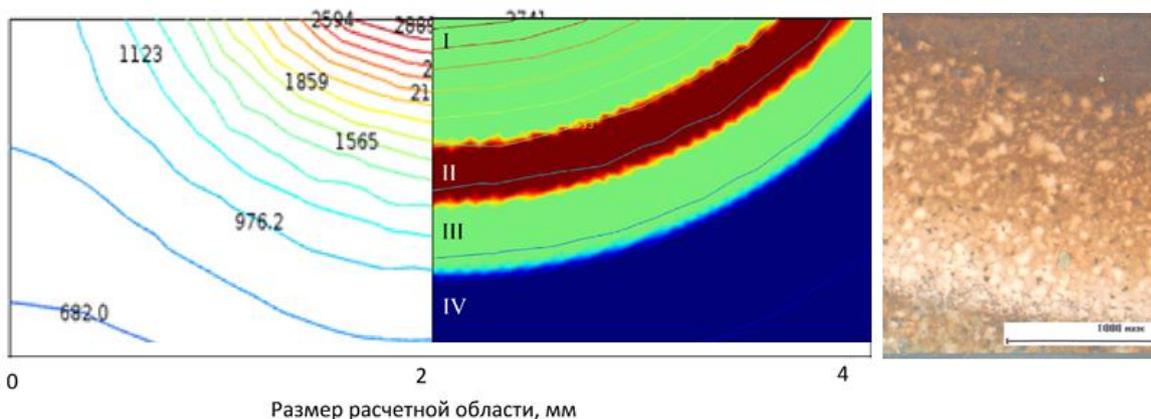
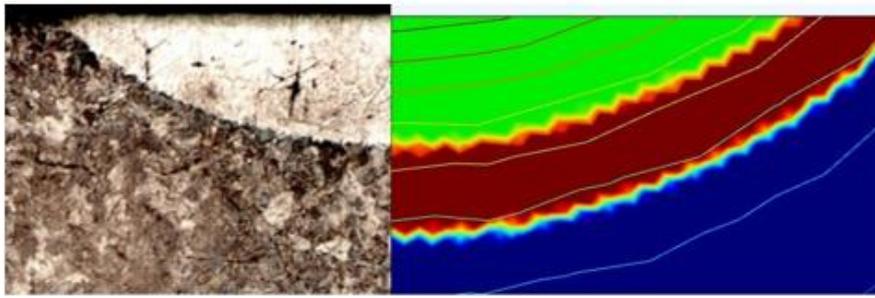
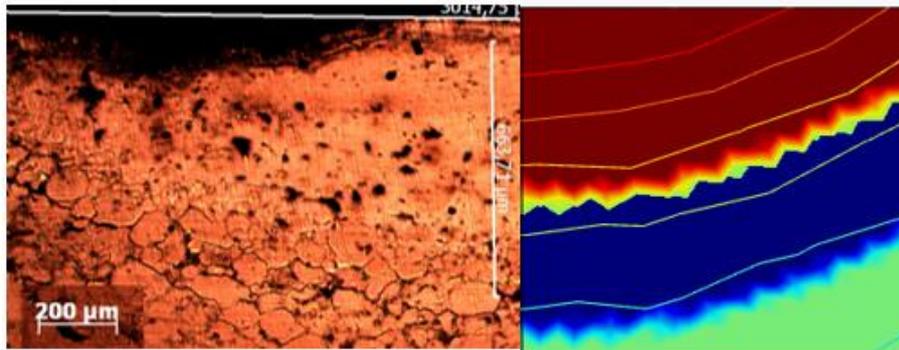


Рисунок 8 - Распределение тепловых полей (слева), фаз (посередине) и микрофотография образца из ПА-ЖГрД15 после ЛО по сечению образца (справа) по результатам расчета и экспериментов



а



б

Рисунок 9 - Микро-структура сталей после ЛО (слева) и расчетные области распределения фаз (справа), а - У10, б - ПА-ЖГр

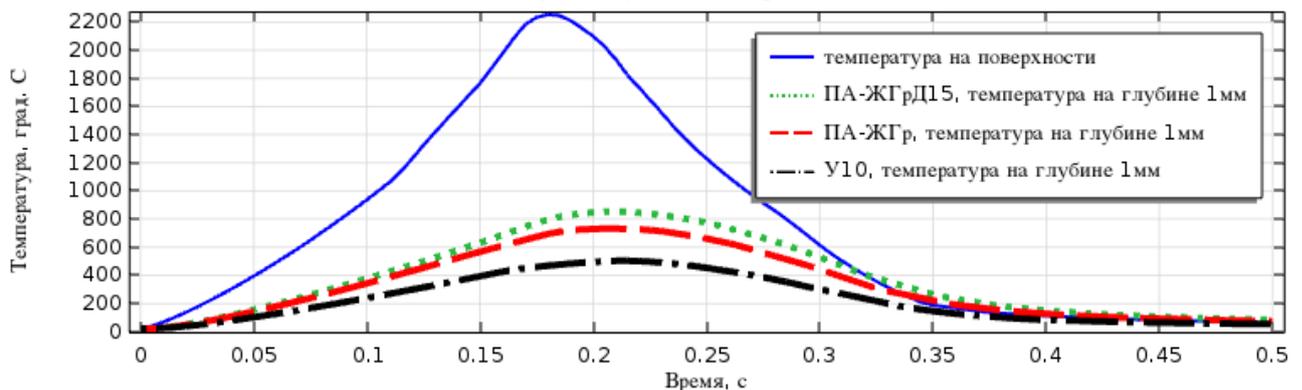


Рисунок 10 - График изменения температуры при ЛО по результатам расчетов

Пик температуры приходится на момент прохождения луча по точке измерения температуры. Верхний график показывает изменение температуры на поверхности образцов, он имеет одинаковый вид для всех материалов, так как эта температура зависит в большей степени от поглотательной способности материалов, которая в расчетах принималась равной 80 %. Остальные графики показывают изменение температуры в точке на глубине 1 мм в материале. Для стали ПА-ЖГрД15 она составляет 880 °С, что достаточно для превращения перлита в аустенит и последующей закалки. Остальные два материала показывают температуру ниже точки A_{c1} , что говорит о недостаточном прогреве и отсутствии фазовых превращений. Полученный график подтверждает зависимости, полученные экспериментально (Рисунок 5). Результаты металлографического анализа с достаточной точностью совпадают с расчетными геометрическими и температурными параметрами зон лазерного воздействия, что свидетельствует о правильной постановке тепловой задачи. Модель может быть использована для прогнозирования результатов ЛО других исследованных сталей.

В **Приложении** представлен акт испытаний осевой пары трения после ЛО, патент на полезную модель № 145833 «Направляющий аппарат ступени погружного многосту-

пенчатого электроцентробежного насоса», а также акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс кафедры МТиКМ ПНИПУ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены зависимости между режимами ЛО и характеристиками упрочненного поверхностного слоя порошковых сталей. На основе анализа полученных экспериментальных данных были построены зависимости глубины упрочнения h и микротвердости $HV_{0,05}$ от скорости движения V и мощности излучения P при фиксированном диаметре луча d , а также зависимости параметров упрочненного слоя от интегрального критерия ЛО $P/(d \cdot v)^{0,4}$, уточненного для описания ЛО порошковых сталей.

2. Установлено, что ЛО литой стали У10 может производиться с любым сочетанием параметров режимов в исследованном диапазоне значений без риска образования трещин. Исследования ЛО порошковой стали ПА-ЖГр показали, что в зависимости от пористости, параметр $P/(d \cdot v)^{0,4}$ не должен превышать $0,4 \text{ кВт}/((\text{мм} \cdot \text{см})/\text{с})^{0,4}$ для пористости 4 %, $0,32 \text{ кВт}/((\text{мм} \cdot \text{см})/\text{с})^{0,4}$ для пористости 8 % и $0,24 \text{ кВт}/((\text{мм} \cdot \text{см})/\text{с})^{0,4}$ для пористости 10 %.

3. ЛО порошковой стали ПА-ЖГр с пористостью в пределах 4-10 % и псевдосплава ПА-ЖГрД15 позволяет повысить микротвердость поверхностного слоя до 950 $HV_{0,05}$ на глубину до 1 мм. В структуре порошковых сталей, в отличие от литых, кроме зон оплавления и термического влияния, выявлены зоны с различными объемами пор, сформированными в результате кристаллизации зоны обработки, а в инфильтрированной стали – еще и зона плавления меди. Установлено, что ЛО ПА-ЖГрД15 приводит к повышению износостойкости образцов при гидроабразивном износе на 30...35 %.

4. На основе трехмерного уравнения теплопроводности с помощью пакета инженерных расчетов COMSOL Multiphysics решена нелинейная нестационарная задача и получены картины распределения температурных поля в объеме материала при ЛО порошковых сталей. Модель учитывает свойства порошковых материалов (состав, пористость), а также учитывает три фазовых перехода (перлит-аустенит, плавление и кристаллизация меди, плавление и кристаллизация стали). На основе анализа температурных и фазовых полей в зоне ЛО определены: распределение температур и фаз в процессе ЛО, скорости нагрева и охлаждения. Полученная модель позволяет прогнозировать геометрические характеристики упрочненной зоны и выбирать режимы ЛО порошковых сталей. Модель также проверена на литой стали У10 и может быть использована для расчетов тепловых полей в беспористых материалах.

5. На основе результатов экспериментальных исследований разработана номограмма для назначения режимов ЛО с целью управления характеристиками поверхностного слоя (микротвердость, толщина упрочненного слоя).

6. Разработана технология лазерного упрочнения осевых пар трения центробежных насосов для добычи нефти, испытанная и подготовленная к внедрению в АО «Новомет-Пермь».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Издания, рекомендованные ВАК РФ:

1. Исследование микроструктуры и рельефа поверхности при лазерной термической обработке тонкостенного цилиндра из порошкового псевдосплава сталь-медь / В. Г. Гилев, Е. А. Морозов, А. С. Денисова, А. М. Ханов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2012. - Т. 14, № 4(5). - С. 1212-1217

2. Морозов Е.А., Русин Е.С., Абляз Т.Р. Механическая обработка поверхностного слоя псев-

досплава сталь-медь, подвергнутого лазерной термической обработке // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 72.

3. Гилев В.Г., Морозов Е.А., Русин Е.С., Ханов А.М. Лазерная термическая обработка кольцевых выступов из порошковой медистой стали (псевдосплава сталь-медь) // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 2. С. 36-42. Переводная версия: Russian Journal of Non-Ferrous Metals (Web of Science)

4. Исследование микроструктуры и микротвердости псевдосплава сталь-медь после лазерной термической обработки / В. Г. Гилев, Н. В. Безматерных, Е. А. Морозов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2014. - № 5(707). - С. 34-40. Переводная версия: Metal Science and Heat Treatment (Web of Science)

5. Особенности лазерной закалки кольцевых выступов из псевдосплава сталь-медь / В. Г. Гилев, Н. В. Безматерных, Е. А. Морозов, Е. С. Русин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. - Т. 16, № 4(1). - С. 179-186.

6. Gilev V., Morozov E., Khanov A., Abylaz T. Laser quenching of axial bearings in submersible multistage pumps made of steel-brass pseudo-alloy // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 20. С. 40861-40868. (Scopus)

7. Гилев В.Г., Морозов Е.А., Килина П.Н., Сиротенко Л.Д. Лазерная закалка поверхностей пар трения, изготовленных из псевдосплава сталь-медь // СТИН. 2015. № 7. С. 25-28. Переводная версия: Russian Engineering Research (Scopus)

Другие:

8. Повышение ресурса погружных нефтяных насосов типа ЭЦНМ путем лазерной закалки поверхностей пар трения / Е. А. Морозов // Материалы VII Студенческого регионального конкурса научных проектов по программе УМНИК: - Пермь : Интер-ЕС, 2013. - С. 77-78.

9. Механическая обработка закаленных лазером кольцевых выступов из порошковой медистой стали / Е. А. Морозов, Е. С. Русин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2013. - Т. 15, № 3. - С. 20-25.

10. Повышение износостойкости порошковых псевдосплавов сталь-медь методом лазерного упрочнения / Е. А. Морозов, В. Г. Гилев, А. М. Ханов // Masters Journal = Журнал магистров. - 2016. - № 1. - С. 100-105.

11. Морозов Е.А., Оглезнева С.А. Технологические рекомендации по лазерной закалке порошкового псевдосплава ПА-ЖГрД15. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20. № 4. С. 72-77.

12. Технологические рекомендации по лазерной закалке порошкового псевдосплава ЖГр1Д15 / Е. А. Морозов, С. А. Оглезнева // Актуальные проблемы порошкового материаловедения = Actual problems of powder materials science : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения акад. В. Н. Анциферова, (Пермь, 26-28 нояб. 2018 г.). / - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. - С. 158-161.

13. Гилев В.Г., Морозов Е.А. Направляющий аппарат ступени погружного многоступенчатого электроцентробежного насоса. Патент № 145833. 2013.05.06