

На правах рукописи



РАТКЕВИЧ Герман Вячеславович

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ТРЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Специальность 05.02.04 – трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственной технической университет»

Научный руководитель: **Афанасьева Людмила Евгеньевна**
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Седакова Елена Борисовна**
доктор технических наук, доцент, руководитель
лаборатории трения и износа, федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения РАН

Матлин Михаил Маркович
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Детали машин и подъемно-
транспортные устройства», федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Волгоградский
государственный технический университет

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН

Защита состоится «22» октября 2021 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.262.07 на базе ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» по адресу: 170026 Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» и на сайте вуза по адресу:
<http://www.tstu.tver.ru/science/dissertation/212.262.07/#pills-defense>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Гультяев Вадим Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Большинство изделий машиностроения выходит из строя из-за разрушения контактных поверхностей при изнашивании. Уменьшение износа имеет важное экономическое значение, поэтому разработка принципов создания материалов триботехнического назначения с высокой степенью надежности и долговечности в эксплуатации, повышение износостойкости материалов трибосистем за счет разработки и развития методов модифицирования поверхностей трения является актуальной задачей трибологии.

Известно, что износостойкость поверхностей трения напрямую зависит от структурного состояния сплавов. В связи с интенсивным развитием лазерной техники в настоящее время расширились технологические возможности лазерного модифицирования контактных поверхностей узлов трения машин и обрабатываемых инструментов, нанесения наплавленных износостойких покрытий. Изменяя режимы лазерного воздействия, можно управлять процессом структурообразования и формировать модифицированные слои с различными параметрами микроструктуры. Однако влияние количественных характеристик микроструктуры на триботехнические характеристики практически не исследовано, в отдельных работах дается лишь качественная оценка.

Важным направлением трибологии является поиск критериальной связи характеристик изнашивания поверхностей трения со структурой и свойствами сплавов с целью выявления технологических возможностей положительного влияния на износостойкость. Для инженерной практики требуется разработка новых методов прогнозирования триботехнических характеристик поверхностей трения, опираясь на критерии, основанные на количественных характеристиках микроструктуры. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной как в научном, так и в практическом отношении.

Цель работы – разработка способов модифицирования поверхностных слоев лазерным излучением для повышения их износостойкости на основе исследования влияния структуры сплавов на закономерности изнашивания.

Объекты исследования – наплавленные Ni-Cr-B-Si покрытия подвижных уплотнительных поверхностей арматуры и инструменты из быстрорежущей стали Р6М5, работающие в условиях воздействия высоких контактных нагрузок и повышенных температур.

Основные задачи работы:

1. Установить закономерности влияния лазерной модификации поверхности наплавленного Ni-Cr-B-Si покрытия на структуру и триботехнические свойства. Провести сравнительные испытания на изнашивание и установить характер зависимости характеристик износостойкости от величины дендритного параметра d (расстояния между дендритными ветвями второго порядка).
2. Разработать способ получения Ni-Cr-B-Si покрытия с помощью порошковой лазерной наплавки и лазерной модификации, позволяющий повысить износостойкость поверхностей трения за счет формирования структуры с меньшей величиной дендритного параметра d .

3. Разработать метод оценки характеристик износостойкости Ni-Cr-B-Si покрытий после наплавки и лазерной модификации по параметру микроструктуры d .
4. Провести сравнительные испытания на изнашивание и установить закономерности влияния лазерного модифицирования и последующего дисперсионного твердения на триботехнические характеристики быстрорежущей стали Р6М5.
5. Разработать способ лазерного модифицирования быстрорежущей стали Р6М5, обеспечивающий получение более высоких характеристик износостойкости по сравнению со стандартной обработкой – закалкой и трехкратным отпуском.

Научная новизна

1. Выявлена линейная зависимость между дендритным параметром структуры d и триботехническими характеристиками поверхности Ni-Cr-B-Si покрытия в исследуемой области значений d (от 4,25 до 8,04 мкм).
2. Впервые предложено величину дендритного параметра d использовать как критерий износостойкости Ni-Cr-B-Si покрытий, по которому можно предварительно оценить триботехнические характеристики наплавленного покрытия до проведения испытаний на изнашивание.
3. Установлены закономерности влияния лазерной модификации и последующего отпуска на износостойкость быстрорежущей стали.

Методы исследования. Методы исследования базируются на современных представлениях контактных взаимодействий твердых тел. Для решения основных задач работы проводили испытания на изнашивание и определение коэффициента трения, механические испытания, металлографические исследования, электронно-микроскопический, спектрометрический и фазовый анализ. При обработке результатов экспериментов применяли статистические методы.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным подходом к решению поставленных задач, большим объемом экспериментальных данных с использованием их статистической обработки. Научные результаты и выводы по работе имеют теоретическое обоснование и не противоречат известным научным представлениям.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально установленная линейная зависимость между параметром микроструктуры (дендритным параметром d) наплавленного Ni-Cr-B-Si покрытия и характеристиками изнашивания в исследуемой области значений d от 4,25 до 8,04 мкм.
2. Обоснование возможности определять величину дендритного параметра d по изображениям поверхности покрытия без предварительной подготовки шлифов
3. Рекомендации по формированию структуры, обеспечивающей повышение износостойкости инструмента из быстрорежущей стали. Лазерную модификацию необходимо выполнять на режимах, обеспечивающих полное растворение первичных карбидов в металлической матрице и формирование структуры перенасыщенного твердого раствора с минимизированной

концентрационной неоднородностью. При этом количество остаточного аустенита снижается до 10...15%, что позволяет сократить длительность последующего отпуска до 5 минут. Такой способ модификации быстрорежущей стали позволяет в 3,2 раза повысить износостойкость по сравнению со стандартной обработкой за счет повышения эффективности использования легирующих элементов.

Практическая значимость работы

1. Разработаны способы модификации быстрорежущей стали, включающие лазерную закалку из жидкой фазы и последующий кратковременный отпуск (Патент РФ 2620656), (Патент РФ 2566224), позволяющие повысить износостойкость стали по сравнению со стандартной обработкой.
2. Разработан способ получения наплавленного износостойкого Ni-Cr-B-Si покрытия, включающий в себя лазерную наплавку и последующее плавление поверхности непрерывным лазерным излучением с целью формирования структуры с меньшей величиной дендритного параметра d и высоким уровнем износостойкости (Патент РФ 2693716).
3. Разработан метод количественной оценки износостойкости наплавленного Ni-Cr-B-Si покрытия по величине дендритного параметра d .
4. Разработанные способы модификации сплавов и метод определения характеристик износостойкости Ni-Cr-B-Si покрытий по величине дендритного параметра d переданы на ОАО «Тверской вагоностроительный завод».
5. Результаты диссертационной работы используются при реализации дисциплин «Материаловедение», «Технология конструкционных металлов» и «Основы научно-исследовательской работы» в образовательных программах высшего образования по направлениям подготовки бакалавров 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника; направлению подготовки магистров 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств в Тверском государственном техническом университете.

Личный вклад автора. Автор, совместно с научным руководителем, проводил: выбор темы, постановку цели и задач исследований, планирование работы и структуры диссертации. Выполнял испытания на изнашивание, анализ микроструктуры и микротвердости, обрабатывал и обобщал полученные результаты, принимал непосредственное участие в разработке способов модифицирования поверхностных слоев лазерным излучением для повышения износостойкости и подготовке материалов для публикаций.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были представлены на конференциях: Лучевые технологии и применение лазеров. VII Международная конференция, С-Петербург, 2012; Проблемы машиностроения – 2013. Научно-техническая конференция студентов и аспирантов машиностроительного факультета ТвГТУ, Тверь, 2013; XIX Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черноголовка, 2015; XLIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция, Москва, 2017; Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Международная научно-

техническая конференция, Минск, Беларусь, 2014, 2015, 2016, 2017; Наука сегодня: проблемы и перспективы развития. Международная научно-практическая конференция, Вологда, 2017; Трибология–машиностроению. XII Международная научно-техническая конференция, посвященная 80-летию ИМАШ РАН, Москва, 2018; Колачѣвские чтения. VI Всероссийская молодежная научно-практическая конференция, Ступино, 2021.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, включая 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в Web of Science, Scopus. Получено 3 патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Общий объем работы составляет 137 страниц машинописного текста, включая 45 рисунков и 28 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований.

Соответствие паспорту научной специальности: По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах» в части п. 3 и п. 7 раздела «Области исследований».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные задачи, положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ состояния вопроса и степени разработанности проблемы. Рассмотрены критерии оценки износостойкости сплавов и влияние лазерной модификации на триботехнические характеристики. Известно, что вид изнашивания не является характеристикой пары трения и может изменяться при различных условиях эксплуатации. Абразивное изнашивание во многих механизмах является ведущим. Природа этого вида изнашивания являлась предметом теоретико-экспериментальных исследований ряда ученых: М.М. Хрущова, М.А. Бабичева, В.Н. Кащеева, М.М. Тененбаума, Дж.Ф. Арчарда, Г.М. Сорокина, В.Н. Виноградова, М.Г. Колокольникова и многих других.

Если материалы пары трения имеют близкие значения твердости, то главную роль начинает играть адгезионный вид изнашивания. Изучение механизмов адгезионного износа связано прежде всего с именами Девида Тейбора и Эрнеста Рабиновича. Известно уравнение износа (уравнение Хольма – Арчарда), которое можно записать в форме:

$$V = \frac{k \cdot F_N}{HV} L. \quad (1)$$

Для абразивного и адгезионного изнашивания объемный износ V прямо пропорционален нормальной силе F_N , пути трения L и обратно пропорционален твердости HV более мягкого из взаимодействующих тел. Коэффициент k определяется эмпирически. Уравнение (1) показывает, что износостойкость прямо пропорциональна структурно-чувствительной характеристике механических свойств – твердости HV . В тоже время, экспериментально доказано, что стали одной твердости, но разного химического состава могут иметь различную

относительную износостойкость. Следовательно, одного критерия твердости недостаточно для достоверной количественной оценки износостойкости.

По сравнению с монокристаллами, поликристаллические материалы, согласно эмпирическому соотношению Холла – Петча (2), обладают повышенной прочностью σ_T и твердостью HV :

$$\sigma_T = \sigma_0 + K_T d_3^{-1/2}, HV = HV_0 + K_H d_3^{-1/2}, \quad (2)$$

где σ_0 и HV_0 – предел текучести и твердость монокристалла, K_T и K_H – коэффициенты Холла – Петча, d_3 – размер зерна. Соотношения (2) выполняются в широком диапазоне размеров зерен.

Подставляя соотношение Холла-Петча для твердости в (1), получаем в общем виде, что величина объемного износа зависит от величины размера зерна, т.е. $V \sim d_3^{1/2}$. Вывод о том, что с уменьшением размера зерна сплавы обладают более высокой износостойкостью получен экспериментально многими учеными. Однако количественный анализ этой зависимости до настоящего времени полноценно не проведен. Исследователи как правило отмечают только общие тенденции. Основываясь на анализе литературных источников, были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе описаны методики проведения испытаний. Для пар трения: наплавленное Ni-Cr-B-Si покрытие арматуры – стальной корпус, фасонная фреза из стали Р6М5 – заготовка быстрорежущей стали одним из основных видов изнашивания является абразивный. Для проведения сравнительных испытаний на изнашивание о закрепленный абразив была выбрана схема шар – плоскость (рисунок 1).

Для установления закономерностей влияния лазерного модифицирования на триботехнические свойства поверхностей, была подготовлена серия образцов. Для лазерной наплавки применяли самофлюсующийся порошок на никелевой основе марки ПГ-19Н-01 гранулометрического состава 40...160 мкм с химическим составом согласно ТУ 48-19-383-91. Материалом подложки служила углеродистая конструкционная сталь 30. После наплавки одну часть поверхности покрытия повторно переплавили с помощью лазерного излучения по режиму №1, вторую – по режиму №2, третью оставили в состоянии наплавки. В таблице 1 даны режимы выполнения наплавки и лазерной модификации.

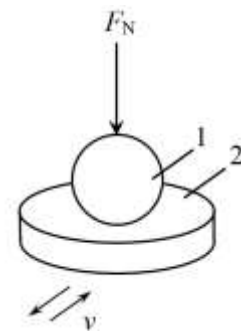


Рисунок 1 – Схема контактного взаимодействия при испытании на изнашивание. F_N – усилие; v – скорость поступательного движения; 1, 2 – пара трения

Таблица 1. Режимы лазерной модификации никелевого сплава

Название обработки	Мощность, кВт	Скорость, мм/с	Диаметр пятна, мм
наплавка	2,3	5	6
модификация по режиму № 1	2,0	10	6
модификация по режиму № 2	2,7	10	6

Заготовки быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73) размером 120×20×5 мм после стандартной обработки – объемной закалки и трехкратного отпуска подвергали лазерной модификации на следующих режимах: мощность излучения 1,5...2,5 кВт, скорость перемещения луча 10...25 мм/с, диаметр пятна излучения на обрабатываемой поверхности 6 мм. Глубина расплавления поверхностного слоя образцов изменялась от 20 до 1030 мкм. Затем выполняли однократный отпуск в муфельной печи при температуре 200, 300, 400, 500, 560 °С в течение 40 минут и кратковременный отпуск в течение 5 минут при температуре 200, 520, 540, 560, 580, 600 °С.

Испытания на изнашивание проводили на комплексе «Ресурс-ЭК», который включает в себя двухпозиционный микротрибометр и пятипозиционный стенд для испытаний на трение и изнашивание, а также необходимую измерительную аппаратуру и источники питания. В качестве контробразца использовали сферические наконечники с закрепленными алмазными частицами. Диаметры используемых наконечников 1...1,8 мм, средний размер абразивных частиц 25...130 мкм. На рисунке 2 показан участок стенда с одним из закрепленных образцов и внешний вид контробразца.

К контакту прикладывали усилие в 0,49 Н. Возвратно-поступательные перемещения контробразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора с частотой 20 Гц. За один период путь трения составлял 10...12 мм. Каждый образец подвергался испытанию в течение времени $t = 5,5...10$ часов. Общий путь трения $L = 5500...8600$ м.

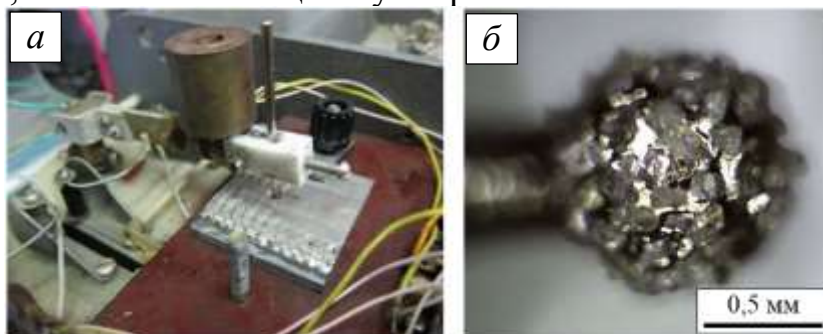


Рисунок 2 – Участок стенда с закрепленным образцом (а) и изображение контробразца (б)

Характеристики изнашивания образцов определяли по глубине следа (канавки) износа. Максимальную глубину h_{max} и ширину D канавки износа измеряли по профилограммам, записанным на профилографе-профилометре относительно средней линии неизношенной части шероховатой поверхности плоской контакт-детали. Характеристики изнашивания образцов находили в соответствии с ГОСТ 27674-88: скорость изнашивания $u = V/t$; линейную интенсивность изнашивания $I_h = h_{max}/L$; объемную интенсивность изнашивания $I_V = V/L$, где V – объем удаленного материала.

Коэффициент трения (его величина и зависимость от нормальной нагрузки) является комплексной информативной характеристикой пары трения, позволяющей оценить характер фрикционного взаимодействия и преобладающий механизм трения и изнашивания. Для определения коэффициента трения образцов был использован микротрибометр (Патент РФ 2150688). Измерения проводились по схеме шар-плоскость, плоский образец изготовлен из исследуемого материала, сферический контробразец из стали марки ШХ15 или оксида алюминия (корунда).

Коэффициенты трения определяли при нормальных нагрузках на контакт, которые создавали разновесами массой от 50 до 600 мг и устанавливали характер зависимости коэффициента трения от нагрузки. Диаметр пятна контакта 1...3 мкм. Измерение при одной нагрузке повторяли 10...20 раз.

Лазерную наплавку и модифицирование выполняли в Центре лазерных технологий г. Владимир с использованием автоматизированного комплекса модели АЛТКУ-3 с многоканальным CO₂ – лазером.

В третьей главе рассматриваются вопросы влияния величины дендритного параметра на износостойкость наплавленного покрытия. На рисунке 3 представлены РЭМ-изображения структуры покрытия состава Ni-Cr-B-Si (поперечный шлиф).

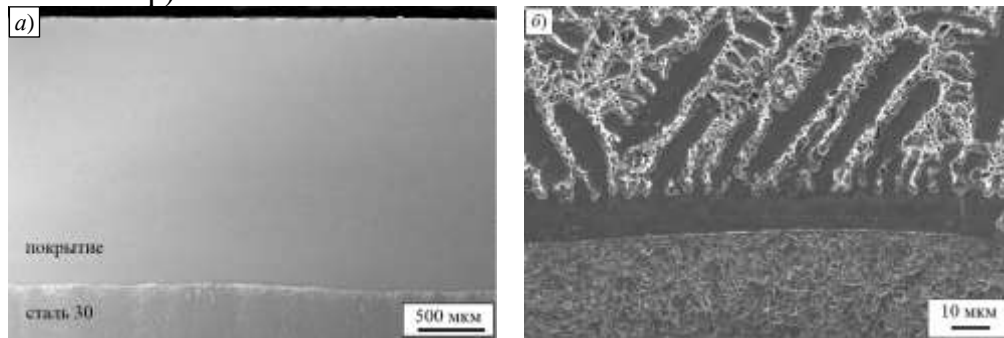


Рисунок 3 – РЭМ-изображения наплавленного Ni-Cr-B-Si покрытия:

а – нетравленный шлиф; б – микроструктура на границе с основой

Толщина наплавленного слоя однородна и составляет около 2 мм. Микротвердость наплавленного покрытия 4400±200 МПа. Фазовый состав – твердый раствор на основе Ni в количестве около 75 % и 25 % Ni₃B, входящего в состав эвтектики. После наплавки и лазерной модификации фазовый состав покрытия не изменился.

На рисунке 4 представлены РЭМ-изображения микроструктуры образцов. При лазерной наплавке и лазерной модификации формируется однотипная структура, различающаяся размером структурных составляющих. При выполнении лазерной обработки на различных режимах создавались разные условия кристаллизации расплава. Удобной оценкой влияния условий кристаллизации на дендритную структуру является измерение расстояний между дендритными ветвями второго порядка (дендритный параметр d , мкм). Для расчета скорости охлаждения расплава использовали известную корреляционную связь (3) между скоростью охлаждения при кристаллизации сплава и величиной дендритного параметра:

$$d = A \cdot v_{охл}^{-n}, \quad (3)$$

где $v_{охл}$ – скорость охлаждения, °C/с; A и n – постоянные, согласно справочным данным для никелевого сплава $A = 240$, $n = 0,45$. Результаты расчетов скорости охлаждения расплава при лазерном воздействии, а также значения величины дендритного параметра и уровень средней микротвердости представлены в таблице 2. При увеличении скорости охлаждения расплава уменьшается величина дендритного параметра и повышается микротвердость. При повторном лазерном плавлении поверхности покрытия по режиму №1 произошла высокоскоростная перекристаллизация сплава на глубину 100...150 мкм. По сравнению с наплавкой

скорость кристаллизации сплава возросла в 2,8 раза. В результате сформировалась более дисперсная микроструктура с меньшей величиной дендритного параметра d . При лазерной модификации по режиму №2 произошла перекристаллизация сплава на бóльшую глубину до 600 мкм. По сравнению с наплавкой скорость кристаллизации сплава снизилась на 1000 °C/с, что привело к увеличению значения дендритного параметра. Микротвердость покрытия в области лазерной модификации по режиму №2 понизилась на ~ 170 МПа.

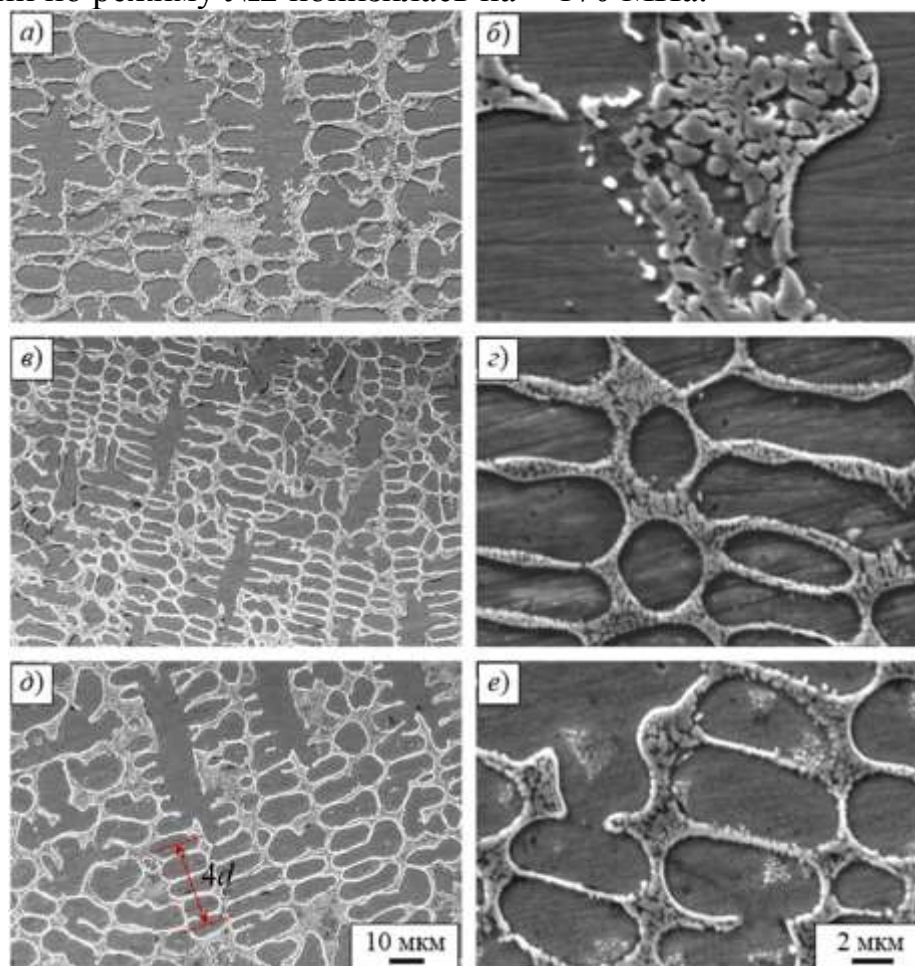


Рисунок 4 – РЭМ-изображения микроструктуры покрытия Ni – Cr – B – Si:
а, б – после наплавки; в, г – модификация по режиму №1;
д, е – модификация по режиму №2

Таблица 2. Влияние лазерной модификации на скорость охлаждения расплава, величину дендритного параметра и микротвердость

Название обработки	$v_{\text{охл}}$ при кристаллизации, °C/с	Дендритный параметр d , мкм	Микротвердость $HV_{0,1}$, МПа
наплавка	2800	$6,75 \pm 0,29$	4384 ± 48
модификация по режиму №1	7800	$4,25 \pm 0,29$	4487 ± 62
модификация по режиму №2	1900	$8,04 \pm 0,31$	4213 ± 72

Субрельеф поверхностей трения (рисунок 5) свидетельствует об окислительно-абразивном механизме изнашивания. Об этом говорит наличие

выглаженных участков, покрытых пленками (темные участки), и участков с разрушившейся пленкой (светлые участки).

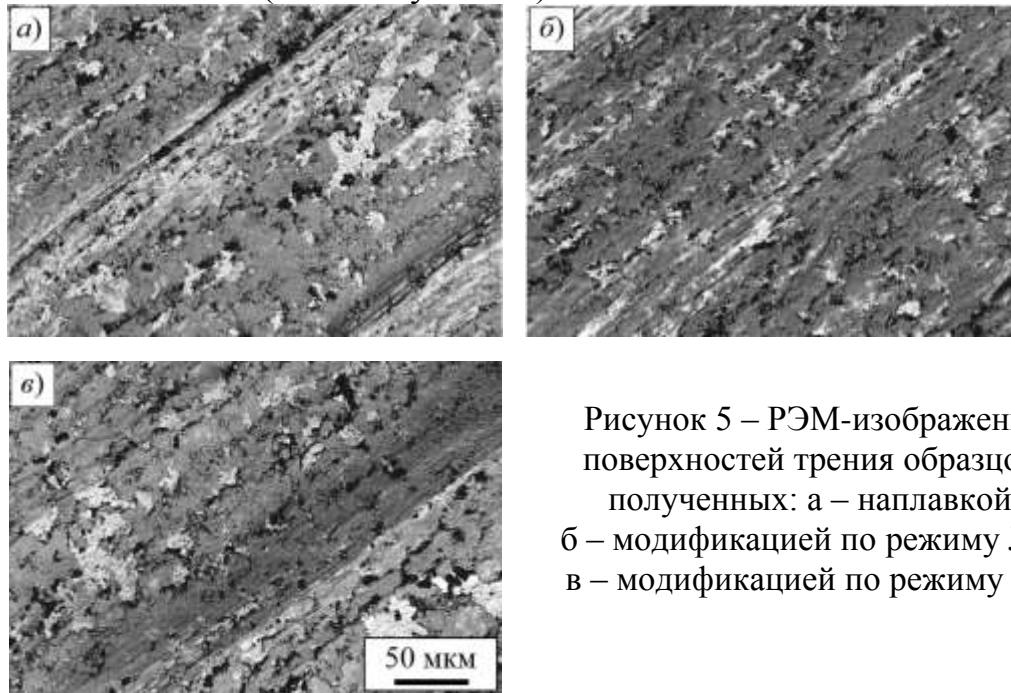


Рисунок 5 – РЭМ-изображения поверхностей трения образцов, полученных: а – наплавкой, б – модификацией по режиму №1, в – модификацией по режиму №2

Согласно данным таблицы 3, при лазерной модификации в зависимости от получаемого размера дендритного параметра возможно как повышение, так и снижение износостойкости покрытия по сравнению с наплавленным металлом. На рисунке 6 представлены регрессионные зависимости характеристик изнашивания от величины дендритного параметра d . Наблюдается линейная зависимость между дендритным параметром d в исследуемом интервале значений 4,25...8,04 мкм и характеристиками изнашивания, уравнение связи можно записать в общем виде (4).

$$y = a_1 d + a_0, \quad (4)$$

где y – характеристика изнашивания, a_1 и a_0 параметры уравнения. Значения параметров уравнения a_1 и a_0 и их стандартные отклонения σ приведены в таблице 4. Там же приведены значения линейного коэффициента корреляции r между характеристиками изнашивания и дендритным параметром и его стандартные отклонения σ_r .

Таблица 3. Характеристики изнашивания образцов покрытия Ni – Cr – B – Si

Обработка	$u, 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{ч}$	$I_h, 10^{-9}$	$I_v, 10^{-15} \text{ м}^2$
Наплавка	8,91	10,10	8,84
Модификация по режиму №1	3,03	4,69	3,01
Модификация по режиму №2	11,54	13,00	11,78

Коэффициент корреляции, стремящийся к единице, означает весьма высокую степень связи между характеристиками изнашивания и дендритным параметром. Параметры уравнений регрессии и коэффициенты корреляции, приведенные в таблице статистически значимы на уровне $p = 0,05$.

Величину дендритного параметра d можно использовать как структурно-чувствительный критерий износостойкости покрытий, по которому возможно

предварительно оценить свойства наплавленного покрытия до проведения испытаний на изнашивание.

Характеристики изнашивания

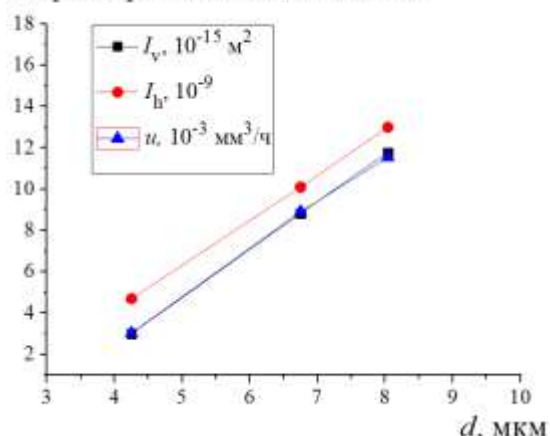


Рисунок 6 – Регрессионные зависимости характеристик изнашивания от величины дендритного параметра

Определить величину дендритного параметра d можно без специальной подготовки микрошлифов. После плавления поверхности покрытия непрерывным лазерным излучением, дендритный рельеф отчетливо виден благодаря высокотемпературному термическому травлению, происходящему во время высокоскоростной перекристаллизации поверхностного слоя (рисунок 7). Следовательно, параметр d можно определять по изображениям оплавленной лазерным излучением

поверхности покрытия, не прибегая к разрушающим методам контроля.

Таблица 4 – Значения параметров уравнения регрессии зависимой переменной (характеристики изнашивания) на независимую переменную (дендритный параметр) и значения линейного коэффициента корреляции

Характеристика, y	a_1	σ_{a1}	a_0	σ_{a0}	r	σ_r
u , $10^{-3} \text{ мм}^3/\text{ч}$	2,26	0,079	-6,52	0,514	0,9994	0,035
I_h , 10^{-9}	2,19	0,021	-4,63	0,138	0,9999	0,010
I_v , 10^{-15} м^2	2,32	0,013	-6,82	0,087	0,9999	0,006

Предложен инженерный метод определения характеристик износостойкости наплавленных покрытий состава Ni-Cr-B-Si по величине дендритного параметра d . Разработан способ получения наплавленного износостойкого покрытия состава Ni-Cr-B-Si, включающий в себя лазерную наплавку и последующее плавление поверхности непрерывным лазерным излучением с целью формирования структуры с меньшей величиной дендритного параметра d и высоким уровнем износостойкости (Патент РФ 2693716).

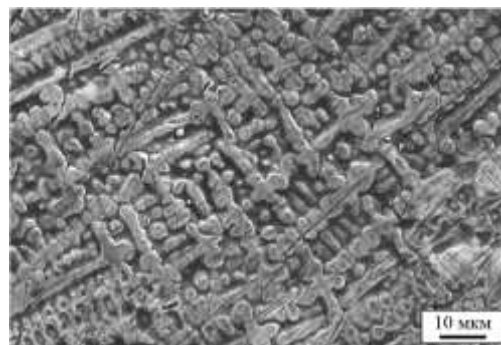


Рисунок 7 – Изображение поверхности покрытия в области модификации по режиму №1

Четвертая глава посвящена вопросам влияния лазерной модификации поверхности быстрорежущей стали Р6М5 и процессов дисперсионного твердения при последующем отпуске на триботехнические характеристики и разработке способов модификации поверхностных слоев лазерным излучением для повышения износостойкости фасонной фрезы.

Традиционная технология производства быстрорежущих сталей включает отливку, горячую деформацию слитков, закалку и трехкратный отпуск.

Существенному увеличению свойств препятствует карбидная неоднородность структуры. Крупные карбидные частицы или скопления карбидов, выходящие на поверхность трения, могут выкрашиваться, играя роль дополнительного абразива и ускоряя износ. Углерод и легирующие компоненты, входящие в состав первичных карбидов, не используются для повышения вторичной твердости и теплостойкости, приобретаемых сталями в результате дисперсионного твердения при отпуске. Согласно литературным данным показатель эффективности использования легирующих компонентов вольфрама и молибдена в стали Р6М5 после стандартной закалки составляет всего 55%. Одним из способов более полного растворения в матрице первичных карбидов и повышения эффективности использования легирующих компонентов является высокоскоростная перекристаллизация контактных поверхностей с помощью лазерного излучения. Микроструктура быстрорежущей стали, упрочненной по стандартной технологии представлена на рисунке 8 а, в зоне лазерного плавления на рисунке 8 б, после отпуска при температуре 560 °С на рисунке 8 в. Анализ изображений микроструктуры показал, что при лазерной модификации значительная часть карбидов растворилась в матрице. Эти данные подтверждаются и проведенным фазовым анализом.

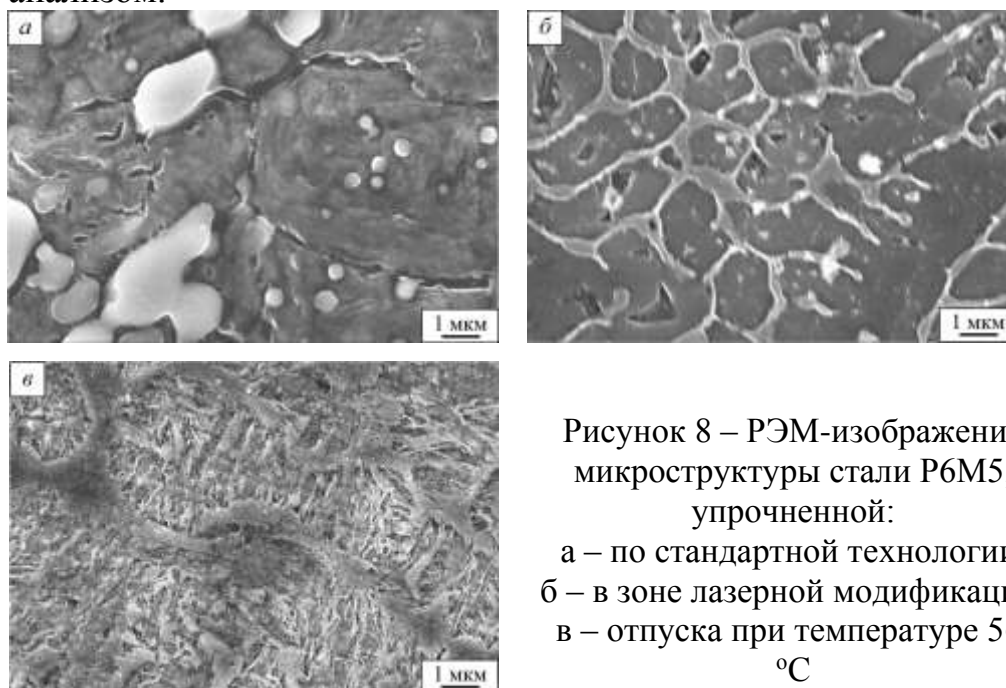


Рисунок 8 – РЭМ-изображения микроструктуры стали Р6М5, упрочненной:

а – по стандартной технологии,
б – в зоне лазерной модификации,
в – отпуска при температуре 560 °С

Характер зависимости микротвердости быстрорежущей стали после лазерной модификации от температуры нагрева при отпуске (рисунок 9) совпадает с традиционным способом упрочнения. При температурах отпуска выше 500 °С в стали начинаются процессы дисперсионного твердения с выделением специальных карбидов. Это приводит к возрастанию микротвердости.

Результаты измерений коэффициента трения f представлены в таблице 5. Установлено, что лазерная модификация поверхностного слоя и последующий отпуск при температуре 560 °С снижают коэффициент трения до 15 % по сравнению со стандартной обработкой. Во время испытаний изнашивание сопровождалось процессами образования оксидных пленок и последующего их разрушения. Изображения продуктов износа представлены на рисунке 10.

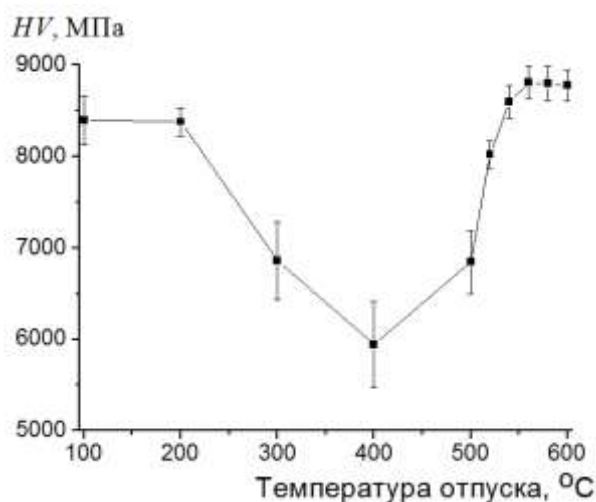


Рисунок 9 – Зависимость микротвердости стали Р6М5 в зоне лазерной модификации от температуры отпуска

Следует отметить, что продукты износа образцов быстрорежущей стали после лазерного плавления и оптимальной температуры отпуска 560 °С (рисунок 10, в) содержат значительное количество частиц размером 1 мкм и меньше. В продуктах износа образцов без отпуска и отпущенных при других температурах преобладают более крупные частицы размером 1...2 мкм.

Рентгеноспектральный анализ показал, что максимальное количество кислорода $37\pm3\%$ содержится в продуктах износа при испытании образцов, отпущенных при температуре

560 °С. Повышение температуры отпуска до 580 °С приводит к снижению количества кислорода до $33\pm2\%$ (рисунок 11).

Таблица 5 – Значения коэффициента трения

Температура отпуска, °C	f
без лазерной модификации	$0,12\pm0,01$
200	$0,12\pm0,01$
300	$0,11\pm0,01$
400	$0,12\pm0,01$
500	$0,11\pm0,01$
560	$0,10\pm0,01$

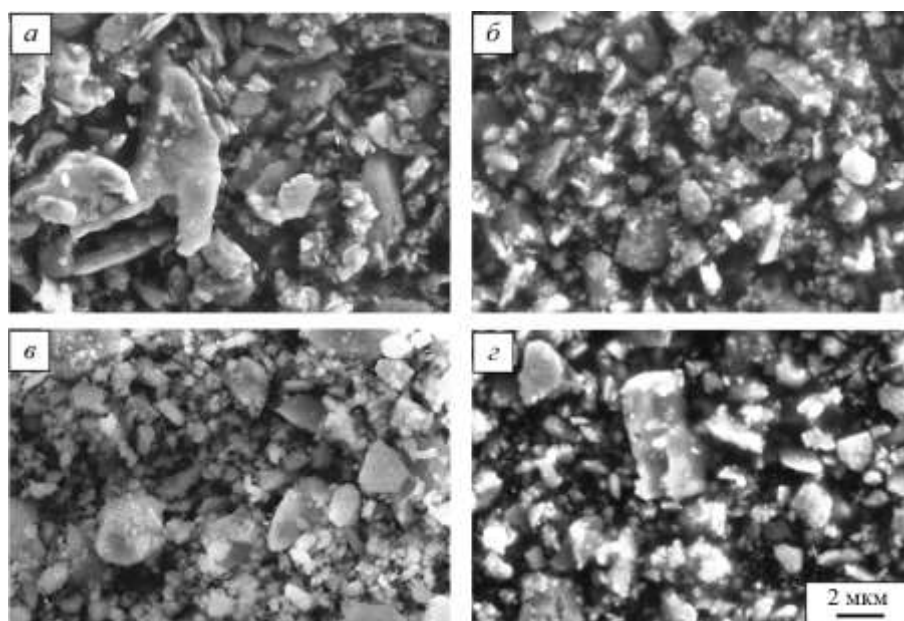


Рисунок 10 – РЭМ-изображение продуктов износа образцов стали Р6М5: а – лазерная модификация без отпуска, б – отпуск при температуре 520°С, в – 560 °С, г – 580 °С

На рисунке 12 представлены РЭМ-изображения поверхностей трения быстрорежущей стали. Прямоугольниками отмечены участки определения химического состава. Результаты химического анализа (таблица 6) подтвердили повышенное содержание кислорода в пленках. Места с разрушенными пленками на рисунке 12 выглядят более светлыми и содержат меньшее количество кислорода (спектры 1, 2 и 3).

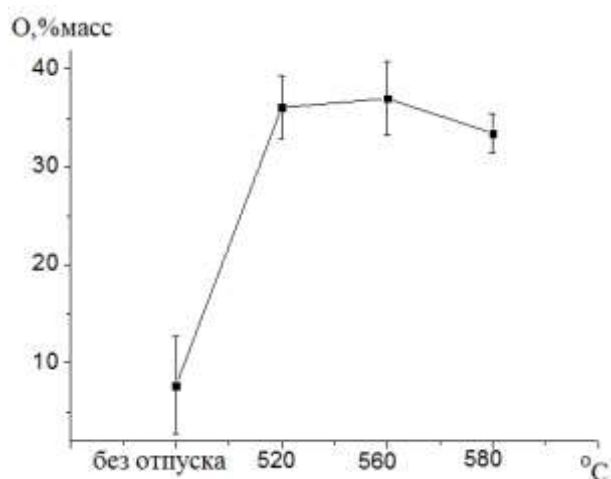


Рисунок 11 – Влияние температуры отпуска на количество кислорода в продуктах износа быстрорежущей стали

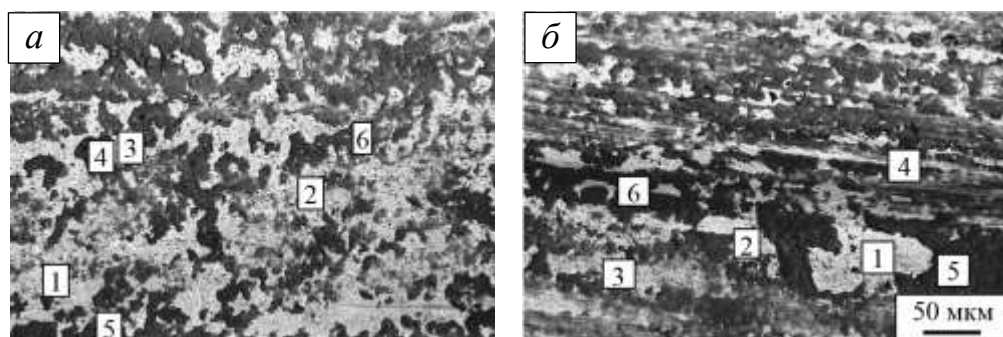


Рисунок 12 – РЭМ-изображения поверхностей трения: а – после лазерной модификации, б – после лазерной модификации и кратковременного отпуска при температуре 560 °С

Таблица 6 – Химический состав поверхностных слоев в зоне трения (% масс.)

Лазерная модификация						
№ спектра	O	V	Cr	Mo	W	Fe, C
1	12,26	1,51	3,32	5,69	6,84	ост.
2	7,70	1,51	3,52	-	7,14	ост.
3	5,35	1,56	3,64	-	8,04	ост.
4	33,31	0,97	2,54	4,52	5,45	ост.
5	29,12	1,12	2,93	-	5,83	ост.
6	24,97	1,33	3,17	-	6,07	ост.
Лазерная модификация и отпуск 560 °С						
1	6,42	1,98	4,24	6,01	7,05	ост.
2	9,14	2,03	4,31	-	7,45	ост.
3	8,52	1,72	3,90	5,42	6,94	ост.
4	20,68	1,51	3,56	4,72	5,40	ост.
5	36,86	1,22	2,68	-	4,99	ост.
6	33,31	1,37	2,61	3,95	4,47	ост.

В таблицах 7 и 8 представлены результаты испытаний на изнашивание образцов быстрорежущей стали. Как показали проведенные исследования, износостойкость быстрорежущей стали после лазерной модификации с

плавлением поверхности и отпуска при температуре 560 °С в 3,2 раза выше по сравнению со стандартной обработкой – закалкой в печи и трехкратным отпуском. По результатам проведенных исследований получены 2 патента на изобретение.

Таблица 7 – Характеристики изнашивания образцов после лазерной модификации и отпуска в течение 40 минут

Характеристика	Лазерная модификация без плавления поверхности	Лазерная модификация с плавлением поверхности, отпуск, °С						
		Без отпуска	150	200	300	400	500	560
$I_h, 10^{-9}$	1,9	3,5	5,6	3,1	3,3	4,6	2,4	0,6
$I_V, 10^{-15} \text{ м}^2$	1,4	2,8	3,7	1,8	2,9	2,7	2,2	0,2
$u, 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{ч}$	0,9	2,5	2,7	1,3	2,4	2,3	1,9	0,2

Таблица 8 – Характеристики изнашивания образцов после лазерной модификации и отпуска в течение 5 минут

Характеристика	Закалка, трехкратный отпуск	Лазерная модификация с плавлением поверхности, отпуск, °С						
		Без отпуска	200	520	540	560	580	600
$I_h, 10^{-9}$	8,6	7,9	8,9	6,1	6,1	3,1	5,8	6,0
$I_V, 10^{-15} \text{ м}^2$	4,1	5,2	4,7	3,6	2,6	1,2	3,1	3,0
$u, 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{ч}$	3,2	3,6	3,4	2,6	1,8	0,8	2,4	2,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований по влиянию структуры сплавов на закономерности изнашивания разработаны способы модифицирования контактных поверхностей лазерным излучением, повышающие их износостойкость до трех раз и впервые предложен критерий оценки износостойкости наплавленных покрытий по параметру микроструктуры – дендритному параметру d .

Основные научные результаты диссертации:

1. Показано, что лазерная модификация поверхности наплавленного Ni-Cr-B-Si покрытия влияет на дисперсность структуры. С повышением скорости охлаждения сплава при кристаллизации уменьшается величина дендритного параметра d и повышается микротвердость покрытия. Скорость изнашивания и объемная интенсивность изнашивания снижаются в 3,8...3,9 раз при уменьшении величины дендритного параметра d в 1,9 раза (с 8,04 мкм до 4,25 мкм). Покрытие после наплавки и последующей лазерной модификации на разных режимах имеет близкие значения коэффициента трения в исследованной области механических нагрузок от 0,49 до 3,92 мН, с повышением нагрузки величина коэффициента трения снижается по одинаковому закону. Характер зависимости коэффициента трения от нагрузки доказывает преобладание адгезионного взаимодействия пары трения наплавленное Ni-Cr-B-Si покрытие – сталь.

2. Для наплавленного Ni-Cr-B-Si покрытия получена линейная зависимость между дендритным параметром d и характеристиками изнашивания в исследуемой области значений d (от 4,25 до 8,04 мкм). Разработан способ

получения износостойкого Ni-Cr-B-Si покрытия (Патент РФ 2693716), позволяющий формировать структуру, обеспечивающую требуемые триботехнические характеристики.

3. Впервые предложено величину дендритного параметра d использовать как критерий оценки износостойкости Ni-Cr-B-Si покрытий, по которому можно предварительно определить свойства наплавленного покрытия до проведения испытаний на изнашивание. Величину дендритного параметра d рекомендуется определять по изображениям поверхности покрытия, без предварительной подготовки шлифов, т.к. благодаря высокотемпературному термическому травлению, происходящему во время высокоскоростной перекристаллизации поверхностного слоя при воздействии непрерывного лазерного излучения, дендритная структура хорошо выявлена.

4. Разработан инженерный метод оценки характеристик износостойкости Ni-Cr-B-Si покрытий после наплавки и лазерной модификации по величине дендритного параметра d . Метод заключается в определении значения параметра d по изображениям оплавленной лазерным излучением поверхности покрытия. По регрессионным зависимостям характеристик изнашивания от величины d определяются количественные значения характеристик изнашивания покрытия.

5. Установлены закономерности влияния лазерного модифицирования и последующего дисперсионного твердения на триботехнические характеристики быстрорежущей стали Р6М5. Показано, что после лазерного плавления поверхности и отпуска при температуре 560 °С в течение 5 минут сталь по сравнению со стандартной обработкой обладает в 3,2 раза более высокой износостойкостью. При этом коэффициент трения снижается до 15 %, что также является положительным фактором для уменьшения износа.

6. Разработаны способы лазерной модификации быстрорежущих сталей (Патент РФ 2620656), (Патент РФ 2566224), позволяющие повысить износостойкость. Эффект достигается благодаря полному растворению первичных карбидов в металлической матрице при лазерной модификации, что повышает эффективность использования легирующих элементов при дисперсионном твердении и формировании эксплуатационных свойств материала.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, переводные версии статей индексируемы в Web of Science, Scopus:

1. **Раткевич Г.В.**, Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А., Новоселова М.В. Абразивная износостойкость быстрорежущей стали Р6М5 после лазерного плавления и отпуска // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 5. С. 516-520.
2. Афанасьева Л.Е., **Раткевич Г.В.**, Новоселова М.В. Роль структурного фактора в повышении износостойкости Ni – Cr – В – Si покрытия после лазерной обработки // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 9. С. 55-60.
3. Афанасьева Л.Е., **Раткевич Г.В.** Лазерная наплавка покрытия NiCrBSiFe-WC с помощью многоканального лазера // Письма о материалах. 2018. Т. 8. № 3 (31). С. 268-273.

4. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., **Раткевич Г.В.** Упрочнение конструкционной стали с помощью многоканального СО₂лазера // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 1 (25). С. 8-11.

5. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., **Раткевич Г.В.**, Новоселова М.В., Гречишкин Р.М. Микроморфология поверхности и абразивная износостойкость инструментальной стали после газолазерной резки // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 12. С. 46-53.

Патенты

6. Патент РФ 2566224, МПК С21D 9/22, С21D 1/09, В23К 26/00, С21D 6/04 Способ упрочнения разделительного штампа / Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Барчуков Д.А., Зубков Н.С., **Раткевич Г.В.**; Заявл. 20.05.2014. Оpubл. 20.10.2015. Бюл № 29.

7. Патент РФ 2620656, МПК С21D 9/22, С21D 1/09 Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали / Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Новоселова М.В., **Раткевич Г.В.**, Румянцев А.А.; Заявл. 24.02.2016. Оpubл. 29.05.2017. Бюл № 16.

8. Патент РФ 2693716, МПК В23К 26/342, С23С 24/08 Способ получения износостойкого покрытия / Афанасьева Л.Е., **Раткевич Г.В.**, Новоселова М.В. Заявл. 17.12.2018. Оpubл. 04.07.2019. Бюл № 19.

Статьи в других изданиях:

9. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Ботянов Е.В., **Раткевич Г.В.**, Гречишкин Р.М. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным СО₂ лазером / Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8 (104). С. 10-13.

10. **Раткевич Г.В.**, Смолякова И.А., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Влияние температуры отпуска на триботехнические свойства упрочненной лазером быстрорежущей стали // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. 2019. № 12. С. 96-102.

11. **Раткевич Г.В.**, Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Износостойкость конструкционной стали упрочненной многоканальным лазером // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. 2018. № 11. С. 49-52.

12. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., **Раткевич Г.В.** Лазерная наплавка быстрорежущей стали // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. 2018. № 11. С. 53-57.

13. **Раткевич Г.В.**, Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Морфология поверхности наплавленного никелевого сплава после лазерной обработки // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. 2017. № 10. С. 33-36.

14. **Раткевич Г.В.**, Барабонова И.А., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Абразивная износостойкость инструментальной стали, упрочненной многоканальным лазером // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. 2016. № 9. С. 55-61.