

Макаров Александр Михайлович

**Разработка технологии формирования нанокomпозиционных
покрытий в системе Ni–Ti с повышенной твердостью и
износостойкостью**

2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Александров Сергей Евгеньевич,**
доктор химических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Вологжанина Светлана Антониновна,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и технологии художественных изделий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Пантелеев Игорь Борисович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Лазерный центр», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 27 января 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета У.2.6.6.18 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. П (Химический корпус), ауд. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» <https://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «__» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.6.6.18
кандидат химических наук

Тюрикова Ирина Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ответственные детали в судо- и машиностроении в процессе эксплуатации подвергаются высоким механическим нагрузкам, эрозионным, коррозионным и вибрационным воздействиям. Данные факторы существенно сокращают срок их службы, что вызывает необходимость проведения дополнительных дорогостоящих ремонтно-восстановительных работ. Известно, что наиболее интенсивная пластическая деформация протекает в приповерхностном слое изделия глубиной порядка 50–100 мкм. Усталостное разрушение начинается именно с этого слоя, и именно его состояние определяет долговечность изделия до зарождения усталостных трещин. Следовательно, путем упрочнения этого слоя можно увеличить ресурс службы ответственных узлов трения. Нанесение покрытий, имеющих высокие показатели функциональных свойств (твёрдость, износостойкость, коррозионная стойкость), является одним из путей, позволяющих существенно повысить срок их службы.

Степень разработанности темы исследования. Основные характеристики сплавов на основе никелида титана, представляющие интерес для их практического использования, это сверхупругое поведение и возможность реализации эффекта памяти формы при заданных температурах. В машиностроении его используют в качестве покрытия, увеличивающего ресурс работы механизмов, так как данный сплав имеет высокий уровень износостойких, антифрикционных, коррозионностойких и вибродемпфирующих свойств.

У многих методов нанесения износостойких покрытий имеются такие недостатки, как очень низкая скорость процесса и невозможность нанесения покрытий толщиной более 100 мкм, а также негативное термическое воздействие на получаемое покрытие, приводящее к образованию дефектов (растрескиванию, сколам вследствие внутренних напряжений), к окислению материала покрытия и подложки и т.п. Вследствие этого происходит рост наноразмерных структур в покрытии и увеличение термических внутренних напряжений в детали. Решить

данные проблемы можно, используя метод «холодного» газодинамического напыления (ХГДН) с последующей лазерной обработки. При «холодном» газодинамическом напылении температура нагрева порошка достигает лишь 60 °С, следовательно, негативного термического воздействия не происходит. За счет этого удастся сохранить первоначальную наноструктуру и фазовый состав исходного порошкового материала. В настоящее время проводятся исследования в области разработки объемно-упрочненных армированных наноразмерными керамическими компонентами композиционных порошковых материалов на основе пластичных матричных материалов, позволяющих получать с использованием метода ХГДН покрытия с повышенными физико-механическими свойствами (твердостью, адгезией и др.) и, соответственно, износостойкостью. В качестве упрочняющих керамических компонентов используют материалы с высокой микротвердостью (до 40 ГПа), такие как карбид бора, оксид алюминия, нитрид титана, карбид вольфрама и др. Последующая лазерная обработка необходима для создания ванны расплава на поверхности изделия, в которой соединяются компоненты и образуется никелид титана.

Перспективным направлением является создание комплексных технологий получения и обработки новых материалов, успешно сочетающих преимущества каждой составляющей. Наглядным примером такого сочетания является совместное использование технологий сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления и лазерного синтеза.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка технологии формирования нанокomпозиционных покрытий, обладающих повышенными износостойкостью (износ до 0,024 г/км) и микротвердостью (до 1200 HV), в системе Ni-Ti-наноWC с использованием метода «холодного» газодинамического напыления с последующей лазерной обработкой.

Для успешного достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Систематизировать, обобщить и проанализировать научно-техническую литературу по проблеме создания нанокomпозиционных порошков, а также нанесения износостойких наноструктурированных покрытий современными методами без деградации структуры.
2. Провести входной контроль порошковых материалов на соответствие формы частиц, химического и гранулометрического составов требуемым для получения износостойких покрытий на установке «холодного» газодинамического напыления «Димет-403» с использованием лазерной наплавки на установке Optomes LENS 750.
3. Исследовать влияние режимов установки «холодного» газодинамического напыления «Димет-403» на структуру, микротвердость, химический и фазовый составы покрытий системы Ni-Ti.
4. Исследовать влияние режимов термической лазерной обработки на структуру и фазовый состав полученных ХГДН-покрытий из сплава системы Ni-Ti.
5. Отработать и оптимизировать режимы получения нанокomпозиционного порошка состава Ni-Ti-наноWC.
6. Исследовать структуру и микротвердость покрытий, полученных «холодным» газодинамическим напылением порошковых смесей Ni-Ti-наноWC.
7. Исследовать влияние параметров лазерной обработки на структуру, микротвердость, химический и фазовый составы покрытий системы Ni-Ti-наноWC.
8. Исследовать влияние режимов установки лазерной наплавки Optomes LENS 750 на структуру и микротвердость покрытия из сплава NiTi.
9. Обосновать выявленные закономерности изменения износостойкости синтезированных покрытий в зависимости от их структуры.

Научная новизна настоящей диссертационной работы заключается в следующем:

1. В результате изучения механизма получения композиционного порошка системы 60Ni-40Ti, упрочненного наноразмерным керамическим твердым

компонентом WC в вибрационном истирателе, показано, что при содержании в системе Ni-Ti 30 мас.% наноWC в процессе механолегирования происходит практически полное заполнение микропор никеля, так как при дальнейшем добавлении наноWC увеличения его концентрации в механической смеси не наблюдается.

2. Экспериментально установлены закономерности влияния параметров процесса ХГДН на основные характеристики покрытий. Показано, что в покрытии системы Ni-Ti, сформированном методом ХГДН, отсутствуют трещины, сколы и другие дефекты структуры. Микротвердость составляет 150 HV, в покрытии присутствуют только отдельные фазы никеля и титана.

3. Выявлены закономерности влияния режимов лазерной обработки на свойства и структуру покрытий, полученных методом «холодного» газодинамического напыления. Показано, что в результате лазерной обработки в покрытии образуется фаза нитинол и в 4 раза повышается микротвердость покрытия системы Ni-Ti (от 150 HV до 600 HV).

4. Экспериментально выявлен характер влияния наноразмерного WC в исходной механической смеси системы Ni-Ti на свойства и структуру покрытий. Показано увеличение микротвердости от 300 HV до 600 HV покрытий, полученных с помощью метода ХГДН, за счет введения в структуру исходной механической смеси наноразмерного керамического сверхтвёрдого компонента 25 мас.% WC.

5. Выявлены закономерности влияния режимов лазерной обработки композиции системы Ni-Ti-наноWC на свойства и структуру покрытий. Установлено повышение микротвердости от 600 HV до 1200 HV в результате лазерной обработки ХГДН-покрытий системы Ni-Ti-наноWC.

6. Определен характер взаимосвязи структуры наноструктурированных покрытий, получаемых методом «холодного» газодинамического напыления с последующей лазерной обработкой, с их физическими и механическими свойствами. Показано, что в результате лазерной обработки покрытий не происходит роста структурной компоненты наноWC. Покрытие на подложке из

титана марки ВТ6 получается без трещин и сколов. Это позволяет сочетать высокую адгезионную прочность покрытия с высокой микротвердостью и износостойкостью.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Получены зависимости, позволяющие установить взаимосвязь между химическим составом покрытия системы Ni-Ti и химическим составом исходной механической смеси, а также толщины получаемого покрытия от режимов работы установки «холодного» газодинамического напыления (скорости перемещения сопла, скорости подачи порошка, температуры подогрева газа, расстояния от сопла до подложки).
2. Разработана схема реализации процесса «холодного» газодинамического напыления с последующей лазерной обработкой покрытия систем Ni-Ti и Ni-Ti-наноWC, обеспечивающая высокий показатель микротвердости (до 1300 HV) и износостойкости (0,024 г/км при линейной скорости 0,3 м/с и удельной нагрузке 0,68 кгс/мм²).
3. С помощью разработанной комплексной технологии (ХГДН с последующей лазерной обработкой) получено покрытие с повышенной износостойкостью на чувствительных к температурному воздействию материалах элементов конструкций машиностроения (титан марки ВТ6).
4. Даны рекомендации по практическому использованию полученных функциональных покрытий в условиях производства прецизионного машино- и судостроения.

Методология и методы исследования

Объектами исследования являлись методы «холодного» газодинамического напыления и лазерная обработка покрытий, нанокomпозиционные материалы и износостойкие покрытия на их основе. Для решения поставленных задач были использованы следующие методы исследования структуры и свойств материалов: оптическая и электронная микроскопия; рентгеноспектральный анализ; атомно-эмиссионный спектральный анализ; рентгенофлуоресцентный метод; метод испытания

износостойкости; гранулометрический анализ состава, анализ микротвердости, обработка экспериментальных данных с применением статистических методов анализа результатов на ЭВМ.

На защиту выносятся:

1. Выявленные взаимосвязи между технологическими параметрами процесса «холодного» газодинамического напыления и структурой, и свойствами формируемых покрытий.
2. Совокупность физико-химических закономерностей, определяющих условия формирования высококачественных покрытий в системах «Ni-Ti» и «Ni-Ti-наноWC» методом ХГДН.
3. Установленные зависимости формирования высококачественных износостойких ХГДН-покрытий систем Ni-Ti и Ni-Ti-WC в зависимости от технологических параметров процесса лазерной обработки.
4. Технология лазерной обработки ХГДН-покрытий в системах Ni-Ti и Ni-Ti-наноWC, обеспечивающая повышение микротвердости в 4 раза – от 150 HV до 600 HV (патент РФ № RU 2 701 612 C1, патент РФ № RU 192 902 U1).
5. Выявленные закономерности процесса лазерной обработки покрытий систем Ni-Ti и Ni-Ti-наноWC, в результате которой в покрытии образуется интерметаллидная фаза нитинол, что приводит к существенному повышению износостойкости (0,024 г/км при линейной скорости 0,3 м/с и удельной нагрузке 0,68 кг/мм²).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы определяется комплексным использованием современной аппаратуры, методов исследования и обработки данных, согласованностью экспериментальных данных.

Основные выводы работы подтверждаются испытаниями на опытном производстве. По основным результатам по теме диссертационного исследования получены диплом III премии за выступление на ежегодной конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии»

в 2017 г., диплом III премии за выступление на ежегодной конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» в 2018 г.

Результаты работы внедрены и эксплуатируются на предприятии ООО «Лазерный центр». Создан научно-производственный участок по нанесению интерметаллидных покрытий на опытном производстве НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей».

По материалам диссертационного исследования опубликовано 21 работа, из них 9 в научных журналах, рекомендуемых перечнем ВАК, 10 в научных журналах, индексируемых в базе Scopus, и 4 индексируемых в базе Web of Science, 4 тезиса докладов, получены 2 патента РФ.

Диссертация состоит из введения, списка сокращений, 5 глав, заключения и списка литературы (90 наименований). Материал изложен на 134 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, раскрывается ее научная новизна, практическая значимость, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены металлические, керамические и антифрикционные материалы, используемые в качестве износостойких покрытий в машиностроении. На основании сравнительного анализа сделаны выводы о том, что сплав нитинол является наиболее перспективным материалом для формирования износостойкого покрытия в ответственных узлах машиностроения в присутствии агрессивной среды, например водяного пара. Данный сплав имеет целый комплекс уникальных механических и функциональных свойств (высокие жаростойкость, твердость, коррозионная стойкость, низкий коэффициент трения, стойкость к износу и др.).

Анализ методов получения износостойких покрытий показал, что основным недостатком использования гетерофазных методов является

термический нагрев изделия и покрытия, вследствие чего происходят нежелательные фазовые переходы в структуре детали и покрытия, а также образуются окислы, заметно снижающие твердость изделия в целом. В связи с этим перспективным методом получения покрытий видится метод «холодного» газодинамического напыления (ХГДН), в котором отсутствует негативное термическое воздействие. Также в главе охарактеризованы методы повышения физико-технических свойств покрытий, такие как обработка лазерным лучом и внедрение твердых наноразмерных компонентов в покрытие. Стоит отметить, что наиболее интересным наноразмерным керамическим компонентом выбран WC , так как имеет высокую твердость и низкую стоимость.

На основании проведенного в главе анализа сформулированы цель работы и задачи исследования. В ходе литературного обзора материалов и методов получения износостойких покрытий был обоснован выбор порошковых материалов – матричной и армирующей составляющих, а также метод получения износостойких покрытий с последующей лазерной обработкой.

Во **второй главе** описаны используемые в работе технологическое и диагностическое оборудование и методики для реализации поставленной цели исследования.

Для реализации поставленной задачи были выбраны следующие порошковые материалы: порошок никеля марки ПНЭ-1, порошок титана марки ПТОМ-1, порошок нитинола марки ПВ-Н55Т45 и нанопорошок карбида вольфрама, полученный методом плазмохимического синтеза, с чистотой 99,65 мас.% и фракцией 50–85 нм.

Пластины из стали марки Ст3 и титана марки ВТ6 использованы в качестве подложек для получения износостойких защитных покрытий.

Исследуемые в работе покрытия получали на установке «холодного» газодинамического напыления «Димет-403», оснащенной роботом-манипулятором Kawasaki F3000.

Суть метода заключается в следующем (рисунок 1): сжатый воздух (1) после удаления влаги и масла в системе очистки (2) через регулятор давления

подается в камеру резистивного нагревателя (3), в котором разогревается до рабочей температуры, и подается в сверхзвуковое сопло Лавала (4). Напыляемый порошок из дозатора (6) подается в зону сопла и захватывается проходящим воздухом. На выходе сверхзвукового сопла формируется высокоскоростная струя смеси горячего воздуха с порошком. На панели управления (5) выставляется необходимый температурный режим и скорость подачи порошка.

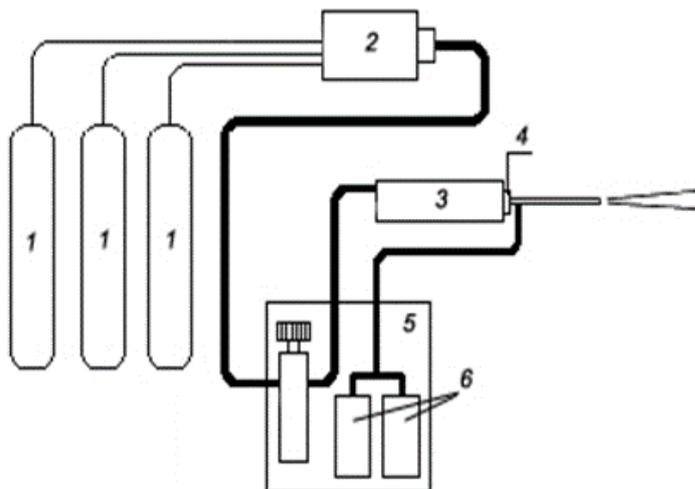


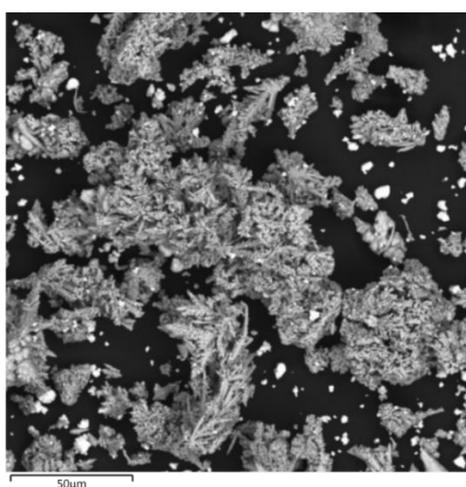
Рисунок 1 – Принципиальная схема установки Димет-403

Для лазерной термообработки ХГДН-покрытий и нанесения покрытия из порошка нитинола марки ТН-1 использовали установку Optomec LENS 750 по системе LENS (Laser Engineered Net Shaping). В системе LENS используется энергия волоконного лазера высокой мощности для послойного изготовления разнообразных деталей напрямую из порошкообразного сырья.

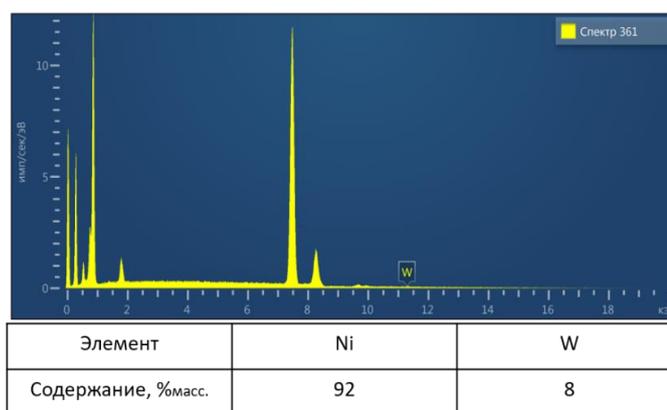
Для исследования полученных образцов применялись следующие современные аналитические методы: метод лазерной дифракции (анализатор Malvern Mastersizer 2000); рентгенофазовый анализ (Bruker D8 Advance); анализ определения микротвердости (твердомер ПМТ-3М); метод испытания на трение (машина трения УМТ-2168); рентгенофлуоресцентный метод (спектрометр Niton XL3t); атомно-эмиссионный спектральный анализ (спектрометр с индуктивно связанной плазмой Optima 7300 DV); растровая электронная микроскопия (РЭМ Tescan Vega 3 SBH с приставкой рентгеноспектрального микроанализа Oxford X-Act).

В **третьей главе** приводятся результаты входного контроля порошковых материалов с целью проверки их соответствия прилагаемым сертификатам. Установлено, что порошки титана марки ПТОМ-1 и никеля марки ПНЭ-1 имеют чистоту 99,9 мас.%, средний размер частиц составляет 35 мкм и 49 мкм соответственно, морфология частиц чешуйчатая. Порошки удовлетворяют техническим требованиям установки «холодного» газодинамического напыления «Димет-403». Наноразмерный порошок WC, имеет сферическую форму, минимальный размер частиц составляет 10 нм, а максимальный 80 нм. Порошок нитинола марки ТН-1, необходимый для получения альтернативного покрытия, имеет сферическую форму со средним размером частиц 117 мкм, что удовлетворяет технологическим требованиям установки лазерной наплавки LENS 750.

Экспериментально было установлено, что при увеличении относительного количества наноразмерного порошка WC в системе Ni-наноWC выше 30 мас.% концентрация наноWC в полученной механической смеси не увеличивается и составляет 8 мас.%. Для получения нанокпозиционного порошка системы Ni-Ti-наноWC для последующего получения покрытий к полученной смеси добавляли порошок Ti (рисунок 2).



А



Б

Рисунок 2 – Фотография (а) и спектр порошка системы Ni-Ti-наноWC (б)

В четвертой главе исследованы основные закономерности влияния параметров процессов «холодного» газодинамического напыления и лазерной обработки поверхности на микротвердость покрытий систем Ni-Ti и Ni-Ti-наноWC.

Предложенная в данной работе комплексная технология реализуется за счёт последовательно выполняемых операций (рисунок 3), а именно нанесение покрытия методом ХГДН и последующая обработка лазерным лучом.

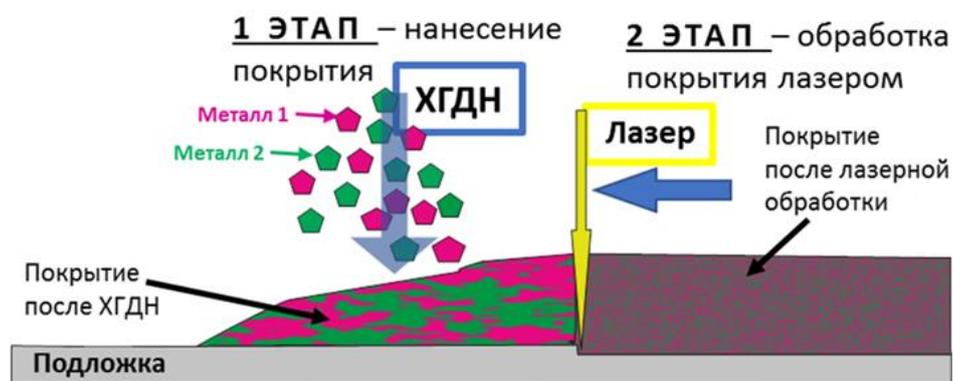


Рисунок 3 – Принципиальная схема процесса предложенной технологии

Исследована зависимость химического состава покрытия от химического состава механической смеси системы Ni-Ti при использовании метода ХГДН. По экспериментальным данным установлено, что для получения покрытия 55 мас.% Ni - 45 мас.% Ti состав механической смеси должен быть следующим: 60 мас.% Ni - 40 мас.% Ti. По литературным данным, стехиометрический состав 55 мас.% Ni - 45 мас.% Ti соответствует фазе нитинола.

По экспериментальным данным установлено, что оптимальным режимом для получения покрытия толщиной 300 мкм системы Ni-Ti методом «холодного» газодинамического напыления выбран следующий:

1. скорость воздушного потока – 650 м/с;
2. скорость перемещения сопла – 25 мм/с;
3. расстояние от сопла до подложки – 10 мм;
4. интервал сканирования между «дорожками» – 1,5 мм;
5. скорость подачи порошка – 10 г/мин.

Исследование влияния режимов лазерной термической обработки на структуру покрытия состава Ni-Ti показало, что в результате обработки лазерным лучом в покрытии образуется фаза нитинол (рисунок 4).

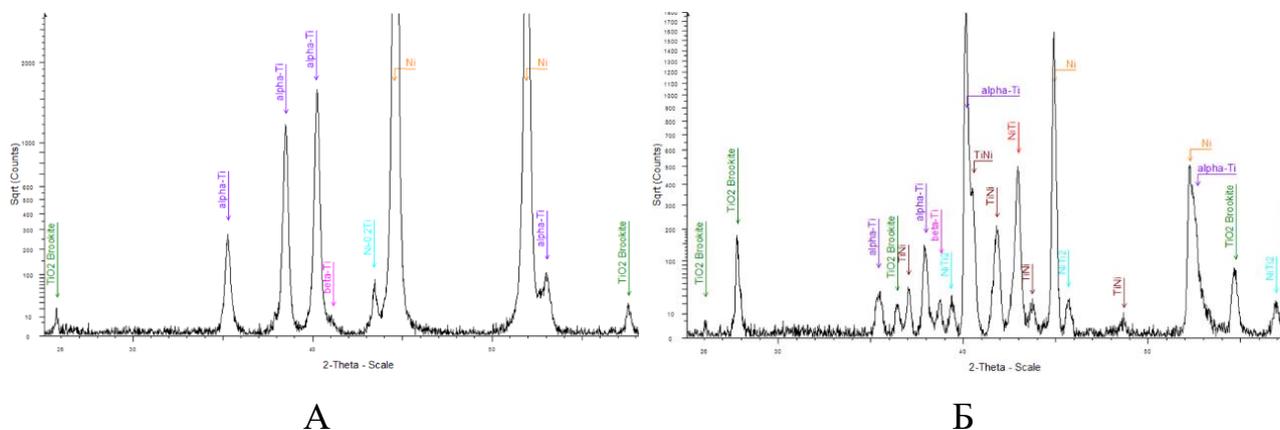


Рисунок 4 – Фазовый состав покрытия системы Ni-Ti до (а) и после (б) обработки лазерным лучом

Исследование влияния режимов процесса лазерной обработки поверхности показало, что увеличение в 4 раза микротвердости покрытия системы Ni-Ti (от 150 HV до 600 HV) связано с появлением фазы нитинол в покрытии (рисунок 5). Экспериментально установлен оптимальный режим лазерной обработки поверхности для получения покрытий без сколов и других дефектов (мощность лазерного излучения 400 Вт и интервал сканирования 400 мкм). На основании проведенного исследования сделан вывод, что при лазерной обработке ХГДН-покрытий системы Ni-Ti происходит образование фазы NiTi.

Результаты исследования покрытия рентгеноспектральным микроанализом границы ванны расплава и подложки следует, что химический состав материала плавно изменяется от подложки к покрытию, образуется слой перемешивания. При наличии данного слоя предотвращается образование трещин и других дефектов, а также повышается адгезионная и когезионная прочность.

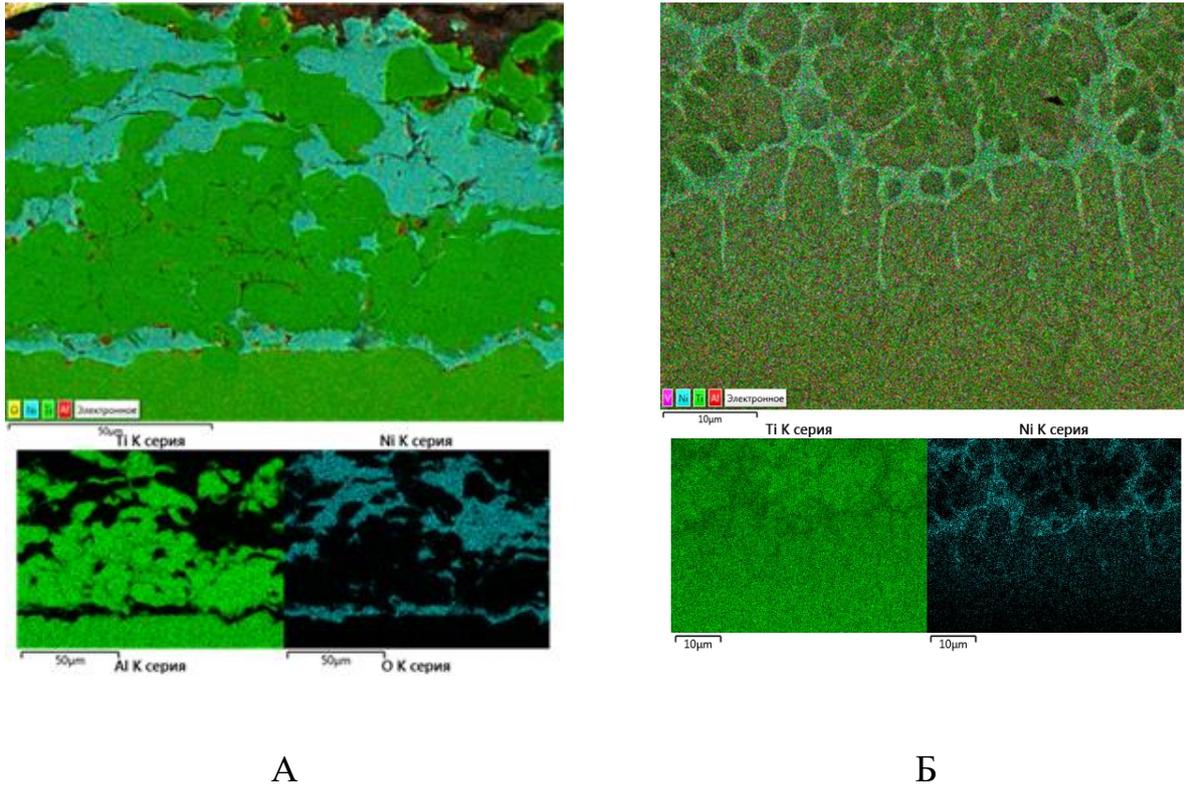
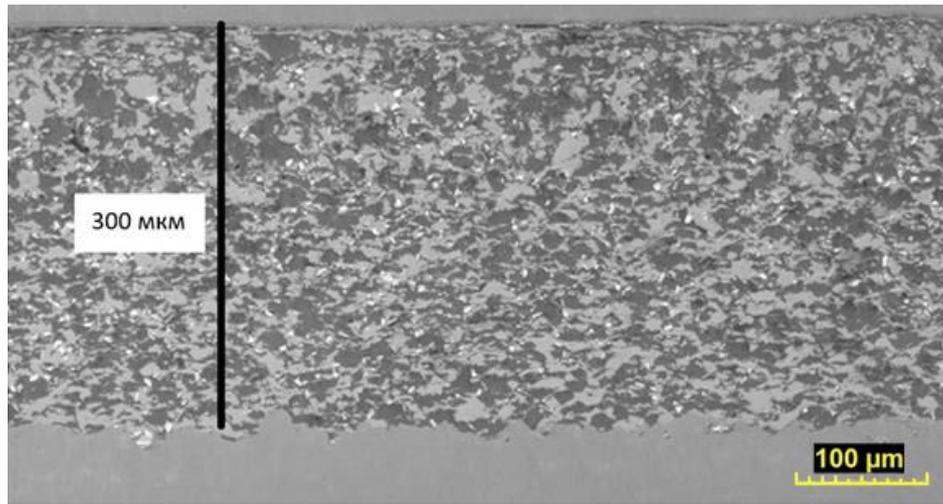
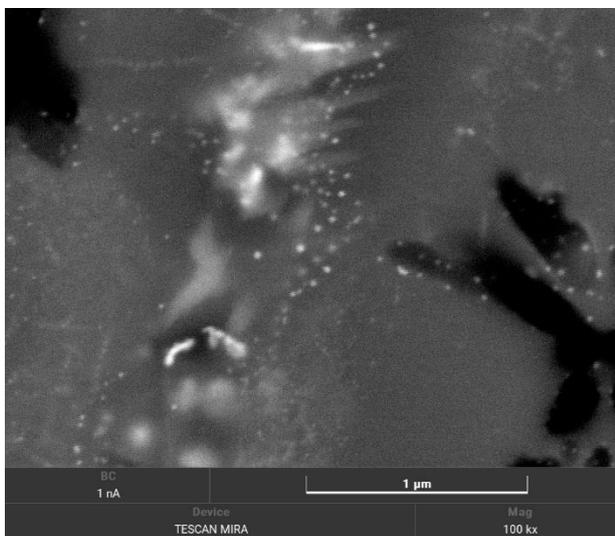


Рисунок 5 – Рентгеноспектральный микроанализ ХГДН-покрытия до (а) и после (б) лазерной обработки

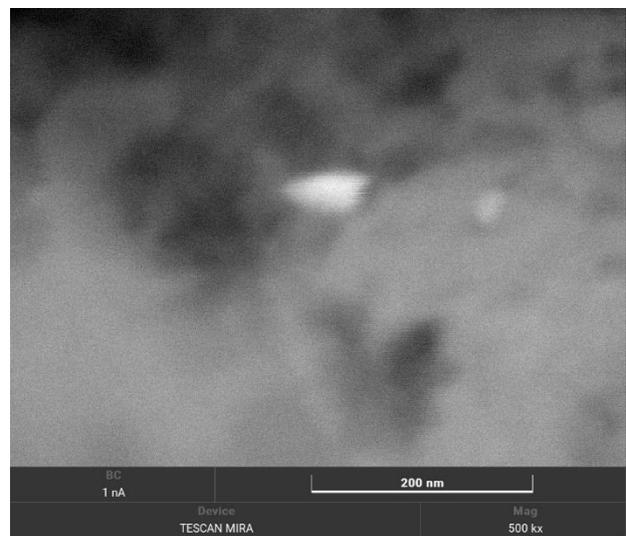
Из механической смеси Ni-Ti-наноWC были получены нанокпозиционные покрытия. Максимальная микротвердость ХГДН-покрытий, упрочненных наночастицами карбида вольфрама, составляет 620 HV при содержании 10 мас.% от общей массы механической смеси. Увеличение содержания наноWC выше 10 мас.% не привело к росту микротвердости полученных покрытий. Это может быть связано с тем, что в какой-то момент концентрация наноразмерного WC настолько увеличивается, что покрытие становится хрупким. На фотографии микроструктуры видны включения белого цвета (рисунок ба) можно увидеть скопление частиц WC, которые присутствуют в покрытие как конгломераты (рисунок б), так и как отдельные частицы (рисунок бв), имеющие размер 50–70 нм. Агломераты частиц WC заполняют микро- и нанопоры ХГДН-покрытия, тем самым увеличивают микротвердость покрытий.



А



Б



В

Рисунок 6 – Микроструктура покрытия из механической смеси (60Ni-40Ti)-25WC, а – увеличение 20х, б – увеличение 100х, в – увеличение 500х

Результаты исследования влияния режимов лазерной обработки на основные физико-механические свойства ХГДН-покрытий показывают, что для нанесения покрытий с требуемым уровнем свойств системы Ni-Ti-наноWC следует использовать шаг сканирования 400 мкм при мощности лазера 400 Вт. По сравнению с лазерной обработкой ХГДН-покрытия системы Ni-Ti при добавлении 10 мас.% наноразмерного WC микротвердость покрытия повышается в два раза (от 600 HV до 1200 HV). Вероятно, при сфокусированной лазерной обработке зона термического влияния имеет большую площадь

поверхности, поэтому отвод тепла происходит быстрее, при этом наблюдается незначительный рост частиц наноWC (рисунки 7 и 8).

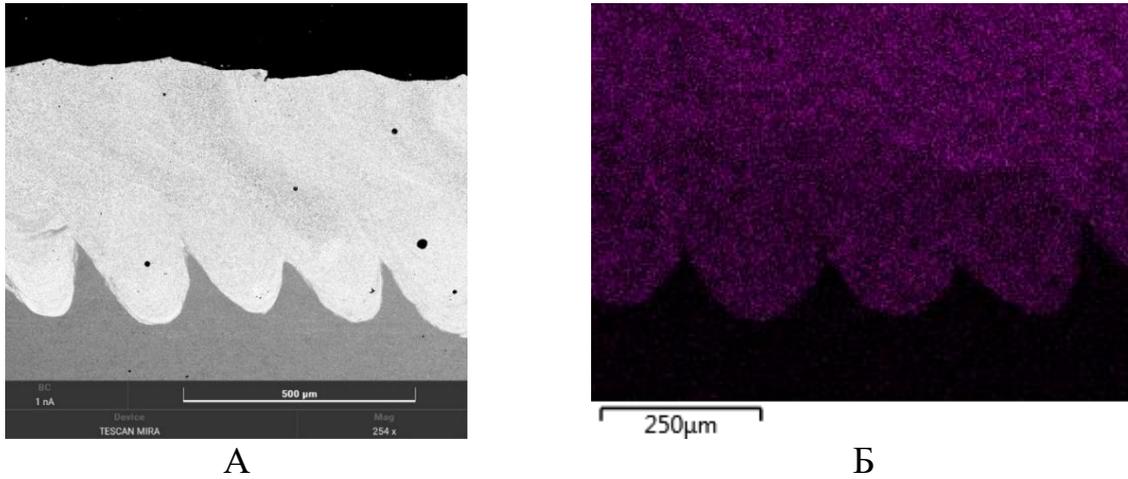


Рисунок 7 – Микроструктура (а) и результаты РСМА (по вольфраму) (б) покрытия состава Ni-Ti-WC после ЛОП

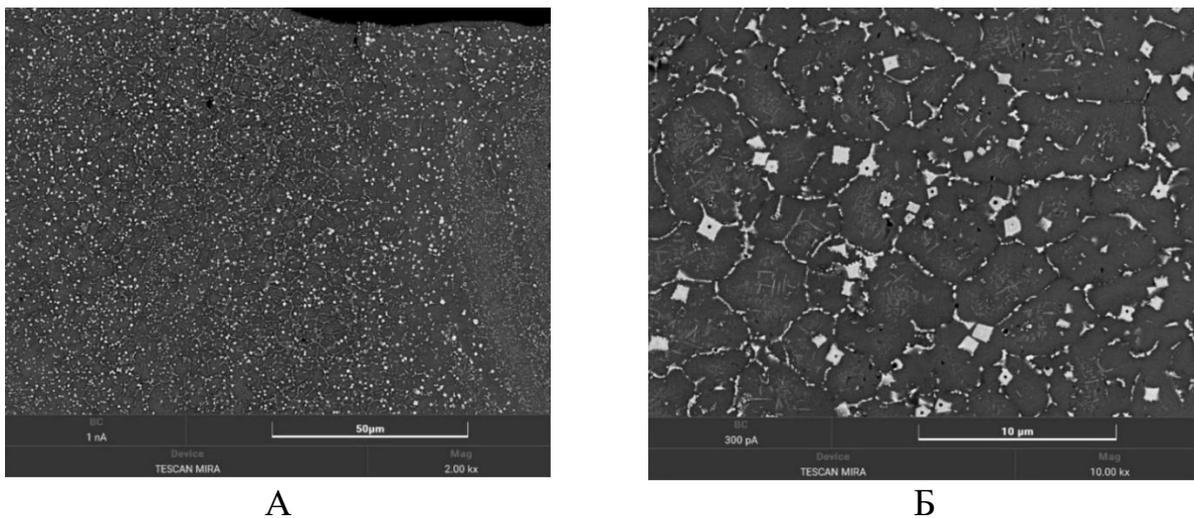


Рисунок 8 – Микроструктура покрытия состава Ni-Ti-наноWC при увеличениях 2000х (а) и 10000х (б)

Экспериментально показано, что покрытие системы (60Ni-40Ti)-10WC имеет наименьшую интенсивность износа (0,028 г/км и 0,041 г/км). Данным исследованием подтверждается, что при наибольшем содержании фазы нитинол в покрытии износостойкость повышается.

Разработана технология получения износостойкого покрытия системы Ni-Ti-наноWC с использованием метода «холодного» газодинамического напыления с последующей лазерной обработкой. Износостойкость образца, полученного по разработанной технологии, в 20 раз выше износостойкости

образца, полученного методом лазерной наплавки. По результатам исследования были получены защитные покрытия на бандажных полках титановых лопаток паровых турбин, что позволило увеличить стойкость к вибрационной нагрузке и увеличить длительность эксплуатации в два раза (рисунок 9).

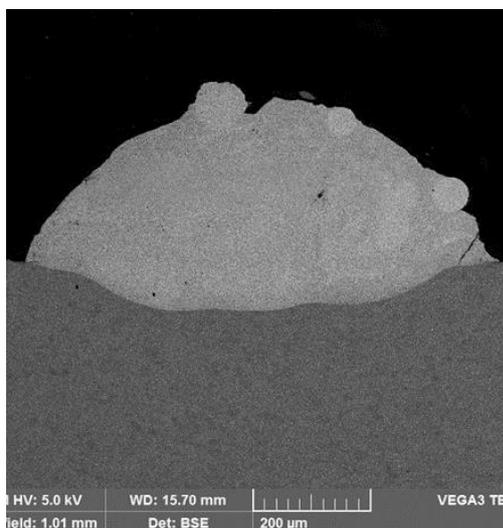


Рисунок 9 – Фотография бандажной полки лопатки паровой турбины с нанесенным износостойким покрытием системы Ni-Ti-наноWC (а – конечное покрытие, б – покрытие после шлифовки)

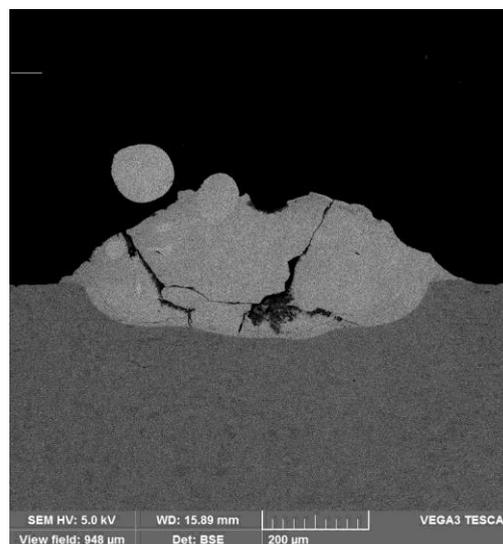
В **пятой главе** получены образцы сравнения методом лазерной наплавки покрытий из материала нитинол марки ТН-1. Эти образцы использовались для оценки износостойкости разработанных покрытий.

Исследовано влияние режимов лазерной наплавки на формирование покрытия из материала нитинол. Экспериментально показано, что при режиме работы лазера при мощности 500 Вт, скорости сканирования 17,25 мм/с и подачи порошка по режиму 8 (0,22 г/с) формируется беспористое покрытие без сколов и других дефектов (рисунок 10). Микротвердость данного покрытия составляет 650 HV. Данное покрытие имеет показатель микротвердости выше, чем при формировании покрытия по технологии, описанной в главе 4, однако эта разница невелика (650 HV против 600 HV). Это связано с тем, что в сформированном методом лазерной наплавки покрытии образуется большее количество фазы нитинол, так как исходная механическая смесь состояла только из порошка материала нитинол.

В таблице 1 приведены результаты исследования микротвердости полученных покрытий.



А



Б

Рисунок 10 – Микроструктура покрытия из материала нитинол (а – покрытие без дефектов, б – покрытие, имеющее скол)

Таблица 1 – Микротвердость полученных покрытий

Полученное покрытие	Метод получения покрытия	Микротвердость, HV
Покрытие системы Ni-Ti	ХГДН	300±12
Покрытие системы Ni-Ti	ХГДН + лазерная обработка	600±24
Покрытие системы Ni-Ti-WC	ХГДН	600±24
Покрытие системы Ni-Ti-WC	ХГДН + лазерная обработка	1200±48
Нитинол ТН-1	лазерная наплавка на установке LENS 750	650±27

Исследование трибологических свойств показало, что при добавлении в исходную механическую смесь 10 мас. % наноWC происходит увеличение износостойкости конечного покрытия, полученного по технологии, описанной в главе 5. Износостойкость образца, полученного по разработанной технологии, в 20 раз выше, чем износостойкость образца, полученного методом лазерной наплавки. Это связано с тем, что размер наночастиц WC в результате лазерной обработки поверхности не увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на анализе литературы, выбраны наиболее перспективные материалы для нанесения износостойких наноструктурированных покрытий, удовлетворяющих требованиям современного машиностроения (твёрдость, износостойкость).

Выявлены основные закономерности влияния температурно-скоростных параметров процесса ХГДН на физико-механические свойства износостойких покрытий системы Ni-Ti методом ХГДН. Показано, что в результате процесса ХГДН фазовых превращений в системе Ni-Ti не происходит. Микротвердость покрытия составляет 150 HV.

Установлены основные закономерности влияния лазерной обработки на физико-механические свойства ХГДН-покрытий системы Ni-Ti. Показано, что в результате лазерной обработки происходит образование фазы NiTi. Экспериментально установлено, что в результате лазерной обработки ХГДН-покрытия системы Ni-Ti микротвердость повышается в 4 раза (от 150 HV до 600 HV).

Показано, что при добавлении 10 мас. % наноWC в исходную механическую смесь микротвердость ХГДН-покрытия системы Ni-Ti повышается в 4 раза (от 150 HV до 600 HV).

Выявлены основные закономерности влияния лазерной обработки на физико-механические свойства ХГДН-покрытий системы Ni-Ti-наноWC. Показано, что в результате лазерной обработки ХГДН-покрытий системы Ni-Ti-наноWC микротвердость повышается в 2 раза (от 600 HV до 1200 HV). Обоснована технология получения нанокпозиционного покрытия, позволяющая сохранить наноструктуру покрытия.

Выявлены основные закономерности влияния температурно-скоростных параметров процесса лазерной наплавки на формирование покрытия из материала нитинол. Микротвердость нитинолового покрытия составляет 650 HV.

Разработана технология получения износостойкого покрытия системы Ni-Ti-наноWC с использованием метода «холодного» газодинамического напыления с последующей лазерной обработкой. Износостойкость образца, полученного по разработанной технологии, в 20 раз выше износостойкости образца, полученного методом лазерной наплавки.

Результаты работы внедрены и эксплуатируются на предприятии ООО «Лазерный центр». Создан научно-производственный участок по нанесению интерметаллидных покрытий на опытном производстве НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Геращенко, Д.А. Получение высоколегированного никелем слоя на поверхности низкоуглеродистой стали с использованием монометаллических порошков и лазерной обработки / Д.А. Геращенко, Р.Ю. Быстров, П.А. Кузнецов [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2021. – Т. 108. – № 4. – С. 138-148 (ВАК).

2. Gerashchenkov, D.A. Formation of Intermetallic Phases in Functional Coatings Prepared by Cold Gas-Dynamic Spraying / D.A. Gerashchenkov, A.Y. Askinazi, M.L. Fedoseev [et al.] // Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – Т. 62. – № 1-2. – P. 90-94 (Scopus).

3. Макаров, А.М. Оптимизация параметров процесса напыления покрытий методом ХГДН применительно к условиям производства на примере систем Ni-Ti и Ni-Al / А.М. Макаров, В.Р. Никитина, Д.А. Геращенко // Вопросы материаловедения. – 2020. – Т. 102. – № 2. – С. 108-116 (ВАК).

4. Makarov, A.M. Study of the method of obtaining functional intermetallic coatings based on Ni-Ti reinforced with WC nanoparticles / A.M. Makarov, D.A. Gerashchenkov, M.A. Markov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2019. – Т. 822. – С. 760-767 (Scopus).

5. Geraschenkov, D.A. Obtaining Functional Intermetallic Ni-Ti Coatings by Heterophase Transfer Combined with Laser Treatment / D.A. Geraschenkov,

A.M. Makarov, E.Y. Geraschenkova // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2019. – Т. 10. – № 6. – Р. 1378-1383 (Scopus).

6. Геращенко, Д.А. Получение функционального интерметаллидного покрытия Ni-Ti путем комбинации технологий гетерофазного переноса и лазерной обработки / Д.А. Геращенко, А.М. Макаров, Е.Ю. Геращенко, А.Ф. Васильев // *Вопросы материаловедения*. – 2018. – № 3(95). – С. 102-110 (ВАК).

7. Макаров, А. М. Оптимизация параметров процесса напыления покрытий методом ХГДН применительно к условиям производства на примере порошка алюминия / А.М. Макаров, Д.А. Геращенко, А.Ф. Васильев // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – Т. 90. – № 2. – С. 116-123 (ВАК).

8. Пат. 2701612 Российская Федерация, МПК С23С 4/067, В23К 26/34, С23С 4/12. Способ получения покрытий с интерметаллидной структурой / Д.А. Геращенко, Е.Ю. Геращенко, А.М. Макаров; заявитель НИЦ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей". – 2018123633; заявл. 28.06.2018; опубл. 30.09.2019.

9. Пат. 192902 Российская Федерация, МПК В23К 26/02, В23Р 6/00. Поддерживающее устройство для восстановительной лазерной наплавки изделий сложной формы / А.С. Жуков, И.В. Шакиров; заявитель НИЦ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей". – 2019120740; заявл. 01.07.2019; опубл. 04.10.2019.