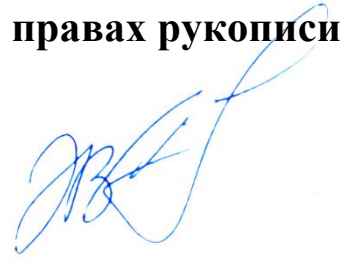


**На правах рукописи**



**Варданян Эдуард Леонидович**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННО-  
ПЛАЗМЕННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ  
КОМПОЗИТНЫХ НИТРИДНЫХ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ  
НАНО-СЛОЕВ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ**

**Специальность**

**2.6.6 - Нанотехнологии и наноматериалы**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Уфа – 2021**

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Научный консультант: доктор технических наук, доцент **Рамазанов Камиль Нуруллаевич**

Официальные оппоненты:

**Бажин Павел Михайлович**, доктор технических наук, ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, заместитель директора

**Аслаян Ирина Рудиковна**, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт, профессор

**Абраимов Николай Васильевич**, доктор технических наук, профессор, АО «ОДК» «Научно-исследовательский институт двигателей», начальник отдела

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита состоится 21 декабря 2021 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.11 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д.12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте: [www.ugatu.su](http://www.ugatu.su)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

2



Бобрук Е. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В машиностроительной отрасли все чаще начинают применять новые уникальные материалы для повышения эксплуатационных свойств выпускаемых изделий. Зачастую, материалы с более высокими физико-механическими свойствами труднее поддаются механической обработке. Низкая обрабатываемость резанием таких материалов приводит к преждевременному выходу из строя металлорежущих инструментов, что в свою очередь приводит к увеличению финансовых затрат за счет времени простоя дорогостоящих станков и затрат на приобретение новых инструментов. В связи с данной ситуацией, повышаются требования, которые предъявляются к современным металлорежущим инструментам (фрезы, резцы, долбежный инструмент и т.д.). Отечественные производители металлорежущего инструмента занимают значительно меньшую долю внутреннего рынка, чем зарубежные поставщики, что в сумме составляет не более 70 %, в то время как уровень импортозависимости станкоинструментальной промышленности находится на критическом уровне — более 90 %. Производство инструментальной продукции выступает важнейшим элементом единой системы инструментальной промышленности. Импортозависимость в инструментальном производстве обусловлена отставанием качества отечественного инструмента; отсутствием разнообразного отечественного рынка инструмента с покрытиями; недостатком кадровых ресурсов; малым количеством центров компетенции в отрасли, а также научных исследований (проектов), направленных на развитие отечественного инструмента.

Одна из ключевых задач *Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 г. от 5 ноября 2020 г. № 2869-р*: выполнение комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию и повышению качества отечественного инструмента широкой номенклатуры и создание производства инструментов мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности выпускаемой отечественной продукции и снижения импортозависимости, а так же для снижения рисков возникновения угрозы технологической безопасности.

### **Степень разработанности проблемы.**

Мировые лидеры производителей металлорежущих инструментов (Sandvik, Iscar, Mitsubishi и т.д.) для повышения конкурентоспособности своего продукта и решения проблемы низкого ресурса инструментов, уделяют пристальное внимание к различным методам упрочнения режущей поверхности (такие как поверхностное легирование, лазерная закалка, химико-термическая обработка, нанесение покрытий и т.д.). На сегодняшний день, наиболее широко применяемым методом увеличения ресурса металлорежущих инструментов производителями мирового уровня, является PVD методы (осаждение вакуумных ионно-плазменных покрытий).

Для повышения ресурса металлорежущих инструментов разработаны и исследованы большое количество упрочняющих покрытий, такие как: TiN, TiCN, TiC, CrN, (TiAl)N. Сегодня импортный инструмент поставляется с современными инновационными покрытиями, которые обеспечивают прирост производительности по сравнению с инструментом без покрытия в 5 — 10 раз. Наиболее широко применяемыми, для упрочнения металлорежущих инструментов, являются покрытия на основе системы Ti-Al-N. Покрытия данной системы зарекомендовали себя в инструментальном производстве благодаря уникальным физико-механическим свойствам, которые удовлетворяют для обработки различных групп конструкционных материалов.

Исследования, посвященные усовершенствованию существующих покрытий и разработке новых методов повышения характеристик, не прекращаются в настоящее время. Большой вклад в развитие направления упрочнения металлорежущих инструментов в Российской Федерации внесли А. С. Верещака, В. П. Табаков, А. А. Верещака, Л. М. Петров, Н. Н. Коваль, А. А. Лысенков, В. Г. Кузнецов и др. В работах доказано, что на физико-механические свойства покрытий влияют как структура (архитектура) покрытий, так и химический и фазовый состав.

Обзор литературных данных показал, что не смотря на широкое применение данных покрытий, есть потенциала для дальнейшего повышения эксплуатационных свойств. Сегодня основными направлениями усовершенствования покрытий для металлорежущего инструмента являются:

— добавление в состав покрытий дополнительных легирующих элементов (Zr, Mo, Cr, Y, Hf и др.), что способствует повышению механических свойств;

— подбор оптимального состава покрытий, управляя процентным соотношением алюминия к титану  $Ti_xAl_{1-x}N$ ;

— создание наноструктурного состояния или введение дополнительных функциональных слоев для повышения износостойкости.

Анализируя диаграмму состояния системы Ti-Al-N, видно, что в данной системе возможно образование различных интерметаллидных фаз, которые, в свою очередь, обладают высокими механическими свойствами, стойкостью к окислению и сохраняют свою работоспособность при более высоких температурах, чем твердый раствор Ti-Al-N.

В работах Н. А. Lipsitt, Y. W. Kim приводятся исследования физико-механических свойств функциональных материалов на основе интерметаллидных системы Ti-Al с различными фазовыми составами, и рекомендуют их в качестве перспективных материалов, способных сохранять работоспособность при высоких температурах. В работах Д. С. Аксенова, А. А. Лучанинова, А. А. Сметкина рассмотрены существующие методы получения покрытий TiAlN, приведены исследования влияния содержания Ti и Al на свойства покрытий и изучена кинетика окисления покрытий при различных температурах.

На основе литературного анализа установлено, что существующие модификации покрытий, полученных осаждением из составных катодов TiAl

(различного стехиометрического состава), представляют собой твердый раствор Al в TiN, которым является однофазный двухэлементный нитрид состава (Ti, Al)N с кубической структурой типа NaCl. В рассмотренных работах отсутствуют сведения о содержании интерметаллидных фаз в покрытиях и ее влияние на структурно-фазовые и физико-механические свойства покрытий.

Анализируя данное направление, было установлено, что прикладное применение интерметаллидных покрытий для повышения эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента отсутствует. Не исследованы физико-химические и структурно-фазовые закономерности формирования интерметаллидов при ассистированном вакуумно-дуговом осаждении.

Таким образом, можно сделать вывод, что до настоящей работы закономерности формирования износостойких покрытий на основе интерметаллидных соединений системы Ti-Al («ИнСиТА») и их физико-механических свойств, при ассистированном осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда (ПВДР) были мало изучены.

Данная работа посвящена исследованию фундаментальных и прикладных аспектов практического использования композиционных покрытий на основе «ИнСиТА», осажденных из ПВДР для повышения эксплуатационных свойств металлорежущих инструментов широкой номенклатуры

**Цели и задачи.** Целью работы является повышение стойкости металлорежущего инструмента за счет совершенствования морфологии, физико-химического, фазового состава и технологии нанесения композитных покрытий на основе нитридных и интерметаллидных нано-слоев титана и алюминия.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи:**

1. Исследование закономерностей фазовых превращений покрытий системы Ti-Al при ассистированном вакуумно-дуговом осаждении в среде инертного газа аргона и в среде реакционного газа азота;
2. Исследование морфологии нано-слоев и её влияние на физико-механические свойства покрытий при ассистированном вакуумно-дуговом осаждении в среде инертного газа аргона и в среде реакционного газа азота.
3. Разработка математической модели и компьютерная реализация численных методов оценки её применимости для прогнозирования стехиометрического, химического и фазового состава покрытий на основе «ИнСиТА» при осаждении из ПВДР в среде инертного или реакционного газа;
4. Технологические и экспериментальные исследования процессов получения композиционных наноструктурированных покрытий на основе «ИнСиТА» и при ассистированном вакуумно-дуговом осаждении;
5. Исследование физико-механических свойств композиционных наноструктурированных покрытий на основе «ИнСиТА» полученных осаждением из ПВДР;

6. Исследования взаимосвязи физико-механических свойств с архитектурой, химическим и фазовым составами многослойных наноструктурированных покрытий;
7. Разработка технологии нанесения износостойких покрытий на основе нитридных и интерметаллидных нанослоев титана и алюминия на металлорежущий инструмент и проведение производственных испытаний инструментов с композиционными покрытиями.

### **Научная новизна.**

1. Установлено, что при послойном осаждении покрытий из плазмы генерируемой электродуговыми испарителями оснащёнными однокомпонентными катодами из титана и алюминия и при ассистировании процесса плазменным источником с накальным катодом для дополнительной ионизации реакционного (азота) или инертного (аргона) газа, а также при нагреве подложки до температуры  $450^{\circ}\text{C}$ , наряду соединений Ti и Al с азотом (в случае реакционного газа), в покрытии так же образуются интерметаллидные соединения, а именно фазы  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{TiAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ .

2. На основе разработанной математической модели, доказана возможность прогнозирования стехиометрического состава покрытий в зависимости от технологических параметров. Проведено качественное сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

3. Рентгеноструктурным анализом доказано, что изменение скорости вращения рабочего стола с 1 до 14 об/мин, а соответственно уменьшение толщины слоев с  $\sim 50$  до  $\sim 5$  нм приводит к увеличению содержания нитридных и интерметаллидных фаз при осаждении в среде азота, и увеличения содержания интерметаллидных фаз при осаждении в среде аргона, с сопровождением уменьшения содержания чистых металлов Ti и Al.

4. Установлена зависимость толщины нано- и макро- слоев на микротвердость композитных покрытий. Уменьшение толщины нанослоев до 5 нм и одновременное увеличение толщины макрослоев до 0,5 мкм, приводит к увеличению микротвердости многослойных композитных покрытий с 1500–1800 до 3700–4500  $\text{HV}_{0,05}$ .

5. Установлена зависимость влияния соотношения толщины макрослоев  $h_{\text{Ti-Al}}/h_{\text{Ti-Al-N}}$  в покрытии на основе композитных интерметаллидных и нитридных нанослоев титана и алюминия на коэффициент упругого восстановления ( $W_e$ ). При этом покрытия с  $h_{\text{Ti-Al}}/h_{\text{Ti-Al-N}} = 1$  обладает большим значением  $W_e = 65,4\%$  при критической нагрузке 25Н.

6. Установлена эффективная толщина нитридных и интерметаллидных слоев, которая обеспечивает уровень физико-механических и эксплуатационных свойств. При толщине макрослоев равной 0,5 мкм нанотвердость композиционного покрытия составляет  $\sim 4500\text{HV}_{0,05}$ , а модуль упругости  $E = 200\text{ГПа}$ .

## **Теоретическая и практическая значимость.**

Впервые разработаны:

способ получения износостойкого градиентного покрытия системы Ti-Al на стальной детали в вакууме (Патент № 2662516 от 26.07.2018), способ получения износостойкого покрытия на основе интерметаллида системы Ti-Al (Патенты № 2489514 от 22.03.2012), способ получения покрытия на основе «ИнСиТА», синтезированного в среде азота (Патент № 2689474 от 28.05.2019), способ нанесения износостойкого покрытия ионно-плазменным методом (Патент № 2694857 от 18.07.2019) и способы упрочнения металлорежущих инструментов (Патент № 2699700 от 27.03.2019, Патент № 2697749 от 19.08.2019, Патент № 2700344 от 16.09.2019) осаждением покрытий на основе «ИнСиТА» из ПВДР. Данные способы легли в основу технологических процессов упрочнения металлорежущих инструментов широкой номенклатуры, позволяющих увеличить стойкость до 4 раз по сравнению с импортными аналогами. Доказаны целесообразность и эффективность нанесения износостойких покрытий на основе композитных интерметаллидных и нитридных нанослоев титана и алюминия из ПВДР на металлорежущие инструменты широкой номенклатуры.

Разработана математическая модель и на ее основе программа для ЭВМ, позволяющая спрогнозировать химический и стехиометрический состав покрытия в зависимости от технологических параметров (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616194, № 2019617973).

Разработаны технологические режимы формирования композиционных наноструктурных покрытий «ИнСиТА», осажденных в среде реакционного (азот) и инертного (аргон) газов. Покрытия, полученные по разработанным технологическим режимам, позволили увеличить ресурс металлорежущего инструмента до 3 раз по сравнению с импортным инструментом (с коммерческим покрытием). Повторяемость полученных результатов разработанных покрытий подтверждена актами производственных испытаний металлорежущих инструментов широкой номенклатуры, а также внедрением на серийное производство и упрочнением концевых фрез в количестве более 5000 штук.

### **Внедрение результатов работы:**

— Разработан и внедрен типовой технологический процесс нанесения композиционных покрытий на основе «ИнСиТА» на инструмент «Фреза» из твердого сплава на ПАО «ОДК-УМПО».

— Разработан и внедрен типовой технологический процесс нанесения композиционных покрытий на основе «ИнСиТА» на инструмент «матрица» холодновысадочного автомата на ОАО «БелЗАН».

— Разработан и рекомендован к внедрению типовой технологический процесс нанесения композиционных покрытий на основе «ИнСиТА» на инструмент «Фреза» из быстрорежущей стали на АО «УАП «Гидравлика».

— результаты диссертационной работы были использованы на промышленных предприятиях: ООО «Проект Р» г. Новосибирск, АО «Электросоединитель» п.г.т. Уруссу, АО «Уфимское агрегатное производственное объединение» г. Уфа, АО «Смоленский авиационный завод» г. Смоленск и др.

**Методология и методы исследований.** Исследования, включенные в диссертацию, базируются на фундаментальных положениях материаловедения и на накопленном опыте и результатах работ в области технологии осаждения покрытий и специальных свойств поверхностей. Экспериментальные методы исследования выбирались в соответствии с поставленной целью диссертационной работы с учетом особенностей изучаемых объектов и включали: метод электронной микроскопии с использованием: рентгеновского микроанализатора; инвертированного универсального металлографического микроскопа; метода рентгенофазового анализа на дифрактометрах; метода измерения трибологических характеристик и другие методики. Для статистической обработки экспериментальных данных использовались стандартные и специально разработанные методики и программы.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Закономерности послойного осаждения покрытия из плазмы генерируемой электродуговыми испарителями оснащенными однокомпонентными катодами из Ti и Al в среде реакционного (азота) или инертного (аргона) газа, при нагреве подложки до температуры 450 °С, обеспечивающие образование новых наноструктурных интерметаллидных фаз TiAl, Ti<sub>3</sub>Al.

2. Математическая модель, для прогнозирования стехиометрического состава покрытий в зависимости от состава газа (реакционного или инертного). Верификационные исследования применимости математической модели.

3. Взаимосвязь скорости вращения рабочего стола в диапазоне с 1 до 14 об/мин и толщины слоев (диапазон от ~50 до ~5 нм) с количественными параметрами содержания нитридных и интерметаллидных фаз при осаждении в среде азота и аргона.

4. Взаимосвязь чередующихся наноструктурных слоев Ti и Al в диапазоне от ~50 до ~5 нм и микротвердости покрытий, показывающая что уменьшение толщины нанослоев приводит к увеличению микротвердости покрытий синтезированных в среде азота с 1500–1800 до 2700–3500 HV<sub>0,05</sub>, а для синтезированных в среде аргона со значения 400 до 800 HV<sub>0,05</sub>.

5. Взаимосвязь соотношения толщины слоев  $h_{Ti-Al}/h_{Ti-Al-N}$  в композиционном многослойном покрытии с коэффициентом упругого восстановления материала (We), причем покрытия с одинаковой толщиной обладают большим значением коэффициента We при критической нагрузке.



## **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задачи, использованием комплексного подхода и современных сертифицированных методов исследования, а также статистической обработкой результатов исследований.

Основные результаты диссертации докладывались на международных и всероссийских научных конференциях, симпозиумах и семинарах: «Вакуумная наука и техника» (2010 — 2014); международной конференции «Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum» (Томск, 2012); международной конференции «Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum» ISDEIV 2014 (Мумбаи Индия, 2014); региональных научно-технических конференциях (Уфа, 2010 — 2012), международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» БМП 2014, БМП 2018 (Москва, 2014, 2018), X Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2017), XXIV Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Магнитогорск, 2018), «Энергосбережение. Наука и образование» (Набережные Челны, 2017), «Вакуумная техника и технологии» (Санкт-Петербург, 2016, 2018), International Congress on Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018, 2020) (Томск, 2018, 2020), 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Greifswald, 2018), международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2018), 21-st international conference on surface modification of materials by ion beams (Томск, 2019), 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP 2019) (Томск, 2019).

### **Публикации**

По результатам исследований опубликованы 40 печатных работ, в том числе коллективная монография, 30 статей в журнале из перечня ведущих научных журналов и изданий ВАК РФ, 20 работ индексируются в Scopus и Web of Science, 9 патентов на изобретения, 2 программы ЭВМ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация изложена на 296 страницах машинописного текста, содержит 154 рисунки и 39 таблиц. Работа состоит из введения, 7 глав, общих выводов, приложения и списка литературы из 172 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности выбранной темы, отражены цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и положения выносимые на защиту.

**В первая глава.** В обзоре рассмотрены современные методы нанесения износостойких покрытий для увеличения ресурса металлорежущих инструментов, основные виды существующих покрытий, а также их свойства. Рассмотрены работы А. А. Андреева, В. П. Табакова, А. С. Верещака, Л. М. Петрова, Н. Н. Ковалю, В. В. Денисова, С. Н. Григорьева, А. А. Лозована, В. П. Сергеева, В. Г. Кузнецова, А. А. Лысенкова, В. Ф. Безъязычного, А. А. Лучанинова, Е. А. Левашова, Ю. В. Панфилова, С. Р. Шехтмана и др. На основе исследований установлено, что нанесение композиционных покрытий из ПВДР является наиболее эффективным и распространенным способом для упрочнения металлорежущих инструментов, и обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами получения покрытий: безинерционность процесса, возможность получения покрытий тугоплавких металлов и сплавов (в том числе и многокомпонентных), возможность получения равномерных по толщине покрытий, высокая скорость осаждения.

По результатам литературного обзора установлено, что для улучшения эксплуатационных свойств и повышения ресурса металлорежущих инструментов ведущими учеными разработаны различные покрытия, которые отличаются по количеству основных химических элементов, входящих в ее состав (одноэлементные (TiN, TiCN, TiC, CrN, MoN), и многокомпонентные (TiAlN, CrAlN, TiCuN и др.)). Широкое распространение для упрочнения металлорежущих инструментов получили износостойкие покрытия системы Ti-Al-N.

Ведущими учеными доказано, что легирование алюминием покрытия TiN позволяет значительно увеличить ее твердость, температуру эксплуатации и инертность к обрабатываемым конструкционным материалам. На сегодняшний день установлены закономерности влияния процентного содержания алюминия ( $Ti_xAl_{1-x}N$ ) на физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий. Текущие исследования, проводимые учеными, для повышения эксплуатационных свойств и ресурса инструмента с покрытием имеют несколько разнонаправленных направлений: добавление в состав покрытий новых легирующих элементов (рисунок 1), изменение стехиометрического состава покрытия, формирование наноструктурных покрытий и др.

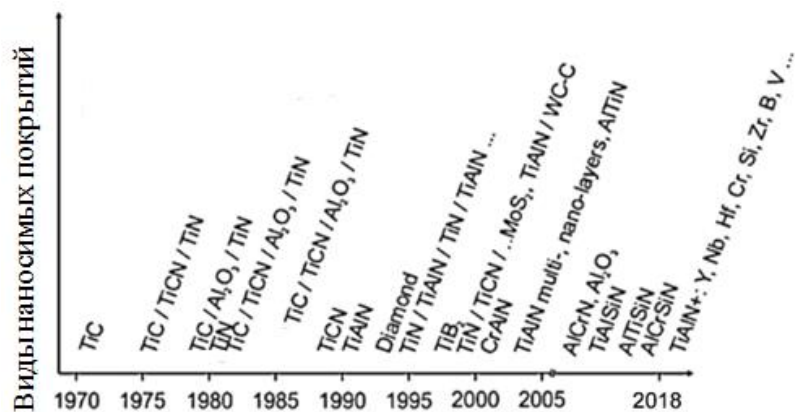


Рисунок 1 — Эволюция покрытий применяемых для упрочнения металлорежущего инструмента

Анализ работ, посвященных разработке и исследованию свойств композиционных покрытий Ti-Al-N, показал, что не во всех работах упоминается формирование интерметаллидов в составе покрытия. Однако в этих работах не раскрыт механизм формирования интерметаллидных соединений при осаждении из ПВДР, а также не исследовано влияние содержания интерметаллидов на эксплуатационные свойства металлорежущего инструмента с покрытием. В ряде работ упоминается, что в случае образования интерметаллидных соединений в покрытиях, механические свойства будут зависеть как от прочности интерметаллида, так и от концентрации примесей. Таким образом, формирование интерметаллидных фаз можно рассматривать как приоритетный способ упрочнения износостойких покрытий Ti-Al-N, так как интерметаллидные соединения обладают высокой твердостью, являются хорошим барьером для протекания диффузионных процессов, что должно способствовать повышению эксплуатационных свойств инструмента с покрытиями.

Важным аспектом в формировании функциональных покрытий с повышенными физико-механическими свойствами для металлорежущего инструмента является архитектура покрытий, т.е. последовательность и состав чередующихся слоев. Доказано, что за счет многослойной структуры можно формировать покрытия, обладающие более высокими механическими и эксплуатационными свойствами, нежели однослойные покрытия. Подбор архитектуры покрытия играет важную роль в обеспечении конечных эксплуатационных свойств. В работах В. П. Табакова упоминается, что при нанесении многокомпонентных покрытий с использованием однокомпонентных катодов действует два механизма упрочнения покрытия: упрочнение микроструктурными барьерами и механизм твердорастворного упрочнения за счет легирования основного материала покрытия.

Следовательно, варьируя строением покрытия, путем изменения его структуры (толщину и количество отдельных нанослоев покрытия), изменения химического состава каждого из слоев, фазового состава можно направленно изменять его механические и эксплуатационные свойства.

**Во второй главе** приведены описание материалов исследуемых образцов, описание оборудований применяемых для проведения исследований,

рассмотрены методики, необходимое для выполнения работы: методика рентгеноструктурного анализа, методика определения химического состава покрытия, методика измерения толщины покрытий и адгезионной прочности, методика определения микротвердости и износостойкости.

Нанесение композиционных покрытий выполнялось на модернизированной установке ННВ-6.6-И1 оснащенной плазменным источником с накальным катодом, которая позволила проводить дополнительную ионную очистку, активацию обрабатываемых поверхностей ионами газа, быстрый нагрев обрабатываемых деталей до необходимой температуры, и последующее ассистированное ионно-плазменное нанесение покрытий.

Напыление покрытий проводилось при одновременном осаждении с двух электродуговых испарителей оснащенными однокомпонентными катодами, при этом образцы на которые наносили покрытия перемещались в вакуумной камере за счет механизма вращения рабочего стола при различных скоростях ( $\omega=1..14$  об/мин). Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 2. Первый образец закреплялся в центре стола, а следующие три образца закреплялись на различном расстоянии от оси стола (8 см, 15 см и 22 см соответственно).

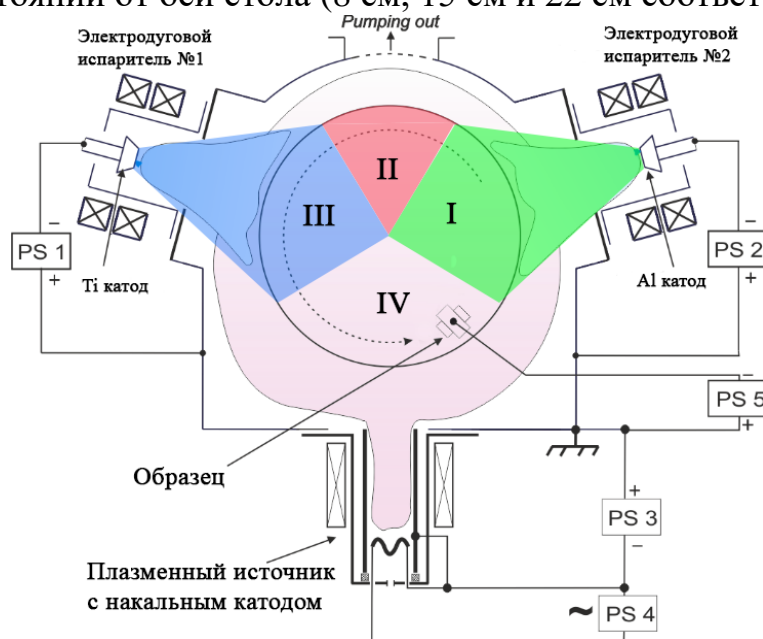


Рисунок 2 — Установка ННВ-6,6-И1. Схема проведения эксперимента при осаждении покрытия с вращением рабочего стола вокруг оси.

На первом этапе осаждение проводили в среде инертного газа аргон, для установления закономерности формирования интерметаллидных фаз системы Ti-Al. Нанесение покрытия проводили в течение 1 ч. Исследовалось влияние толщины и количества **нанослоев** (слои, сформированные за один оборот стола) титана и алюминия на фазовый состав, механические свойства и трибологические параметры. Толщина слоев титана и алюминия регулировалась скоростью вращения рабочего стола.

В процессе формирования покрытия, исследуемая поверхность образца за один оборот рабочего стола проходит 4 области (рисунок 2): I – область, в которой на исследуемую поверхность образца конденсируются материалы (ионов, атомы и капельная фракция) испаренные с поверхности Al катода; II – область (переходная), в которой на исследуемую поверхность образца конденсируются материалы испаренные с поверхности обоих катодов; III – область, в которой на исследуемую поверхность образца конденсируются материалы испаренные с поверхности Ti катода; IV – область, в которой исследуемая поверхность образца находится в зоне интенсивной бомбардировки ионами газа, и рост покрытия не происходит. При проведении эксперимента по вышеописанной схеме со скоростью вращения рабочего стола 1 об/мин в течение 1 часа, на исследуемой поверхности образца формируется многослойное покрытие с чередующимися слоями Ti и Al, при этом количество слоев составляет 120 шт. С увеличением скорости вращения стола, длительность одного оборота стола уменьшается и как следствие толщина промежуточных слоев также уменьшаются, а их количество возрастает. Таким образом получается, что при скорости вращения 3 об/мин количество слоев формируемых в покрытии за 1 час будет составлять 360 шт., при 7 об/мин – 840 шт., а при 14 об/мин – 1680 шт.

После определения оптимальных режимов формирования интерметаллидных покрытий в среде аргона аналогичные исследования проводили в среде азота (рисунок 3).

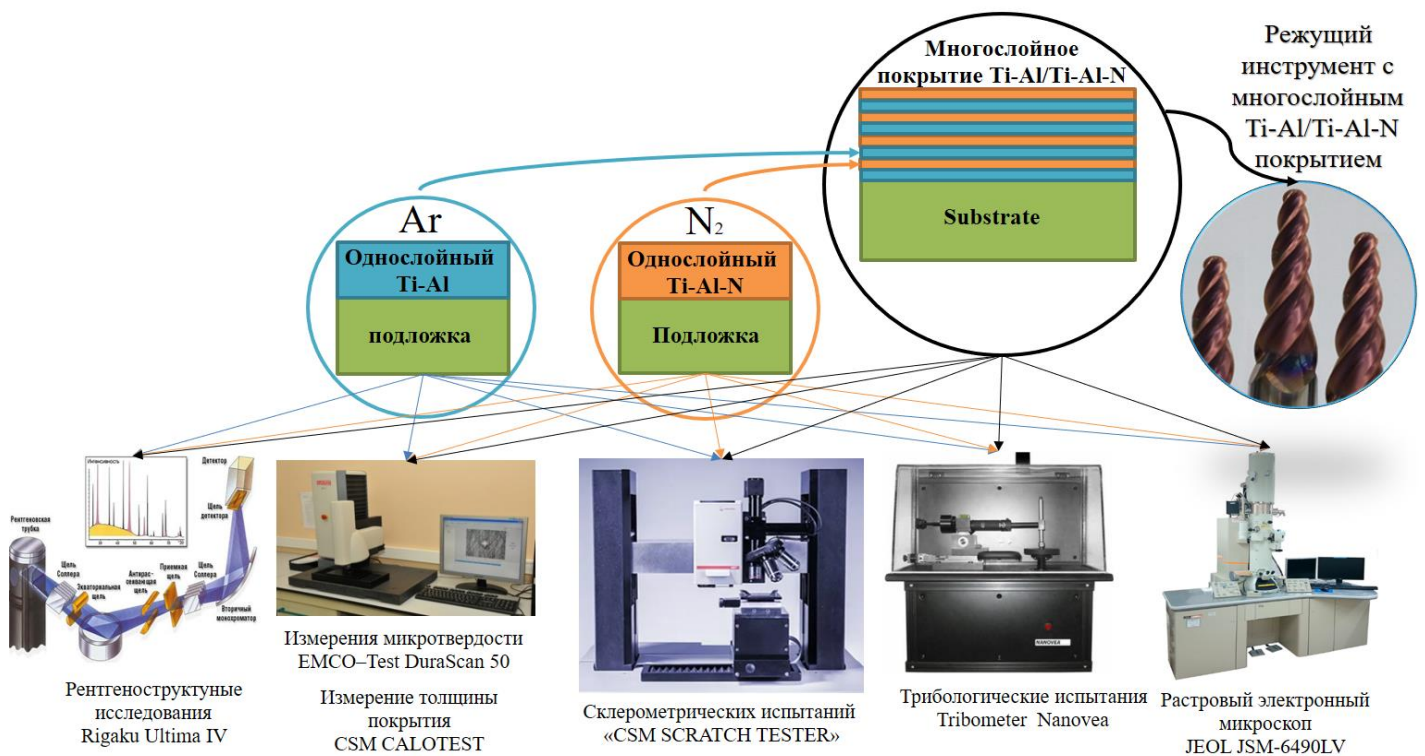


Рисунок 3 – Схематическое представление исследуемых покрытий и используемое оборудование для исследований

На третьем этапе (рисунок 4), после исследования покрытий, синтезированных в среде азота или аргона, были рассмотрены многослойные покрытия с чередующимися **макрослоями** (*слои, сформированные за одну смену газа*) TiAl/TiAlN. Данный этап был разделен на два подэтапа. На первом определялось наилучшее соотношение  $S$  толщины нитридного макрослоя ( $h_{Ti-Al-N}$ ) к макрослою осажденному в среде аргона ( $h_{Ti-Al}$ ). После проводились лабораторные исследования физико-механических свойств покрытий с разным значением величины  $S$  ( $S \gg 1$ ,  $S=1$ ,  $S \ll 1$ ) и производственные испытания концевых фрез с данными покрытиями. По результатам проведенных испытаний определили оптимальное значение  $S$ , обеспечивающее наибольшее значение стойкости инструмента. Следующим подэтапом проводились исследования для определения значения толщины макрослоев ( $h_{Ti-Al-N}$ ) и ( $h_{Ti-Al}$ ), обеспечивающих наибольшие механические и эксплуатационные свойства разрабатываемых покрытий.

Схематическое отображение структуры многослойных покрытий представлено на рисунке 4.

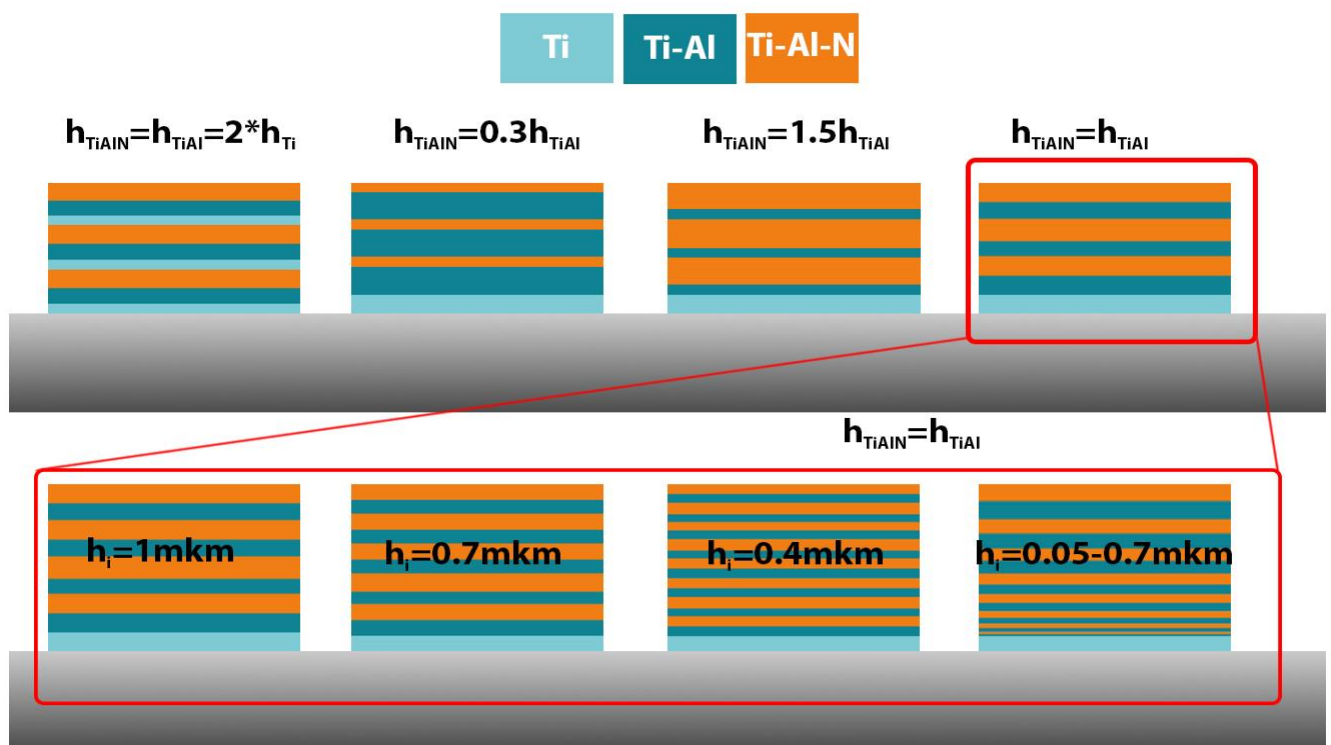


Рисунок 4 – Архитектура исследуемых многослойных интерметаллидных покрытий системы Ti-Al

**В третьей главе** приведен разработанный способ получения покрытий на основе «ИнСиТА» и рассмотрены механизмы формирования интерметаллидных фаз при ассистированном вакуумно-дуговом осаждении. Приведено описание математической модели процесса вакуумного ионно-плазменного осаждения

покрытий процесса с целью прогнозирования состава покрытия и разработка технологии осаждения упрочняющих покрытий на основе «ИнСиТА».

В результате анализа работ, посвященных данной тематике, предложен новый способ синтеза покрытий на основе «ИнСиТА» с возможностью управления фазовым составом. Покрытие на основе «ИнСиТА» требуемого фазового состава формируется при осаждении из плазмы генерируемыми электродуговыми испарителями оснащёнными однокомпонентными катодами из Ti и Al, при обработке без вращения и нагреве подложки до температуры 450 °С. Фазовый состав покрытия на основе «ИнСиТА» зависит от содержания компонентов (ионы титана и алюминия) в металлической плазме, что регулируется технологическими параметрами процесса (ток разряда дуги Ti и Al катодов, напряжения на подложке, давления в вакуумной камере). Рост покрытия начинается с конденсации ионизированных частиц Ti и Al на поверхность подложки.

С целью установления корреляции между пространственным расположением в вакуумной камере и формируемой нано-слоистой структурой покрытий, получаемых при послойном осаждении титана и алюминия из ПВДР, проведены расчеты скорости роста покрытия за 1 оборот рабочего стола при осаждении с двух однокомпонентных катодов. Результаты расчетов приведены на рисунках 5, 6. По результатам установлено, что при изменении расположения расчетной точки в вакуумной камере от центра рабочего стола ( $r=0$ ) до точки расположенной близко к электродуговым испарителям, ширина областей осаждения чистого Ti или Al равнозначны и остаются равной 120°, в то время как область, в которой происходит одновременное осаждение титана и алюминия уменьшается от 60°(в центре) до 0° (при  $R=22$  см).

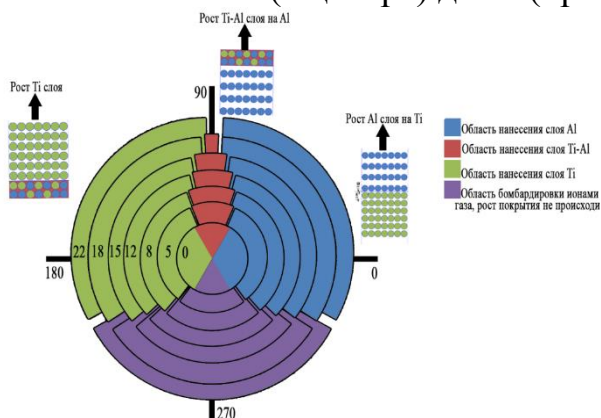


Рисунок 5 — Графическое представление областей роста слоев Al, Ti-Al, Ti.

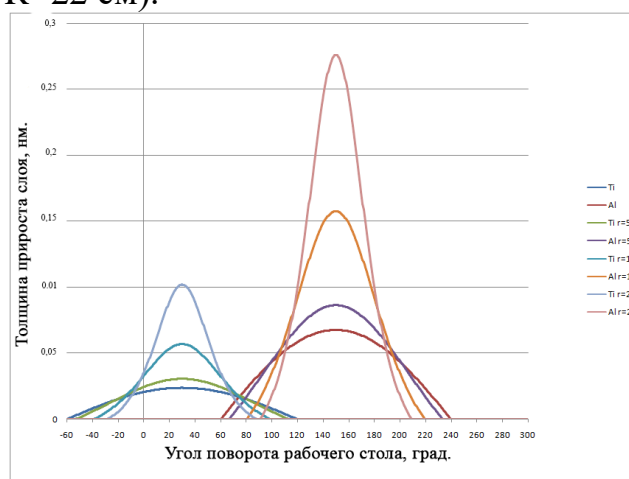


Рисунок 6 — величина прироста покрытия в зависимости от угла поворота рабочего стола и радиуса крепления при скорости вращения 7 об/мин

За один оборот рабочего стола, на поверхности формируется покрытие, которое состоит из чередующихся наноструктурных слоев Ti и Al. Схематическое представление структуры покрытия приведена на рисунке 7. На границах раздела нано-слоев формируются интерметаллидные фазы.

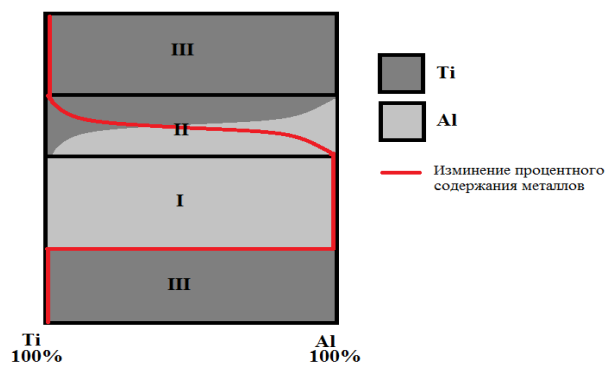


Рисунок 7 – Схематическое представление архитектуры покрытия состоящих из слоев Al, Ti-Al, Ti.

Численное моделирование диффузионных процессов между нано-слоями проводили с использованием метода конечных элементов. В начале была создана упрощенная 2D модель (рисунок 7) покрытия состоящая из нескольких прямоугольников, высота которых соответствовала расчетным толщинам слоев Ti и Al приведенные на рис. выше.

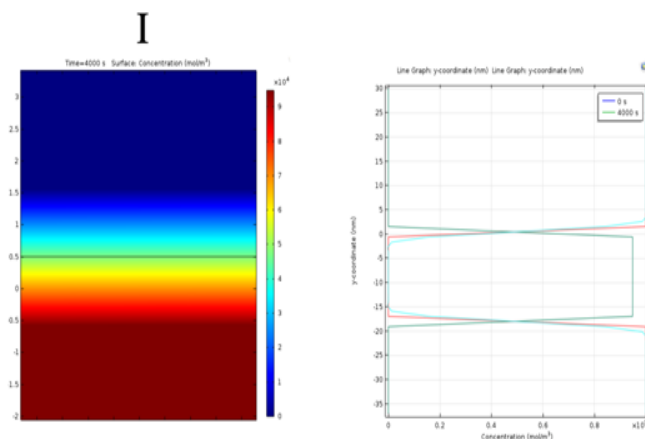
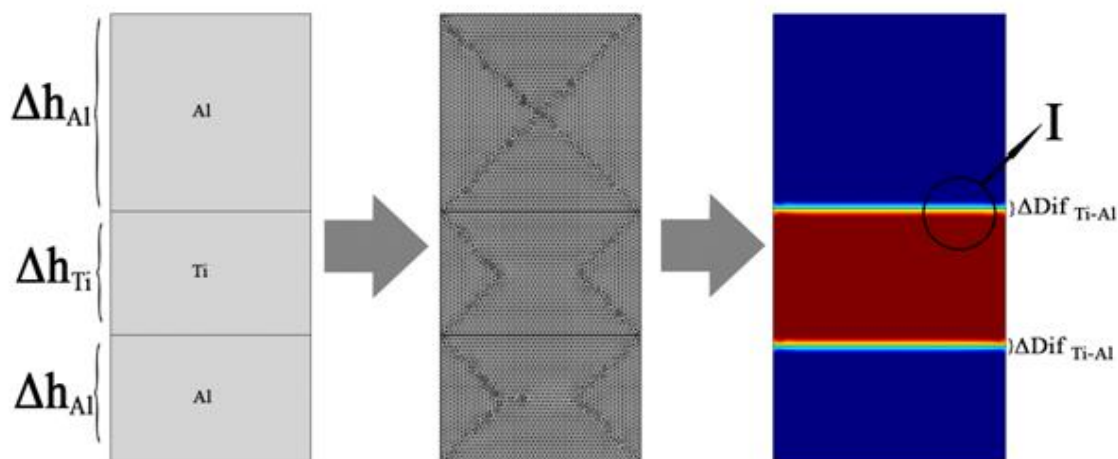


Рисунок 8 – Упрощенная 2D модель, расчётная сетка и графическое представление диффузионных слоев.

По результатам расчетов диффузионных процессов установлено, что толщина диффузионных слоев при температуре обработки  $\sim 700$  К, вне зависимости от толщины слоев титана и алюминия, одинаковая и составляет



порядка 2-2,2нм. Соответственно, увеличение количества нано-слоев и уменьшение их толщины позволит увеличить процентное содержание интерметаллидных фаз.

**Разработана математическая модель для прогнозирования** химического и стехиометрического состава композиционных покрытий на основе расчетов плотности ионного тока и концентрации ионов титана и алюминия в произвольной точке вакуумной камеры, процентного содержания ионов реакционного газа в зависимости от технологических параметров.

Для прогнозирования фазового состава покрытий необходимо рассчитать концентрацию ионов металла на единицу площади в единицу времени:

$$n_i = \frac{\mu_p \cdot I_D}{\pi \cdot m \cdot R_K^2} \cdot \left[ 1 + \frac{R_K^2 - l^2 - b^2}{\sqrt{(R_K^2 + l^2 + b^2)^2 - 4 \cdot R_K^2 \cdot b^2}} \right], \quad (4)$$

где  $\mu_p$  – коэффициент эрозии катода;  $m_i$  – масса конденсирующегося иона, кг;  $R_K$  – радиус катода, м;  $l$  – расстояние от торца катода до поверхности обработки, м;  $b$  – смещение относительно оси катода, м.

Расчет процентного содержания алюминия, титана и азота при осаждении нитридных слоев при послойном ассистированном плазменно-дуговом осаждении проводится по следующему алгоритму. Концентрация ионов Al, Ti и газа рассчитывается в каждой точке, расположенных по всей длине окружности перемещения детали в камере. От выбора количества точек зависит точность результатов расчета.

Процентное содержание химических элементов в покрытии рассчитывались по следующим формулам (5):

$$\begin{aligned} N_{Al} &= \sum_{i=0}^{K_i} n_{Al} \cdot 100 / (\alpha_{Al} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{Al} + \alpha_{Ti} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{Ti} + \alpha_{ГАЗ} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{ГАЗ}); \\ N_{Ti} &= \sum_{i=0}^{K_i} n_{Ti} \cdot 100 / (\alpha_{Al} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{Al} + \alpha_{Ti} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{Ti} + \alpha_{ГАЗ} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{ГАЗ}); \\ N_{ГАЗ} &= \sum_{i=0}^{K_i} n_{ГАЗ} \cdot 100 / (\alpha_{Al} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{Al} + \alpha_{Ti} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{Ti} + \alpha_{ГАЗ} \cdot \sum_{i=0}^{K_i} n_{ГАЗ}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\sum_{i=0}^{K_i} n_{Al}$ ,  $\sum_{i=0}^{K_i} n_{Ti}$ ,  $\sum_{i=0}^{K_i} n_{ГАЗ}$  – сумма значений концентрации ионов Al, Ti и газа во всех расчетных точках.

Полученные результаты расчета *процентного содержания химических элементов в покрытии* сопоставляется с тройной диаграммой состояния данной системы, и определяются химические соединения, которые возможны формироваться в покрытии. На рисунке 9 приведен интерфейс разработанной программы для прогнозирования стехиометрического состава покрытий на основе «ИнСиТА».

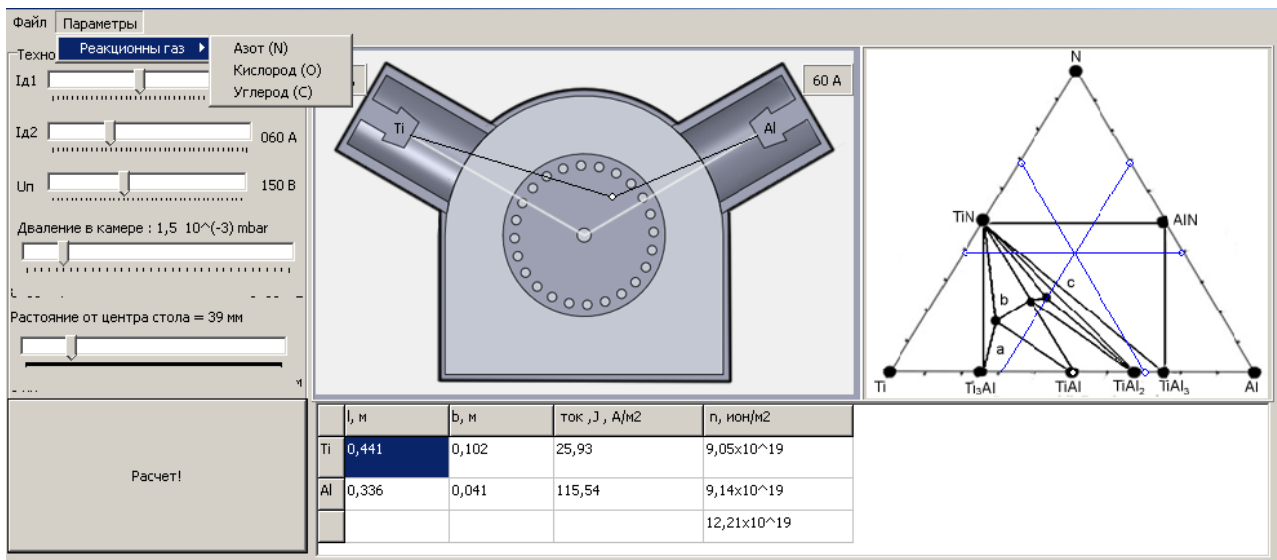


Рисунок 9 – Интерфейс программы для прогнозирования стехиометрического состава покрытий на основе «ИнСиТА».

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям покрытий на основе «ИнСиТА», синтезированных в среде инертного газа аргона. С целью определения количественного фазового состава покрытий проводили рентгеноструктурный анализ (РСА). На данном этапе осаждение композиционных покрытий на основе «ИнСиТА» было проведено в двух режимах: без вращения образцов и с вращением относительно оси рабочего стола. Согласно расчетным данным, полученным по программе, в вакуумной камере были расположены образцы. Результаты количественного РСА образцов с покрытием, полученным при одновременном осаждении без вращения, и расчетные величины ионных потоков, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Физические параметры покрытий на основе интерметаллида системы Ti-Al

№ Обр.	Толщина, мкм	Поток ионов Me в ед. площади в ед. времени, ион/м <sup>2</sup> ·с		Процентное содержание фаз в покрытии		
		Al	Ti	Ti <sub>3</sub> Al	TiAl	TiAl <sub>3</sub>
1	3,9	14,72·10 <sup>19</sup>	44,5·10 <sup>19</sup>	80 %	+	-
2	4,2	20,25·10 <sup>19</sup>	20,66·10 <sup>19</sup>	-	85 %	+
3	4,1	29,94·10 <sup>19</sup>	10,08·10 <sup>19</sup>	-	-	87 %
4	4,5	36,21·10 <sup>19</sup>	12,59·10 <sup>19</sup>	-	-	85 %
5	3,2	19,12·10 <sup>19</sup>	6,58·10 <sup>19</sup>	+	-	83 %
6	3,6	17,35·10 <sup>19</sup>	17,53·10 <sup>19</sup>	-	87 %	-
7	4,8	67,04·10 <sup>19</sup>	6,77·10 <sup>19</sup>	-	-	+
8	5,4	142,5·10 <sup>19</sup>	5,01·10 <sup>19</sup>	-	-	+

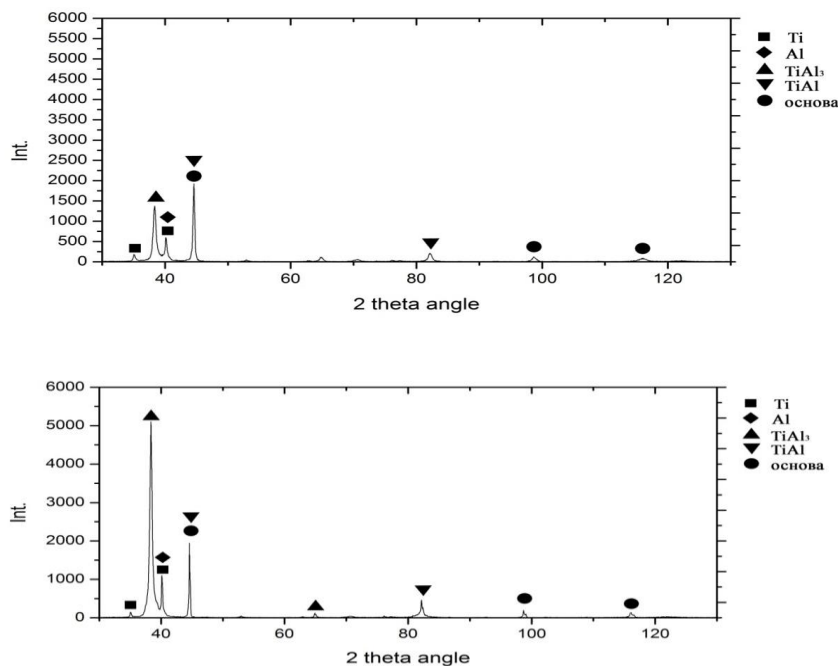


Рисунок 10 – Дифрактограммы образцов с покрытием полученных при послойном осаждении с вращением рабочего стола и количеством слоев: А) 120; Б) 1680.

Результаты рентгеноструктурного анализа (рисунок 10) показали, что при одновременном нанесении покрытия из плазмы, генерируемой электродуговыми испарителями оснащенными однокомпонентными катодами из Ti и Al без вращения и при нагреве подложки до температуры 450 °С, в покрытии образуются интерметаллиды системы Ti-Al различного фазового состава. Образование определенных фаз «ИнСиТА» зависит от пространственного расположения подложки в вакуумной камере и от режимов нанесения покрытия.

Далее был проведен рентгеноструктурный анализ образцов с наноструктурными покрытиями, полученными при осаждении из ПВДР с двумя однокомпонентными катодами из Ti и Al и вращением рабочего стола с различными скоростями от 1, 3, 7, 14 об/мин и количеством слоев от 120 до 1680 (за один оборот формируется слой титана и слой алюминия). Результаты количественного рентгеноструктурного анализа в зависимости от пространственного расположения и количества слоев приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты количественного РСА покрытий

Кол-во слоев	Расстояние от центра стола R, см.																			
	22					15					8					центр				
	Fe	Ti	Al	Ti Al	Ti Al <sub>3</sub>	Fe	Ti	Al	Ti Al	Ti Al <sub>3</sub>	Fe	Ti	Al	Ti Al	Ti Al <sub>3</sub>	Fe	Ti	Al	Ti Al	Ti Al <sub>3</sub>
120	27	43	3	13	-	32	34	13	18	3	34	28	0	23	14	26	31	4	17	22
360	22	-	11	-	10	30	32	13	14	11	27	35	-	14	13	28	36	2	17	18
840	13	50	16	12	10	40	35	3	9	13	24	49	0	11	16	35	48	-	4,8	6,2
1680	14,5	63	0	9	13	17,4	53	0	11	19	18,4	60	0	9	13	31	48	0	12	9

## Графики зависимости процентного содержания «ИнСиТА» в покрытии

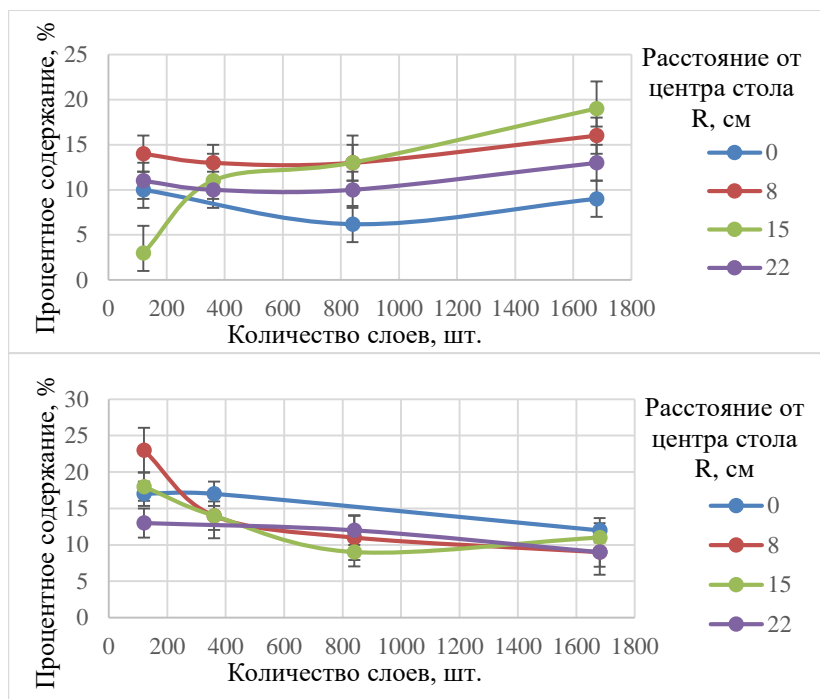


Рисунок 11 – Зависимость процентного содержания «ИнСиТА» от количества слоев при режимах  $I_{дAl}=60$  А;  $I_{дTi}=80$  А,  $U_{п}=150$  В,  $T=450$  °С: а –  $TiAl_3$ ; б –  $TiAl$ .

при одновременном ассистированном осаждении без вращения из плазмы вакуумно-дугового разряда с двух однокомпонентных катодов из Ti и Al в среде инертного газа Ar от количества слоев (угловой скорости вращения) и пространственного расположения приведены на рисунке 11.

На основе количественного рентгеноструктурного анализа покрытия, были построены зависимости процентного содержания

Al и Ti в разрабатываемых покрытиях от количества нанослоев и пространственного расположения (рисунок 12). Таким образом, процентное содержание Ti увеличивается от 3 до 45 % с возрастанием количества нанослоев (и уменьшением их толщины), при этом процентное содержание алюминия уменьшается от 15 % при 120 слоев до 0 при 1680 слоев.

Процентное содержание «ИнСиТа» незначительно уменьшается с

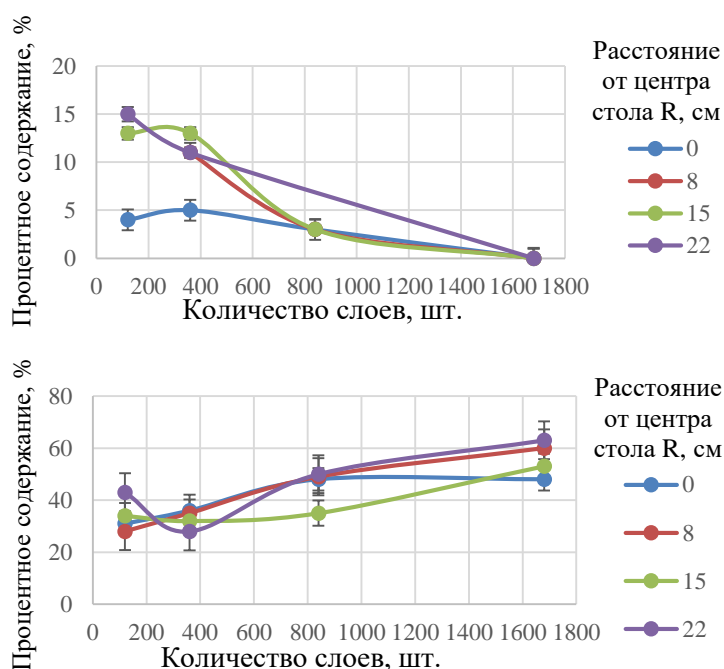


Рисунок 12. Зависимость процентного содержания Ti и Al от количества слоев при режимах  $I_{дAl}=60$  А;  $I_{дTi}=80$  А,  $U_{п}=150$  В,  $T=450$  °С: а – Al; б – Ti.

уменьшением толщины нанослоев процентное содержание фазы  $TiAl_3$  увеличивается, а содержание фазы  $TiAl$  – уменьшается.

Также были проведены измерения микротвердости композиционных покрытий по методу восстановленного отпечатка по Виккерсу при нагрузке 50 гр. На основе результатов измерений микротвердости в зависимости от пространственного расположения и толщины нанослоев построены графики зависимости микротвердости. На некоторых отпечатках пирамидки Виккерса при измерении микротвердости покрытия была заметна слоистая структура покрытия (рисунок 13).

увеличением количества слоев. А содержание интерметаллидной фазы  $TiAl_3$  увеличивается с уменьшением толщины слоев и увеличением их количества. Образование определенных фаз «ИнСиТа» зависит от

пространственного расположения подложки в вакуумной камере и от режимов нанесения покрытия. Было установлено, что при послойном осаждении из ПВДР с наноразмерными толщинами (<50 нм) в покрытии образуются интерметаллидные фазы  $TiAl_3$ ,  $TiAl$ . При этом с

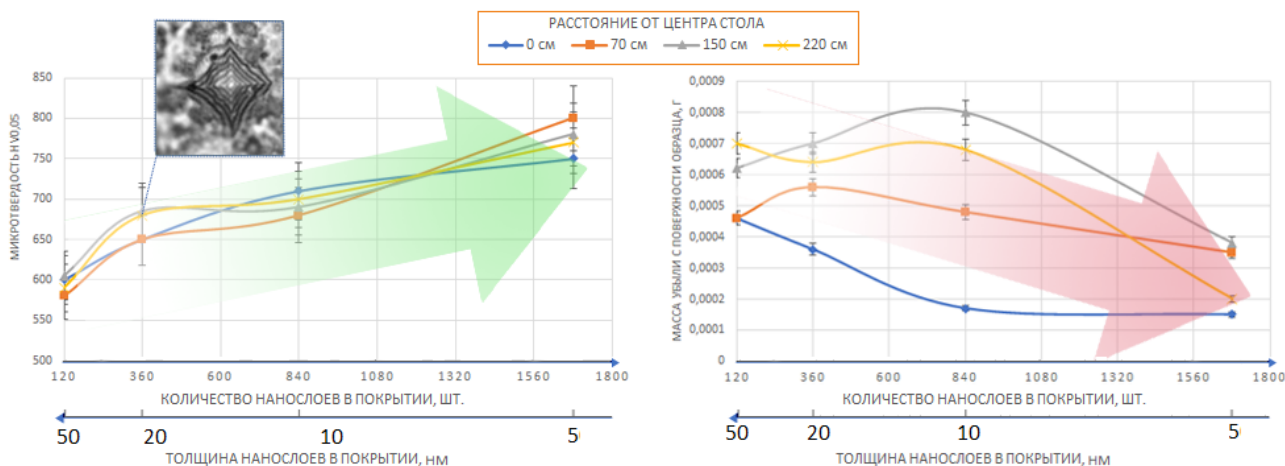


Рисунок 13 – Зависимости *a* – микротвердости и *б* – износостойкости покрытий от количества слоев при осаждении в среде аргона

Трибологические свойства поверхности образцов исследовали по схеме испытания «шар-диск». На основе исследований построены графики зависимости убыли массы от количества слоев (рис. 13, б). Из графиков видно, что с увеличением количества слоев от 120 до 1680 износостойкость образцов с покрытием на основе «ИнСиТА» увеличивается в 3 – 4 раза по сравнению с образцами, на которых наносили композиционные покрытия с количеством слоев 120, что связана с увеличением процентного содержания твердой интерметаллидной фазы  $TiAl_3$ .

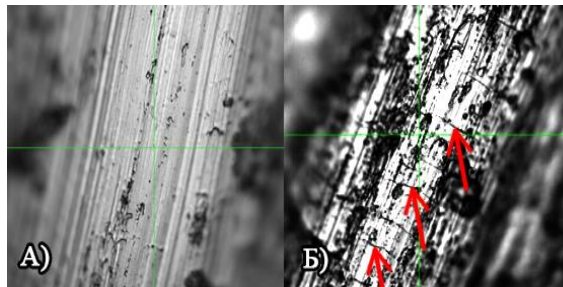


Рисунок 14 – Оптическая фотография дорожки царапания при увеличении  $\times 10$ : *a* – область без разрушений покрытия; *б* – область начала образования микротрещин в покрытии

Были проведены склерометрические испытания на оборудовании CSM Scratch Test образцов с композиционным покрытием на основе «ИнСиТА». Фотографии дорожки царапания представлены на рисунке 14. Результаты адгезионных испытаний показали, что у композиционных покрытий на основе «ИнСиТА» с количеством нанослоев 120 и толщиной  $\sim 50$  нм когезионная прочность ниже адгезионной, в результате чего и происходит когезионное разрушение покрытия.

А у композиционных покрытий с количеством слоев 1680 когезионная прочность выше адгезионной, однако, при нагрузках 27 Н в покрытии начинают образовываться микротрещины, но покрытие не скалывается.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям композиционных покрытий на основе «ИнСиТА», синтезированных в среде азота. С целью количественного и качественного определения фазового состава покрытий проводили рентгеноструктурный анализ (РСА). На данном этапе

осаждение композиционных покрытий было проведено в среде реакционного газа азот.

По результатам РСА (рисунок 15) установлено, что покрытие, осажденное в среде азота преимущественно состоит из интерметаллидных фаз ( $TiAl$ ,  $Ti_3Al$ ), нитридов  $TiN$  и незначительного количества металлов (титана и алюминия), не образовавших химическое соединение. С отдалением от центра стола процентное содержание  $Ti$  уменьшается, при этом содержание фаз  $TiAl$  и  $TiN$  увеличивается.

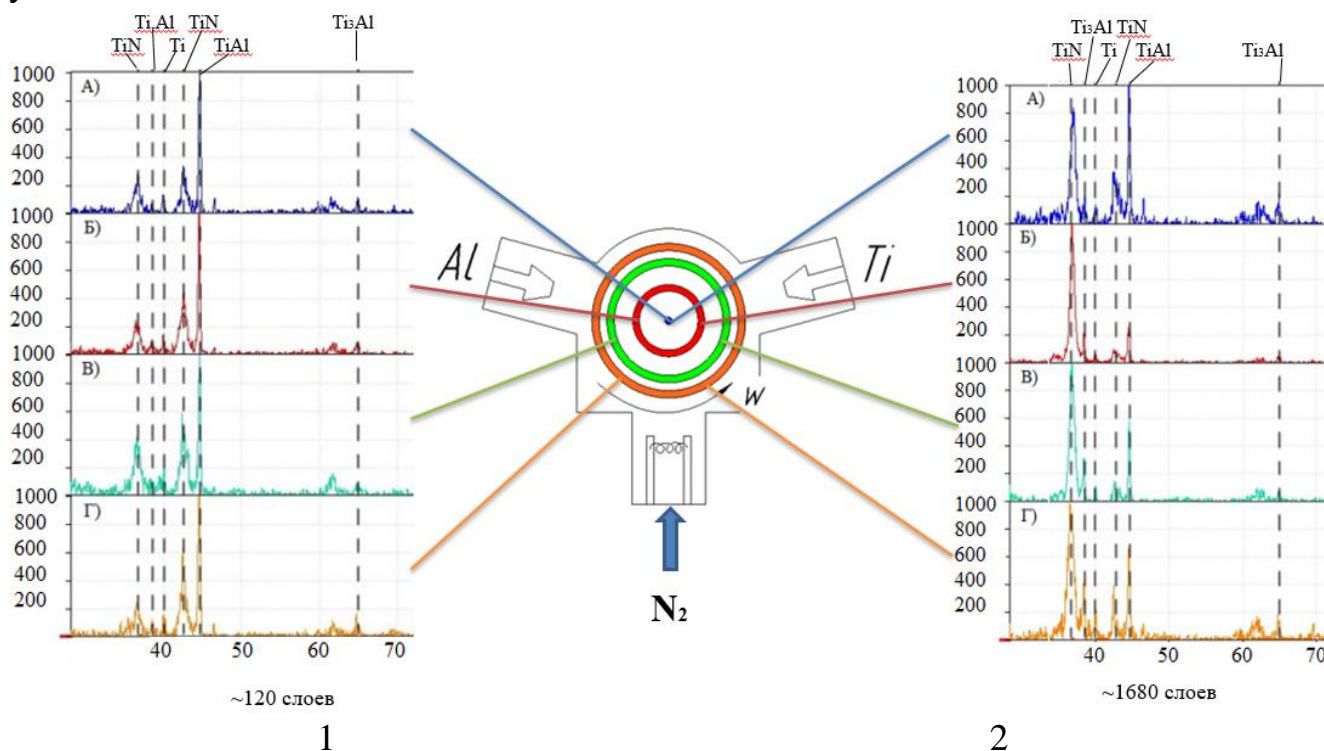


Рисунок 15 – Дифрактограммы с поверхности образцов с покрытием: 1 – 120 слоев; 2 – 1680. Расположения образцов от оси стола:  $a$  – Центр;  $b$  –  $R = 8$  см;  $b$  –  $R = 15$  см;  $z$  –  $R = 22$  см.

Далее были проведены исследования микротвердости композиционных покрытий на основе «ИнСиТА», осажденных в среде азота. На основе полученных результатов построен график зависимости микротвердости от пространственного положения и количества нанослоев (рисунок 16), из которого видно, что с уменьшением толщины нанослоев и увеличением расстояния от центра стола микротвердость покрытия возрастает.

Износостойкость покрытий на основе «ИнСиТА» была исследована по схеме «шар–диск», путем измерения массы образцов до и после испытаний. На основе полученных результатов построены зависимости износостойкости от толщины нанослоев (рисунок 16, б). Установлено, что с изменением пространственного расположения от центра к периферии, износостойкость образцов увеличивается, что связано с увеличением содержания твердых нитридных и интерметаллидных фаз.

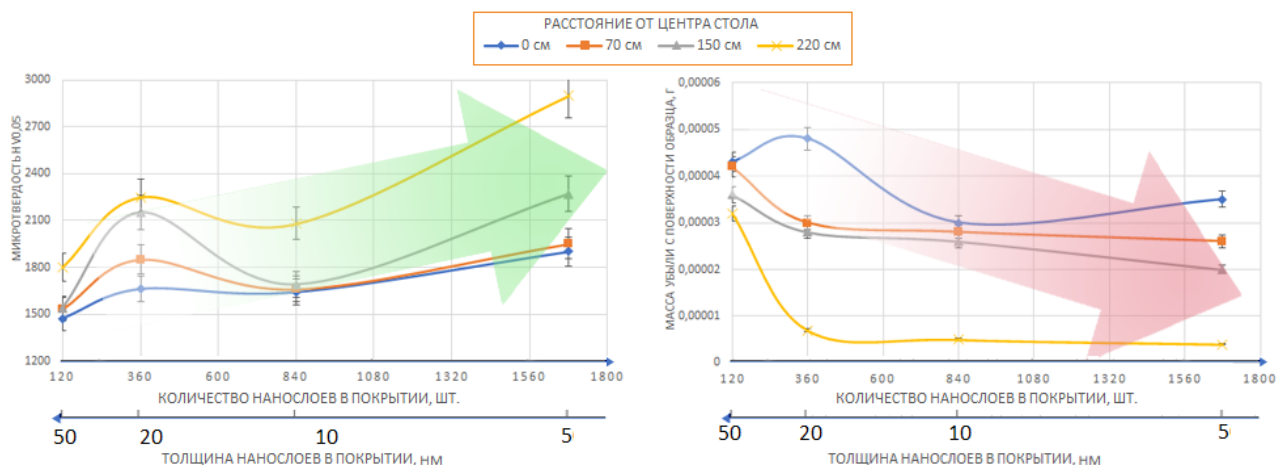


Рисунок 16– Зависимости *a* – микротвердость, *b* – износостойкость покрытий от количества слоев при осаждении в среде азота

Проведены испытания для качественной оценки адгезии покрытий, синтезированных в среде азота, а так же выявления критической нагрузки начала разрушения и коэффициента упругого восстановления покрытия (рисунок 17, табл. 3).

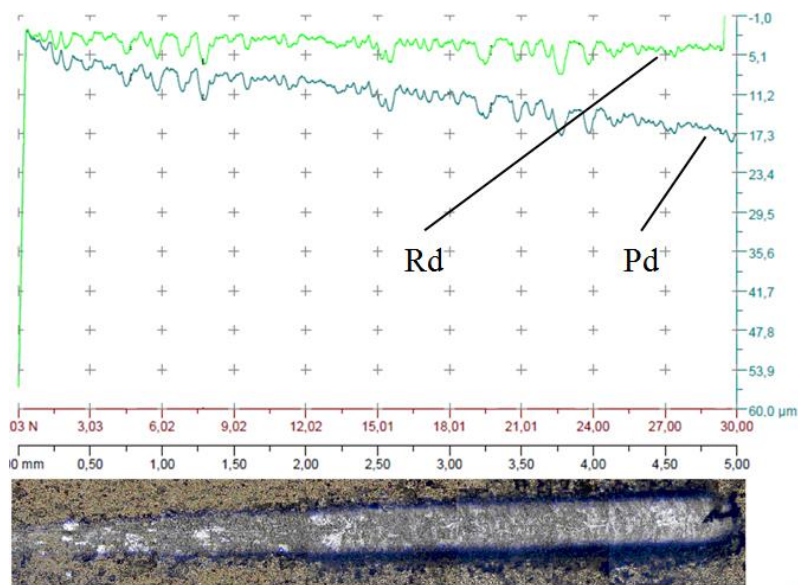


Рисунок 17 – Результат склерометрических испытаний покрытия при осаждении в среде азота

Таблица 3 – Результаты склерометрических испытаний

Количество слоев	Максимальная глубина внедрения $h_{max}$ , МКМ	Нагрузка начала разрушения $L_s$ , Н	Коэффициент упругого восстановления $We$ , %
120	17,3	18	52
360	10,2	22,4	58
840	14,5	20,3	59
1680	8,3	25,5	72,2



Результаты исследований образцов с покрытием на основе «ИнСиТА», осажденных в среде азота, показали, что покрытия с толщиной нанослоев 5 нм и количеством слоев 1680 имеет наибольший коэффициент упругого восстановления, но при этом приблизительно при одинаковых значениях нагрузки (23-24 Н), в сравнении с покрытиями толщиной > 5 нм, начинается формирование микротрещин на треке царапания.

Исследования на просвечивающем электронном микроскопе позволили экспериментально определить толщины нанослоев при осаждении в среде реакционного газа N<sub>2</sub>. При увеличении в ×500000 видно, что толщины нанослоев составляют ~5 нм (рисунок 18).

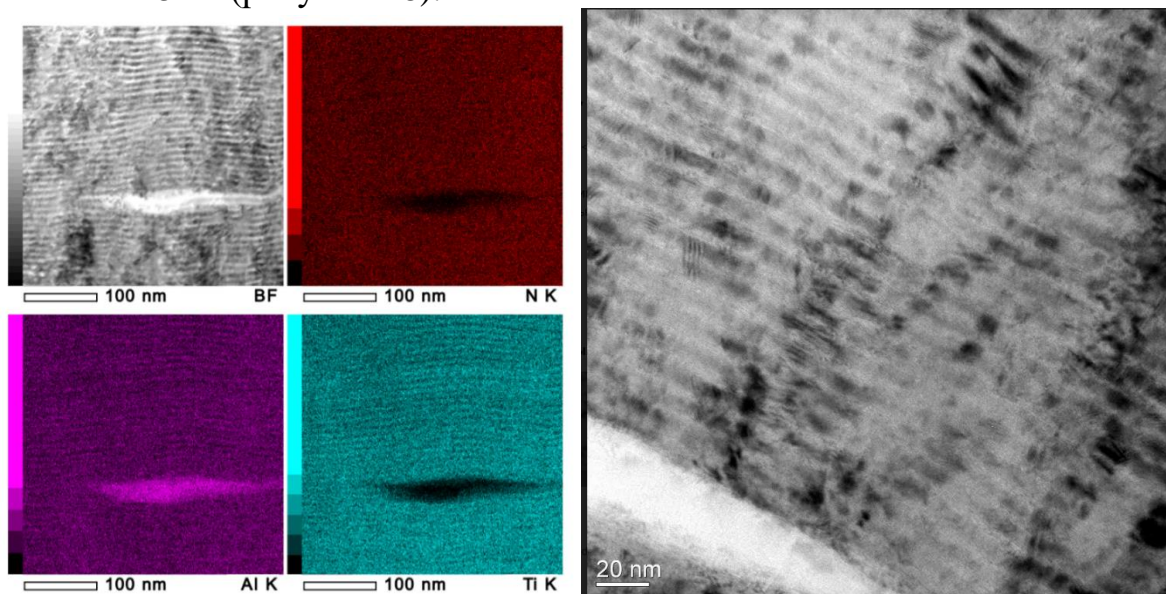


Рисунок 18 – ПЭМ изображение структуры покрытия с нанослоями толщиной 5 нм: *а* – карта распределения химических элементов, *б* – микроструктура.

Исходя из обзора литературных источников и после исследования однослойных покрытий, была предложена архитектура многослойных композиционных структур, которые состоят из отдельных слоев нитридов+интерметаллидов и «ИнСиТА».

**В шестой главе** представлены результаты исследований многослойных покрытий с чередующимися слоями, синтезированными в среде азота или аргона. Покрытия наносили, изменяя параметр *S* (соотношение толщины чередующихся макрослоев). Первая технология заключается в осаждении 3-слойных покрытий с чередующимися слоями Ti-TiAl-TiAlN ( $h_{\text{TiAlN}}=1.5 \cdot h_{\text{TiAl}}=3 \cdot h_{\text{Ti}}$ ), 2 – 4 технология - это чередование слоев TiAl-TiAlN с разным соотношением толщины ( $h_{\text{TiAlN}}=0.3 \cdot h_{\text{TiAl}}$ ,  $h_{\text{TiAlN}}=1.5 \cdot h_{\text{TiAl}}$ ,  $h_{\text{TiAlN}}=h_{\text{TiAl}}$ ). Толщина покрытий на образцах, расположенных перпендикулярно потоку, составляла 2,2 – 2,5 мкм, а параллельно – 3,5 – 3,8 мкм. Микроструктура поверхности подготовленных наклонных шлифов образцов с полученными покрытиями и их архитектура представлены на рисунке 19.

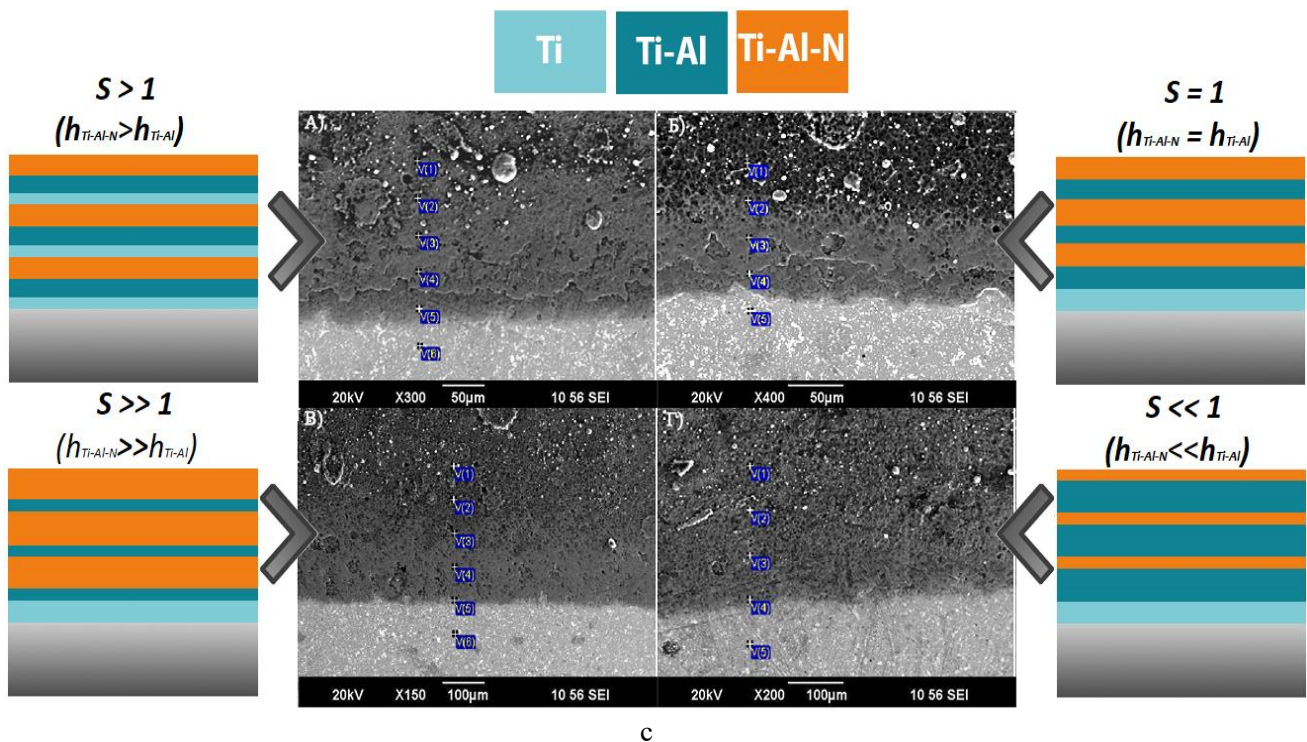


Рисунок 19 – РЭМ изображения наклонных шлифов образцов из стали Р6М5 с покрытиями, полученными разными технологиями : *a* – 1; *б* – 2; *в* – 3; *г* – 4; V(1–6) точки измерения химического состава покрытий

На микроструктуре образца с покрытием, полученным по первой технологии, отчетливо заметны границы между твердыми нитридными слоями (Ti-Al-N) и более мягкими интерметаллидными слоями (Ti-Al) (рисунок 19, *a*). Аналогичные резкие границы наблюдаются и на микроструктуре образцов полученных по второй технологии (рисунок 19, *б*). На микроструктуре образцов обработанных по третьей технологии, толщины нитридных слоев в два раза превышают более мягкие интерметаллидные слои, наблюдается сплошная поверхность с редкими порами небольших размеров и практически отсутствует явная граница между слоями. Микроструктура образцов, полученных по четвертой технологии незначительно отличается от предыдущей, так как эта технология различается лишь соотношением толщин слоев. Об отличии архитектуры покрытий, полученных по различным технологиям, свидетельствуют результаты анализа химического состава поверхности образцов по глубине. Результаты исследований на оборудовании ScatchTest CSM приведены в таблице 4. Результаты испытаний образцов с покрытиями, полученными по различным технологиям, показали, что адгезионная прочность сцепления покрытия с материалом основы хорошая, и составляет не менее 18 Н. Однако физико-механические свойства покрытий значительно отличаются друг от друга.

Таблица 4 – Результаты максимальной глубины внедрения  $h_{\max}$ , критической нагрузки  $L_c$  и коэффициента упругого восстановления  $W_e$

Технология	Максимальная глубина внедрения $h_{\max}$ , мкм	Нагрузка начала разрушения $L_c$ , Н	Коэффициент упругого восстановления $W_e$ , %
1	8	20	70
2	5	23	75
3	8,5	18	50
4	8,5	18	72

Повышенные механические свойства наблюдаются у образцов, обработанных по второй технологии максимальное значение упругого восстановления  $W_e$  до 75 % при минимальной глубине внедрения индентора  $h_{\max}=5$  мкм и максимальное значение критической нагрузки  $L_c=23$  Н. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что наибольшими физико-механическими и эксплуатационными свойствами обладают покрытия с архитектурой, состоящей из чередующихся слоев TiAl/TiAlN с одинаковой толщиной ( $h_{\text{TiAlN}}=h_{\text{TiAl}}$ ). Данные результаты подтвердили производственные испытания. В инструментальном цехе АО «УАПО» проводились испытания шестиперых фрез с покрытием на основе интерметаллидов системы Ti – Al с различными чередующимися слоями. Фотографии инструментов после проведения испытаний приведены на рисунке 20.

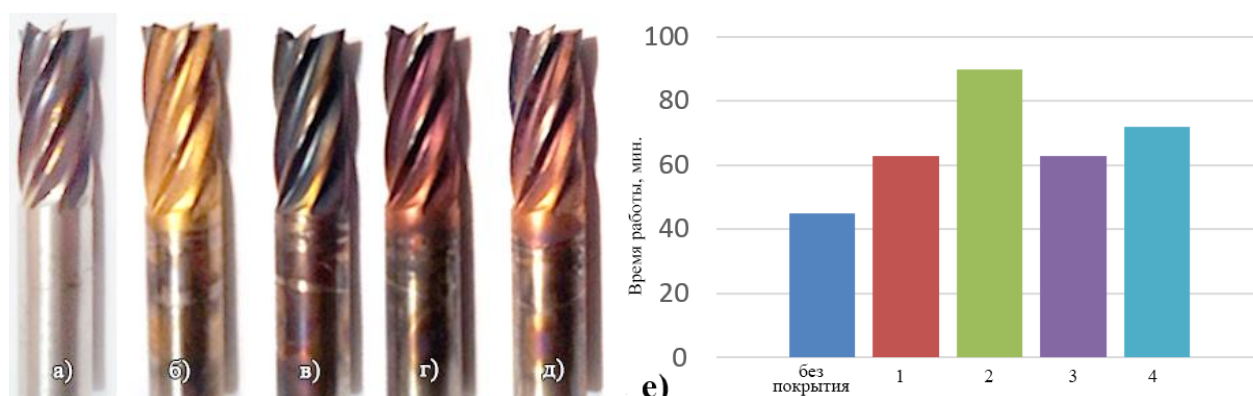


Рисунок 20 – Фотографии инструментов после производственных испытаний *a* – без покрытия; *б-д* – с покрытиями с различной архитектурой (1 – 4); *e* – результаты испытаний

Таким образом, покрытия на основе «ИнСиТА» с одинаковыми толщинами макрослоев обладают более высокими физико-механическими свойствами. Далее необходимо определить влияние толщины макрослоев на физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий при условии  $S=1$  ( $h_{\text{TiAlN}}=h_{\text{TiAl}}$ ).

Толщину макрослоев варьировали в диапазоне от 50 до 500 нм. Для образцов *A*, *B*, *D* толщина слоев была постоянна по глубине покрытия, а для образца *C* минимальна (~50 нм) вблизи к подложке и увеличивалась до 500 нм по мере роста покрытия, с шагом 50 нм. Фотографии сферических лунок и схематическое изображение архитектуры покрытий приведены на рисунке 21. Средние значения толщины слоев и их количество представлены в таблице 5.

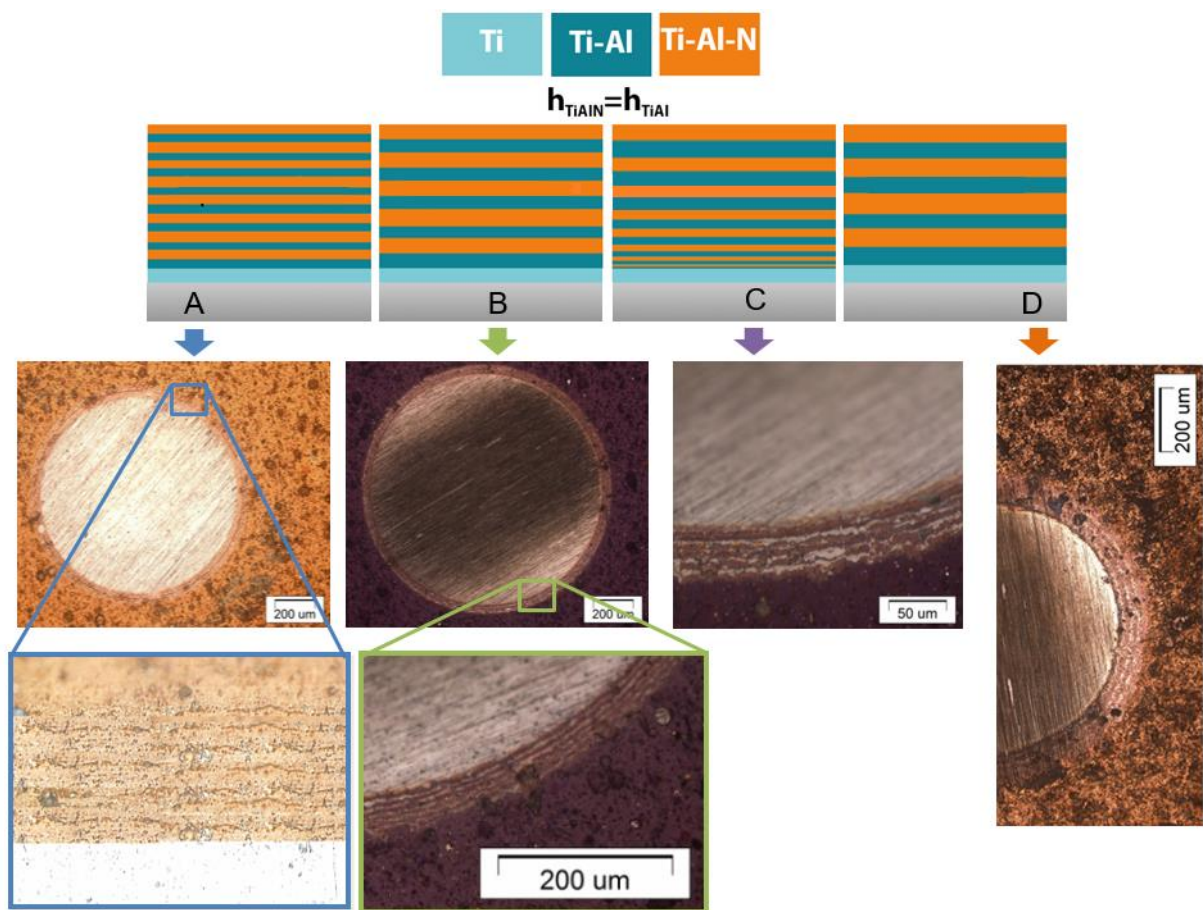


Рисунок 21 – Архитектура исследуемых покрытий и сферические шлифы для определения толщины покрытий

Таблица 5 – Параметры осаждаемых покрытий

Вид многослойного покрытия	Обозначение образца с покрытием	Толщина слоя, нм	Количество слоев
TiAl/TiAlN	A	~ 50	60
TiAl/TiAlN	B	~ 200	12
TiAl/TiAlN градиентное	C	от 50 до 500	16
TiAl/TiAlN	D	500	8

Результаты энергодисперсионного анализа показали, что содержание титана в покрытии в 1,7 – 1,9 раз превышает содержание алюминия (рисунок 22). По микроструктуре полученного с помощью растрового электронного микроскопа видно, что покрытие сплошное, отсутствуют какие-либо поры, а плавный переход концентрационных линий от поверхности покрытия к подложке – косвенно свидетельствует о хорошей адгезии к основе.

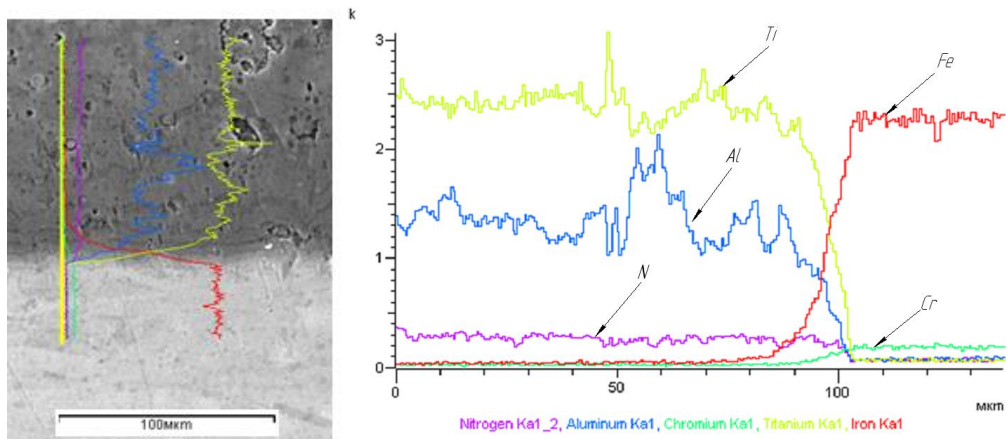


Рисунок 22 – Изображение распределения химических элементов покрытия TiAl/TiAlN на образце D

Результаты склерометрических испытаний образцов с многослойным композиционным покрытием на основе «ИнСиТА» показали, что наибольшую глубину проникновения индентора имеет образец A (~13 мкм), а наименьшую образец D. Из полученных результатов установлено, что с увеличением количества макрослоев и уменьшением их толщины до 50 нм приводит к снижению адгезионной прочности и отсутствию области упруго-пластической деформации (рисунок 23 и 24). Значения максимальной глубины проникновения, критической нагрузки начала образования микротрещин и коэффициент упругого восстановления для многослойных покрытий с различными толщинами макрослоев приведены в таблице 6.

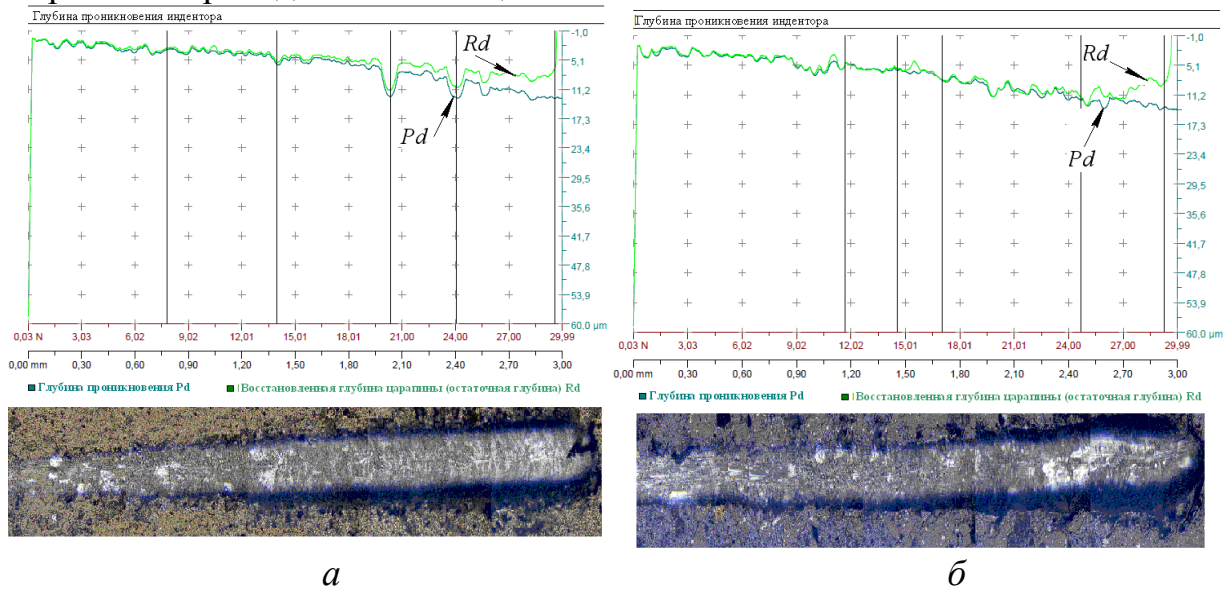


Рисунок 23 – Результаты склерометрических испытаний образцов с композиционным покрытием на основе «ИнСиТА» а– образец A; б – образец B

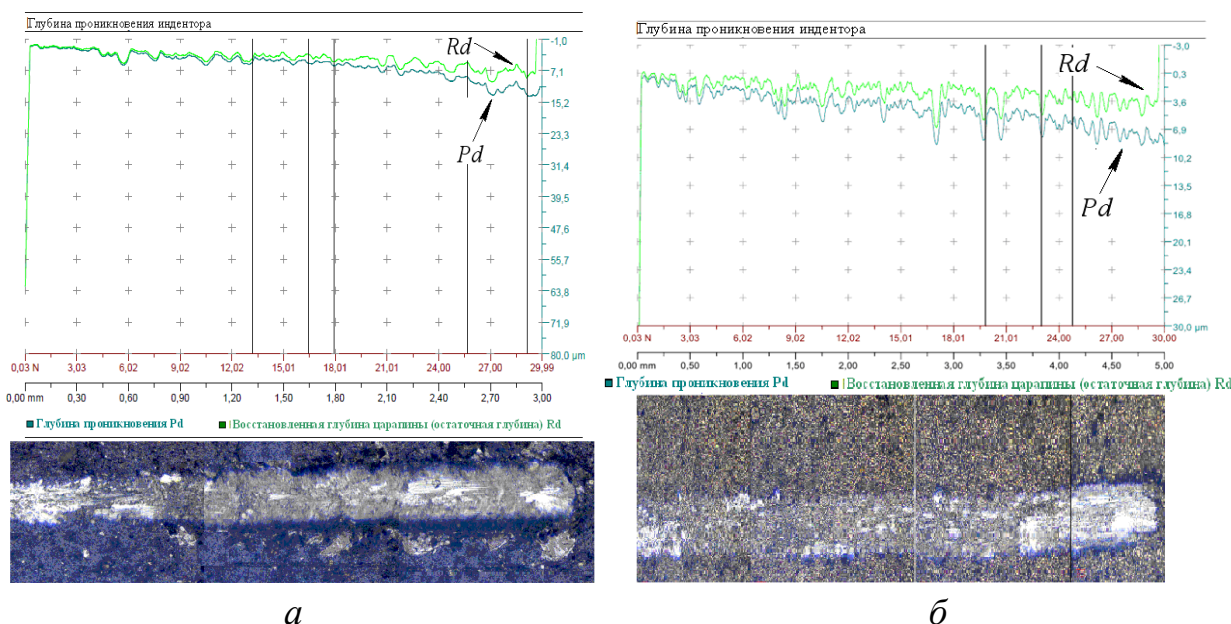


Рисунок 24 – Результаты склерометрических испытаний образцов с композиционным покрытием на основе «ИнСиТА» а – образец С; б – образец D

Таблица 6 – Результаты измерений адгезионной прочности

Образец	Максимальная глубина внедрения $h_{\max}$ , мкм	Нагрузка начала разрушения (критическая нагрузка), $L_c$ , Н	Коэффициент упругого восстановления, $W_e$ , %
A	13	29.59	33
B	12	24.69	42
C	7	19.5	47
D	8	19.825	70

Результаты измерений микротвердости покрытий показали, что для образцов с толщинами макрослоев  $h = \sim 50$  нм  $HV_{0,05} = 604$ ; для  $h = \sim 200$  нм  $HV_{0,05} = 1200$ ; для градиентной структуры  $h = \sim 50 - 500$  нм  $HV_{0,05} = 1573$ ; для  $h = \sim 500$  нм  $HV_{0,05} = 2785$ . По результатам установлено, что с увеличением толщины макрослоев от 50 до 500 нм приводит к увеличению микротвердости многослойных покрытий до  $HV_{0,05} = 2785$ .

Результаты склерометрических испытаний показали, что у композиционных покрытий на основе интерметаллида Ti-Al при нагрузках до 30 Н разрушение покрытия не происходит. У покрытия с количеством макрослоев 60 отсутствует область упруго-пластической деформации и коэффициент упругого восстановления  $W_e = 33$  %, увеличение толщины макрослоев до 500 нм и уменьшение их количества до 8 приводит к увеличению коэффициента упругого восстановления до 75 %. По результатам наноиндетирования (рисунок 25) установлено, что увеличение толщины макрослоев до 500 нм приводит к увеличению нанотвердости до 45 ГПа при модуле упругости = 230 ГПа.

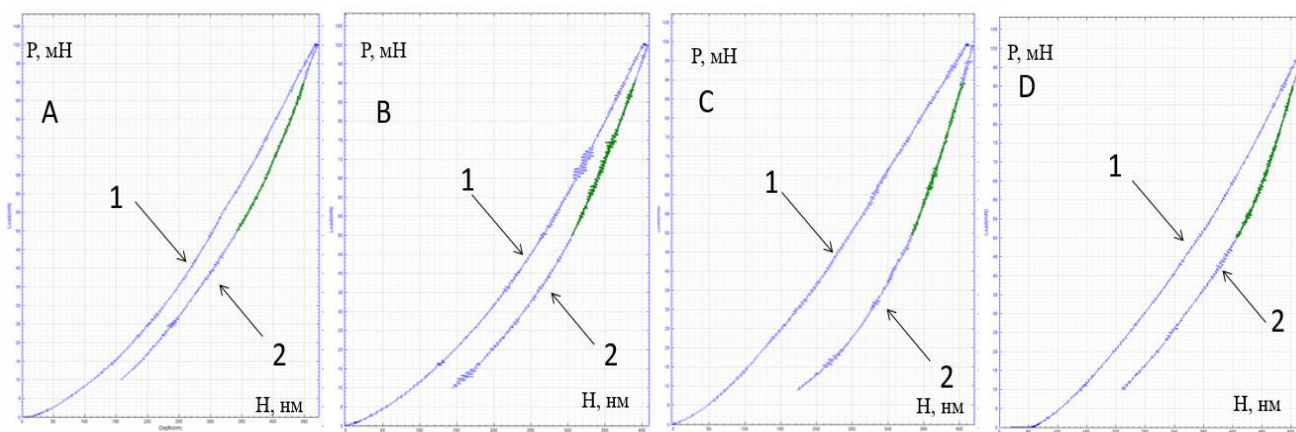


Рисунок 25 – Результаты измерения нанотвердости многослойных композиционных покрытий на основе «ИнСиТА»

Таким образом, установлено, что уменьшение толщины нанослоев Ti и Al до ~5 нм, но при этом увеличение толщины макрослоев до 500 нм приводит к увеличению физико-механических свойств (микротвердости до 2800HV, нанотвердости до 45ГПа, адгезионной прочности до 25Н, коэффициента упругого восстановления до 75%) покрытий на основе «ИнСиТА». Полученные закономерности и зависимости позволят сконструировать новые покрытия с высокими эксплуатационными свойствами

**Седьмая глава** посвящена разработке типовой технологии нанесения износостойких покрытий для металлорежущего инструмента на основе композитных нитридных и интерметаллидных нано-слоев титана и алюминия. Последовательность ключевых этапов разработанной технологии нанесения износостойких покрытий приведен на рисунке 26.

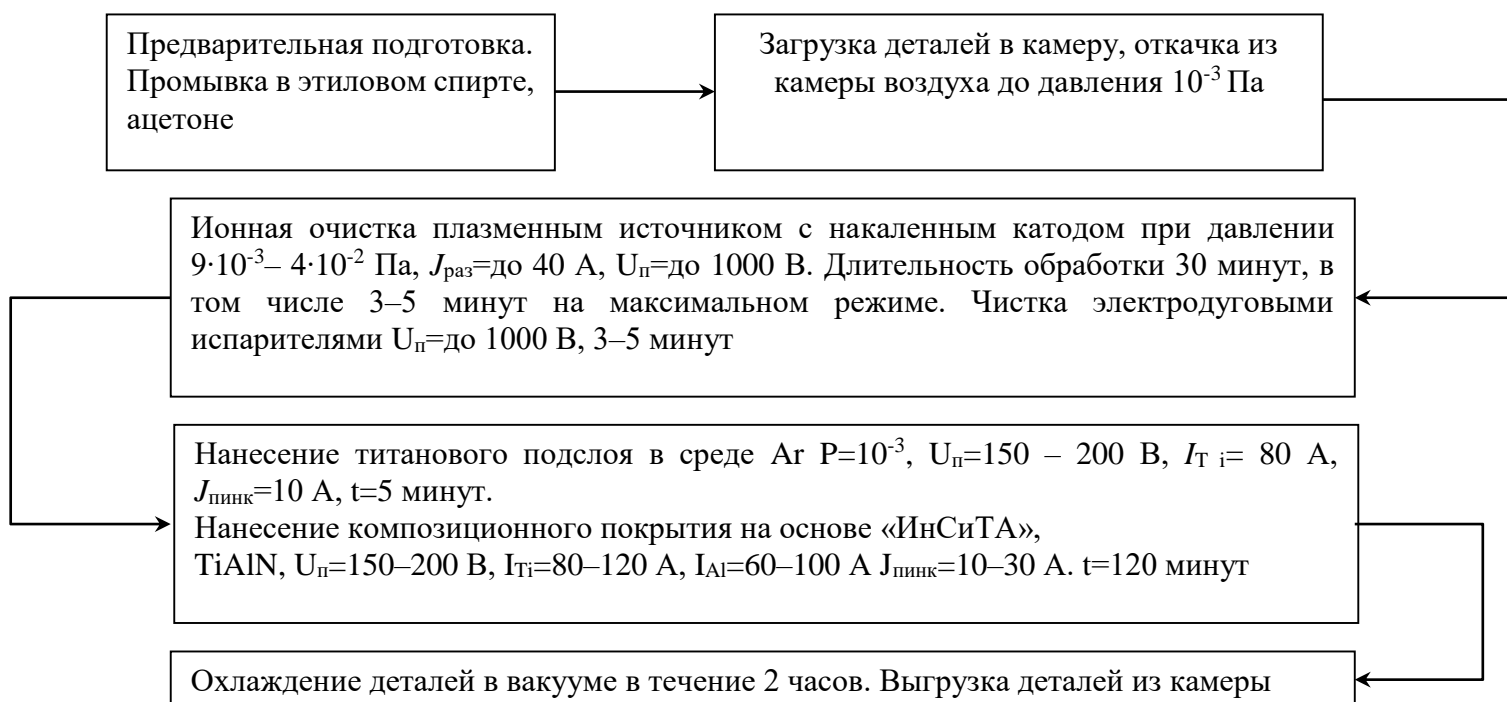


Рисунок 26 – Блок схема технологического процесса нанесения композиционного покрытия

Металлорежущие инструменты с разработанными покрытиями были испытаны на производственных площадках ПАО «ОДК-УМПО», НПА «Технопарк – АТ», АО «УАПО», АО «УАП«Гидравлика», АО «БелЗАН» и т.д. Все испытания подтверждены актами производственных испытаний.

На рисунке 27 представлена фотография обрезающих матриц и пуансоны холодновысадочного автомата с многослойным износостойким покрытием на основе интерметаллида системы Ti-Al.



Рисунок 27 – Обрезающие матрицы и пуансоны с многослойным износостойким покрытием на основе «ИнСиТА»

Производственные испытания проводились на холодновысадочных автоматах М12Б, применяемых в производстве автонормалей на АО «БелЗАН».

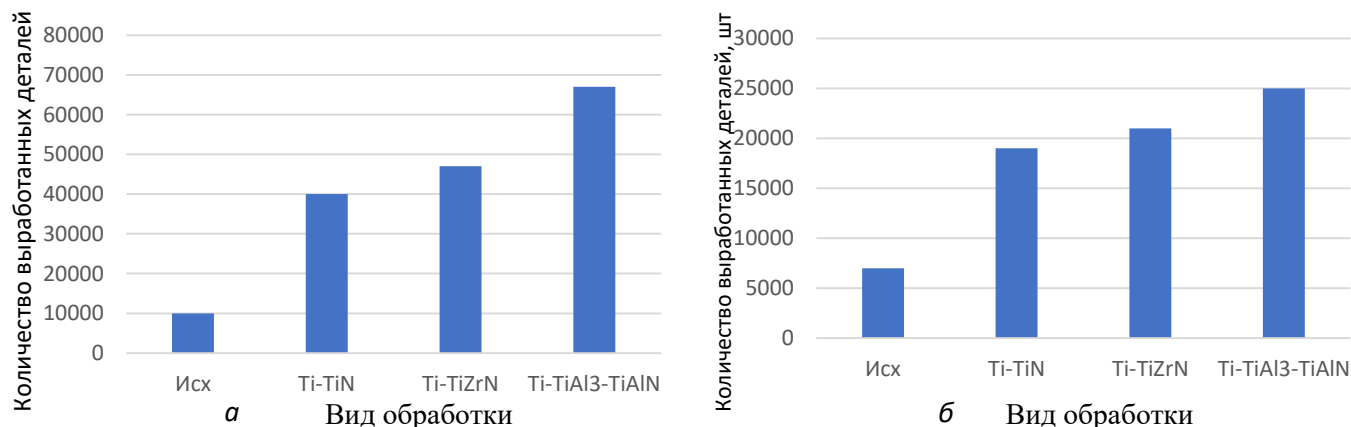


Рисунок 28 – Усредненные результаты производственных испытаний штамповой оснастки  
а – матрицы; б – пуансоны

По результатам испытаний матриц холодновысадочного автомата с разработанными покрытиями установлено, что стойкость штампового инструмента увеличилась в 6 – 7 раз по сравнению с матрицами, упрочненными по заводской технологии нанесения покрытия на основе Ti-TiN.

На производстве ПАО «ОДК-УМПО» проведены испытания стойкости инструмента при обработке детали «лопатка рабочая 7 степени КВД» из сплава ЭП718. Обработка осуществлялась металлорежущим инструментом «фреза» фирмы «Starrage» на станке LX051 по серийной технологии. При проведении



испытаний стойкости фрез за критерий затупления принимался технологический фактор - появление первых признаков нарушения нормальной работы, требующей замены инструмента вследствие износа покрытия, скругления режущих кромок, образования сколов. Стойкость фрез определялась количеством обработанных деталей.

По результатам проведенных производственных испытаний установлено, что импортным инструментом с покрытием фирмы «Starrage» было обработано 5 деталей «лопатка рабочая 7 ступени КВД». После переточки в инструментальном производстве ПАО «ОДК-УМПО» по геометрии фирмы «Starrage», данный инструмент без покрытия позволил обработать одну деталь. Дальнейшая обработка данным инструментом была не возможна, в связи с наличием сколов на режущих кромках. Нанесение покрытия на основе «ИнСиТА» по разработанной технологии на металлорежущий инструмент «фреза» после переточки позволило обработать 12 деталей, тем самым повысить стойкость инструмента до 4 раз по сравнению с инструментом без покрытия (рисунок 29)



Рисунок 29 – Твердосплавные фрезы с износостойким мультислойным покрытием на основе «ИнСиТА»

На ПАО «ОДК-УМПО» проведены испытания металлорежущего инструмента «долбяк для эвольвентных шлиц», предназначенного для нарезания шлиц на детали «носок ТНД» из сплава ЭП741НП. Применяемые ранее быстрорежущие стали (ЭП657МП, Bohler S390) при изготовлении инструмента «долбяк для эвольвентных шлиц» не позволили обеспечить нормативную стойкость инструмента. Производственные испытания инструментов осуществлялись на станках 3Д модели 5Б150 и на зубодолбежной машине Liebherr LS380F. По результатам проведенных испытаний (рисунок 30) установлено, что нанесение композиционных покрытий на основе «ИнСиТА» по разработанной технологии на металлорежущий инструмент «долбяк для эвольвентных шлиц» позволило обработать деталь «носок ТНД» в размер, в соответствии с требованиями чертежа, с применением одного инструмента и тем самым повысить стойкость по сравнению с нормативной в 3 раза. Долбление

эвольвентных шлиц инструментом с композиционными покрытиями на основе «ИнСиТА» позволило произвести обработку детали «носок ТНД» на высокопроизводительном станке с ЧПУ Liebherr LS380F без смены инструмента за одну установку.

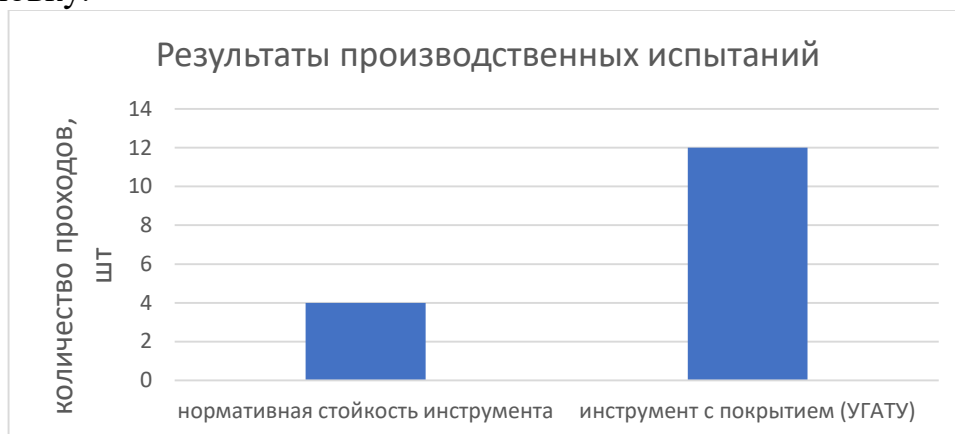


Рисунок 30 – Результаты производственных испытаний долбежного инструмента.

На ПАО «ОДК-УМПО» также были проведены испытания инструмента «Червячная фреза» с композиционным покрытием на основе «ИнСиТА» при обработке детали «Шестерня» из материала 16ХЗНВФМБ-Ш для определения стойкости. Обработка осуществлялась фрезой на зубофрезерном станке ZFWZ-250 по серийной технологии. При обработке 20 деталей червячной фрезой с покрытием, качество обработанной поверхности значительно лучше, и при этом образуется гораздо меньше заусенцев (их практически нет). В результате производственных испытаний установлено, что при обработке фрезой без покрытия, металл во впадине зуба детали начинает заминаться и блестеть, что связано с затуплением фрезы. В то время, как обработка фрезой с разработанным покрытием на основе «ИнСиТА» прорезала металл во впадине шестерни полностью. При этом на эвольвенте зуба не образовалось мелких продольных рисок, что характерно при обработке фрезой без покрытия. Таким образом, в ходе испытаний получено, что для обработки 20 штук деталей фрезой без покрытия использовали 2 венца инструмента, в то время как инструмент с покрытием одним венцом позволил обработать все 20 деталей партии.

Таким образом, в рамках научно исследовательских работ разработаны различные технологии упрочнения металлорежущих инструментов широкой номенклатуры. Натурные производственные испытания проведены на крупных машиностроительных предприятиях Республики Башкортостан. Актами производственных испытаний и внедрений подтверждаются положительный результат увеличения стойкости до 12 раз. Работа включена в дорожную карту Башкирской Национальной Инициативы, что подтверждает актуальность проблемы как для Региона, так и в масштабах Российской Федерации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты и выводы

1. Теоретически исследованы процессы формирования интерметаллидных соединений системы Ti-Al при ассистированном ионно-плазменном осаждении в среде инертного (аргон) и реакционного (азот) газов. Разработан способ получения износостойких покрытий на основе интерметаллидов необходимого фазового состава ( $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $TiAl_3$ ).

2. Установлена закономерность показывающая, что при одновременном осаждении покрытия из плазмы генерируемыми электродуговыми испарителями оснащенными однокомпонентными катодами из Ti и Al, при ассистировании процесса плазменным источником с накаливаемым катодом, нагреве подложки до температуры  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в покрытии образуются интерметаллидные соединения различного фазового состава. При этом фазовый состав покрытия зависит от расположения подложки в вакуумной камере и соотношения концентрации ионов  $Al^+$  и  $Ti^+$ . При этом с уменьшением толщины нанослоев и увеличением их количества процентное содержание фазы  $TiAl_3$  увеличивается, а содержание фазы  $TiAl$  уменьшается. Установлено, что с увеличением количества нанослоев от 120 до 1680 микротвердость композиционных покрытий на основе «ИнСиТА» осажденных в среде аргона возрастает с 500 до 800 HV0.05.

3. Разработана математическая модель процесса ассистированного плазменно-дугового осаждения покрытий и на ее основе программа ЭВМ позволяющая прогнозировать формирование интерметаллидных соединений необходимого фазового состава ( $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $TiAl_3$ ) в зависимости от технологических режимов.

4. Разработан способ получения покрытий на основе композитных интерметаллидных и нитридных нанослоев титана и алюминия из плазмы вакуумно-дугового разряда, отличающийся тем что в покрытии наряду с нитридами формируются интерметаллиды различного фазового состава. При этом установлена закономерность показывающая, что уменьшение толщины нанослоев приводит к увеличению процентного содержания высокотвердых фаз  $TiN$  и  $TiAl_3$ .

5. Установлена зависимость влияния толщины нано и макрослоев Ti и Al на микротвердость покрытий. Увеличение толщины макрослоев до 0,5 мкм и одновременное уменьшение толщины нанослоев до 5нм, приводит к увеличению микротвердости износостойких композитных покрытий до 3700–4500 HV<sub>0,05</sub>.

6. Установлено, что при послойном осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда с уменьшением толщины нанослоев микротвердость композитных покрытий на основе «ИнСиТА» возрастает. Повышение микротвердости покрытий обеспечивается увеличением процентного содержания интерметаллидных соединений. При этом увеличивается износостойкость формируемых покрытий. Установлена эффективная толщина нитридных и интерметаллидных макрослоев, которая обеспечивает высокие физико-механические и эксплуатационные свойства. Так при наиболее рациональной

толщине макрослоев равной 0,5мкм нанотвердость композиционного покрытия составляет 4500Hv<sub>0.05</sub>, а модуль упругости E=200ГПа.

7. Разработан типовой технологический процесс нанесения износостойких покрытий на основе композитных интерметаллидных и нитридных нанослоев титана и алюминия синтезированных в среде инертного (Ar) и реакционного (N<sub>2</sub>) газов на рабочие поверхности твёрдосплавных концевых фрез с использованием серийного оборудования.

8. Получены опытные партии фрез для чистовой обработки с разработанными наноструктурными композитными покрытиями на основе «ИнСиТА» и проведены производственные натурные испытания, которые показали повышение стойкости до 3х раз по сравнению с коммерческими аналогами.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в: 1) исследовании влияния концентрации реакционных газов (азот, кислород, ацетилен) на состав, структуру, физико-механические свойства покрытий осаждаемых из плазмы генерируемыми испарителями оснащенными с однокомпонентными катодами из титана и алюминия; 2) изучении влияния разрабатываемых покрытий на эксплуатационные свойства металлорежущих инструментов широкой номенклатуры применительно в обработке новых конструкционных материалов (интерметаллидные сплавы, композитные материалы и т.д.).

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК:*

1. **Варданян Э.Л.** и др. Упрочнение матриц штампов комбинированной обработкой в вакууме //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – №. 1. – С. 28-31..
2. **Варданян Э. Л.** и др. Упрочнение пуансонов путем ионной модификации и нанесения износостойких покрытий //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – №. 3. – С. 31-32.
3. **Варданян Э.Л.** и др. Математическое моделирование процесса нанесения упрочняющих покрытий на основе интерметаллида системы Ti-Al //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №. 6. – С. 7-10..
4. **Варданян Э.Л.,** Будилов В.В. Технология нанесения композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti–Al из плазмы вакуумного дугового разряда //Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – №. 7. – С. 59-62.
5. **Варданян Э.Л.** и др. Прогнозирование стехиометрического состава покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al, синтезированных в среде реакционных газов //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – №. 10. – С. 471-476..
6. **Варданян Э.Л.** и др. Технология нанесения покрытий системы Ti–Al–N с аморфно-кристаллической структурой. //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. –2021. –№ 1. – с. 98-101.
7. Денисов В.В., Денисова Ю.А., **Варданян Э.Л.,** Островерхов Е.В., Леонов А.А., Савчук М.В. Осаждение многослойного покрытия в газометаллическом пучково-плазменном образовании при низком давлении //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64. – №. 1. – С. 125-129.

### *Статьи в рецензируемых зарубежных изданиях, входящих в систему цитирования Web of Science и SCOPUS*

8. **Vardanyan E.L.,** Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. Properties of intermetallic TiAl based coatings deposited on ultrafine grained martensitic steel //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 389. – С. 125657.
9. **Vardanyan E.L.,** Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. Mechanical Properties and Tribological Behavior of Multilayer Intermetallics Ti-Al-N/Ti-Al Coatings Deposited by Vacuum Arc Plasma //2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). – IEEE, 2020. – С. 547-550.
10. **Vardanyan E.L.,** Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y., Staravoitov S.V.. Specific Features of Milling Titanium Alloys by Cutting Tools with Different PVD Coatings //2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). – IEEE, 2020. – С. 544-546.
11. **Vardanyan E.L.,** Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. Model calculation of the stoichiometric composition of three-component vacuum ion plasma coatings //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1393. – №. 1. – С. 012148.

12. **Vardanyan E.L.**, Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. The influence of architectural coatings based on intermetallics, carbides, oxides and nitrides of the Ti-Al system on their physico-mechanical properties //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1393. – №. 1. – С. 012146.
13. **Vardanyan E.L.**, Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. Ti-Al system coatings synthesized in reaction gases //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1396. – №. 1. – С. 012042.
14. **Vardanyan E.L.**, Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. Investigation of the mechanical properties of coatings with different architecture deposited from vacuum arc plasma //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1281. – №. 1. – С. 012087.
15. **Vardanyan E.L.**, Ramazanov K.N., Khusnimardanov R.N. Investigation of physical and mechanical properties of coatings based on intermetallics of the Ti-Al system obtained in acetylene environment from vacuum-arc discharge plasma //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 387. – №. 1. – С. 012081.
16. **Vardanyan E.L.** Nazarov A.Yu., Ramazanov K.N., Gabitashvili S.O., Nagimov R.Sh. Influence of reaction gases on phase compounds and mechanical properties of coatings based on intermetallics of Ti-Al systems //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1121. – №. 1. – С. 012031.
17. **Vardanyan E.L.**, Nazarov A. Yu., Ramazanov K.N. Investigation of physico-mechanical properties of composite coatings based on intermetallics of the Ti-Al system synthesized in the environment of various reaction gases (O, C, N) //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 1. – С. 032081.
18. **Vardanyan E.L.**, Nazarov A.Yu., Ramazanov K.N., Nagimov R.Sh. Mathematical model of deposition process of composite coatings based on intermetallic Ti-Al system by vacuum arc //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032083.
19. **Vardanyan E.L.**, Nazarov A.Yu., Ramazanov K.N., Nagimov R.Sh et al. Research and development of anti-adhesive coatings deposited by vacuum-arc discharge plasma //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032049.

#### *Патенты и авторские свидетельства*

20. **Пат. № 2489514** Российская Федерация, МПК С23С 14/24, С23С 14/06, С23С 14/02. Способ получения износостойкого покрытия на основе интерметаллида системы Ti-Al/ Будилов В.В., Киреев Р.М., **Варданян Э.Л.**; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2012111735/02; заявл. 22.03.12; опубл. 10.08.13, Бюл. №22–3 с.
21. **Пат. № 2662516** Российская Федерация, , МПК С23С 14/24, С23С 14/16, С23С 8/38. Способ получения износостойкого градиентного покрытия системы Ti-Al на стальной детали в вакууме/ Рамазанов К.Н., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Будилов В.В., Агзамов Р.Д.; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2017126320; заявл. 21.07.2017; опубл. 26.07.18, Бюл. №20 – 2 с.
22. **Пат. № 2657273** Российская Федерация, МПК С23С 14/24, Н01J 3/40. Способ фильтрации капельной фазы при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда/ Будилов В.В., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Шехтман С.Р.;

патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2017117779; заявл. 22.05.17; опубл. 09.06.18, Бюл. №6–4 с.

23. **Пат. № 2677043** Российская Федерация, МПК С23С 14/24, С23С 14/16. Способ получения износостойкого покрытия на основе интерметаллида системы Ti-Al/ Рамазанов К.Н., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Нагимов Р.Ш.; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2017142433; заявл. 05.12.2017; опубл. 15.01.19, Бюл. №2–3 с.

24. **Пат. № 2689474** Российская Федерация, МПК С23С 14/24, С23С 14/06, С23С 14/02. Способ получения покрытия на основе «ИнСиТА», синтезированного в среде азота/ Рамазанов К.Н., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю.; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2018140818; заявл. 19.11.2018; опубл. 28.05.19, Бюл. №16–3 с.

25. **Пат. № 2694857** Российская Федерация, МПК С23С 14/48, С23С 14/06, В23В 27/14. Способ нанесения износостойкого покрытия ионно-плазменным методом/ Рамазанов К.Н., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Брюханов Е.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2018128884; заявл. 06.08.2018; опубл. 18.07.19, Бюл. №20 – 2 с.

26. **Пат. № 2697749** Российская Федерация, МПК С23С 14/48, С23С 14/06. Способ повышения стойкости металлорежущего инструмента/ Рамазанов К.Н., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Брюханов Е.А., Насыров В.Ф., Галимова И.Р., Хуснимарданов Р.Н., Уткина Е.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2018130191; заявл. 20.08.2018; опубл. 19.08.19, Бюл. №23 – 3 с.

27. **Пат. № 2700344** Российская Федерация, МПК С23С 14/24, С23С 14/14, С23С 14/02, С23С 14/34. Способ упрочнения режущего инструмента осаждением мультислойных покрытий системы Ti – Al/ Рамазанов К.Н., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Брюханов Е.А., Хуснимарданов Р.Н.; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2019103188; заявл. 05.02.2019; опубл. 16.09.19, Бюл. №26 – 3 с.

28. **Пат. № 2699700** Российская Федерация, МПК С23С 14/24, С23С 14/06, В23В 27/14. Способ нанесения аморфно-кристаллического покрытия на металлорежущий инструмент/ Рамазанов К.Н., **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Брюханов Е.А., Громов Я.Ю., Николаев А.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО УГАТУ – № 2018128884; заявл. 06.08.2018; опубл. 18.07.19, Бюл. №20 – 2 с.

29. Свидетельство о Государственной регистрации **программа для ЭВМ № 2019617973** Расчет скорости роста и толщины покрытий, полученных из плазмы вакуумно-дугового разряда/ **Варданян Э.Л.**, Назаров А.Ю., Брюханов Е.А. №2019616488, заявл. 04.06.2019; опубл. 25.06.2019

30. Свидетельство о Государственной регистрации **программы для ЭВМ №2012616194** "Расчет параметров нанесения покрытия на основе интерметаллида системы Ti-Al" /Варданян Э.Л., Ягафаров И.И., Киреев Р.М. 05.06.12

#### **Монографии:**

31. Р.К. Исламгалиев, К.Н. Рамазанов, М.В. Караваяева, А.В. Ганеев, М.А. Никитина, Р.Д. Агзамов, **Э.Л. Варданян**, Г.Г. Еникеев, И.И. Ягафаров, Ю.Г. Хусаинов. Структура и свойства ультрамелкозернистых сталей с ионно-плазменными покрытиями. М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2017. – 227 с.

Соискатель



Э.Л. Варданян

ВАРДАНИЯ Эдуард Леонидович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО  
ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ НИТРИДНЫХ И  
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ НАНО-СЛОЕВ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

Специальность:

2.6.6 – Нанотехнологии и наноматериалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.201\_\_. Формат 60×84 1/16  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.

Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет»

Центр оперативной полиграфии

450008, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12