

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 03.04.02 Физика  
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование влияния содержания Та и многослойной архитектуры покрытий на основе системы Ti-Al-Ta-N на их механические и трибологические свойства

УДК 621.793:661.888.3:539.62

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Кузьминов Евгений Дмитриевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШБИП	Киселева Е.С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ИШНКБ ТПУ	Антоневич О.А.	к.б.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	д.т.н., профессор		

## Запланированные результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП
<b>Общекультурные компетенции</b>	
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
ОК-3	Готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах, на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-3	Способность к активной социальной мобильности, организации научно-исследовательских и инновационных работ
ОПК-4	Способность адаптироваться к изменению научного профиля своей профессиональной деятельности, социокультурных и социальных условий деятельности
ОПК-5	Способность использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки
ОПК-6	Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе
ОПК-7	Способность демонстрировать знания в области философских вопросов естествознания, истории и методологии физики
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК-1	Способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных

<b>Код</b>	<b>Результат освоения ООП</b>
	технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта
ПК-2	Способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности
ПК-3	Способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности
ПК-6	Способность методически грамотно строить планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать теоретические и практические разделы учебных дисциплин в соответствии с утвержденными учебно-методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики
ПК-7	Способность руководить научно-исследовательской деятельностью в области физики обучающихся по программам бакалавриата
<b>Профессиональные компетенции университета</b>	
ДПК(У)-1	Способность планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел
ДПК(У)-2	Способность обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 03.04.02 «Физика»  
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Лидер А.М.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ91	Кузьминову Евгению Дмитриевичу

Тема работы:

Исследование влияния содержания Ta и многослойной архитектуры покрытий на основе системы Ti-Al-Ta-N на их механические и трибологические свойства	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования являются покрытия <math>Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN</math> с различной концентрацией Ta и многослойные покрытия на основе системы <math>Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN</math>, изготовленные методом реактивного магнетронного распыления</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Обзор литературных источников;</li> <li>- Нанесение однослойных и многослойных покрытий на основе системы <math>Ti_{1-x}Al_xTa_yN</math>;</li> <li>- Исследование механических и трибологических свойств полученных покрытий;</li> <li>- Анализ полученных результатов;</li> <li>- Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>- Социальная ответственность;</li> <li>- Заключение.</li> </ul>
--	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
1. Литературный обзор; 2. Материалы и методы; 3. Экспериментальная часть	Панин А.В.
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Киселева Е.С.
5. Социальная ответственность	Антоневич О.А.
6. Раздел на английском языке	Зяблова Н.Н.

<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>
<b>Глава 2. Методы и материалы</b>

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Кузьминов Евгений Дмитриевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа ОБМ91	ФИО Кузьминову Евгению Дмитриевичу
-----------------	---------------------------------------

Школа Уровень образования	ИЯТШ Магистратура	Отделение школы (НОЦ) Направление/специальность	ОЭФ 03.04.02 Физика
------------------------------	----------------------	--	------------------------

### Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	30% премии; 20% надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30,2 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ	1. Анализ конкурентных технических решений 2. SWOT-анализ
2. Разработка устава научно-технического проекта	1. Структура работ в рамках научного исследования 2. Определение трудоемкости выполнения работ.
3. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Формирование плана и графика разработки: -Определение трудоемкости выполнения работ -Разработка графика проведения исследования Формирование бюджета затрат на научное исследование: -Материальные затраты -Амортизация специального оборудования -Основная заработная плата исполнителей НИ -Дополнительная заработная плата исполнителей НИ -Отчисления во внебюджетные фонды -Накладные расходы
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	1. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 2. Определение интегрального показателя эффективности; 3. Определение сравнительной эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Кузьминов Евгений Дмитриевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ91	Кузьминову Евгению Дмитриевичу

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 «Физика»

Тема ВКР:

<b>Исследование влияния содержания Ta и многослойной архитектуры покрытий на основе системы Ti-Al-Ta-N на их механические и трибологические свойства</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: защитные покрытия на основе системы Ti-Al-N, легированные Ta и их многослойные композиции Условия для работы: сидячее положение в офисном и производственном помещении Область применения: детали и механизмы, работающие в узлах трения</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;</li> <li>- инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением.</li> <li>- ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>При проведении исследования возможны проявления следующих вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические колебания твердых тел и их поверхностей и характеризующиеся повышенным уровнем локальной вибрации;</li> <li>– акустические колебания в производственной среде и характеризующиеся повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума;</li> </ul> <p>При проведении исследования возможны проявления следующих опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– чрезмерно высокая или низкая температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги (обморожения) тканей организма человека;</li> </ul>

	– электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий, включая действие молнии и высоковольтного разряда в виде дуги, а также электрического разряда живых организмов
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– Атмосфера: выброса продуктов горения машинного масла при работе пластинчато-роторного и диффузионного насосов
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные чрезвычайные ситуации: – Утечка газа из баллона; – Возникновение возгорания; Наиболее типичная ЧС: – Возгорание.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ИШНКБ ТПУ	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Кузьминов Евгений Дмитриевич		



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) Физика конденсированного состояния

Уровень образования Магистратура

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2020/2021 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: \_\_\_\_\_

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2020	- Обзор литературных источников;	15
25.10.2020	- Нанесение однослойных покрытия $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ с различным содержанием Ta и многослойных покрытий на основе системы $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ ;	15
30.12.2020	- Исследование механических и трибологических свойств полученных покрытий;	20
30.03.2021	- Анализ полученных результатов;	15
01.05.2021	- Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;	15
01.05.2021	- Социальная ответственность;	15
30.05.2021	- Заключение.	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	д.т.н., профессор		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 109 страниц, 37 рисунков, 22 таблицы, 124 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: покрытия  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$ , магнетронное распыление, многослойная структура, механические характеристики, износостойкость.

Объектом исследования являются защитные покрытия на основе системы  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  с различным содержанием Ta и многослойной архитектурой, нанесенные методом реактивного магнетронного распыления.

Цель работы: исследование влияния содержания Ta в покрытиях  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$ , а также количества и толщины слоев в многослойных покрытиях на основе системы  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  на их механические и трибологические характеристики

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Методом реактивного магнетронного распыления нанести покрытия  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  с различной концентрацией Ta
2. Изучить влияние содержания Ta на механические и трибологические характеристики покрытий  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$
3. Синтезировать многослойные покрытия  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/TiAl$  и  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/Ta$  с различной архитектурой слоев
4. Исследовать влияние количества и толщины отдельных слоев на механические и трибологические свойства покрытий  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/TiAl$  и  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/Ta$

В ходе работы методом реактивного магнетронного распыления были нанесены однослойные покрытия  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  с содержанием тантала от  $y = 0$  до  $y = 0,65$ , а также многослойные композиции на основе системы  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  с различным количеством и толщиной слоев. Синтез покрытий осуществлялся на подложки из титана марки BT1-0 и Si (100). В работе проводилось изучение

элементного и фазового составов, внутренней микроструктуры, механических и трибологических свойств покрытий.

В результате исследований было показано, что увеличение содержания Ta в покрытиях  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  позволяет повысить вязкость их разрушения и адгезионную прочность. В то же время, изменение внутренней микроструктуры покрытий способствует снижению износостойкости покрытий с ростом содержания в них тантала. Создание многослойной архитектуры покрытий на основе системы  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  позволило подавить рост столбчатых зерен через всю толщину покрытия, и, как следствие, существенно повысить их износостойкость по сравнению с однослойным покрытием.

Область применения: защитные покрытия для режущего и обрабатывающего инструмента, пресс-форм, подвижных узлов механизмов, протезов и имплантов.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании покрытий, позволяющих повысить срок службы деталей и механизмов, работающих в условиях трения.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	15
Глава 1. Износостойкие защитные покрытия на основе системы Ti-Al-N .....	18
1.1 Микроструктура, механические и термические свойства покрытий Ti-Al-N .....	18
1.2 Четырехкомпонентные защитные покрытия .....	20
1.2.1 Легирование покрытий Ti-Al-N неметаллами (B, C, Si).....	20
1.2.2 Легирование металлами III-VI групп.....	21
1.3 Многослойные защитные покрытия на основе системы $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ ....	24
Глава 2. Материалы и методы.....	29
Глава 3. Результаты и обсуждение .....	36
3.1 Влияние содержания Ta на механические и трибологические свойства покрытий $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ .....	36
3.1.1 Фазовый состав и микроструктура покрытий.....	36
3.1.2 Механические характеристики.....	38
3.1.3 Скретч-тестирование .....	41
3.1.4 Трибологические испытания .....	43
3.2 Влияние многослойной архитектуры на механические и трибологические характеристики покрытий .....	46
3.2.1 Фазовый состав и микроструктура многослойных покрытий .....	46
3.2.2 Механические характеристики.....	49
3.2.3 Скретч-тестирование .....	50
3.2.4 Трибологические испытания .....	53
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	56

4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	57
4.1.1	Анализ конкурентных технических решений.....	57
4.1.2	SWOT-анализ .....	58
4.2	Планирование научно-исследовательских работ .....	60
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	60
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	61
4.2.3	Разработка графика проведения исследования .....	61
4.3	Бюджет научно-технического исследования .....	64
4.3.1	Расчет материальных затрат научно-технического исследования .....	64
4.3.2	Расчет амортизации специального оборудования.....	65
4.3.3	Основная заработная плата исполнителей исследования.....	65
4.3.4	Дополнительная заработная плата исполнителей исследования.....	67
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	67
4.3.6	Накладные расходы .....	68
4.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .	68
4.4	Определение ресурсной эффективности исследования.....	69
Глава 5.	Социальная ответственность.....	74
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	74
5.1.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства .....	74
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	75
5.2	Производственная безопасность .....	77
5.2.1	Анализ вредных производственных факторов .....	78
5.2.1.1	Повышенный уровень локальной вибрации .....	78

5.2.1.2 Повышенный уровень шума .....	78
5.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочего места .....	79
5.2.1.4 Отклонение показателей микроклимата.....	83
5.2.2 Анализ опасных факторов .....	84
5.2.2.1 Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий.....	84
5.3 Экологическая безопасность.....	85
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	86
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований .....	86
5.4.2 Разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	86
5.5 Выводы по разделу .....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	89
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	91
Приложение А .....	103
2 Materials and methods .....	104

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на интенсивное развитие современной науки, многие вопросы, связанные с задачами трения и износа, по-прежнему, остаются актуальными. Основным способом повышения эффективности эксплуатации и долговечности деталей, работающих в узлах трения различных конструкций и механизмов, является модификация их поверхности. В частности, нанесение на поверхность изделий износостойких защитных покрытий позволяет значительно улучшить их механические и трибологические характеристики. При этом ни один из существующих типов материалов, традиционно используемых в качестве защитных покрытий, не обладает полным комплексом необходимых физико-механических свойств. Двумя основными направлениями решения проблемы повышения износостойкости защитных покрытий является их легирование дополнительными химическими элементами и синтез многослойных композиций, в составе которых чередуются слои различных материалов [1, 2]. Преимущество данных подходов заключается в возможности изменения свойств покрытий путем варьирования содержания легирующего элемента, а также комбинирования различных слоев, их количества и толщины.

В данной работе исследуются покрытия  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с различным содержанием Ta, а также многослойные композиции на основе системы  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ . Среди многообразия многокомпонентных покрытий, обладающих повышенными твердостью и износостойкостью, наиболее востребованными на сегодняшний день являются покрытия на основе нитридов переходных металлов, в особенности – системы Ti-Al-N. Добавление Al в покрытия TiN позволяет резко увеличить их стойкость к окислению (с 500 °C до 800 °C), а также обеспечивает сохранение высоких значений твердости и износостойкости при повышенных температурах [3]. Введение в состав данных покрытий дополнительных элементов, в частности, легирование Ta, позволяет повысить их механические характеристики, износостойкость и термическую стабильность [4].

Создание многослойных композиций, состоящих из чередующихся слоев различных материалов, позволяет ещё больше повысить физико-механические свойства защитных покрытий [5]. Наличие границ раздела между слоями, подавление роста столбчатых зерен, а также различие в механических характеристиках соседних слоев обеспечивают эффективный механизм диссипации энергии разрушения, препятствуя распространению трещин вглубь покрытий, и, как следствие, повышению износостойкости покрытий [6, 7]. Однако существенное влияние на характеристики подобных многослойных структур оказывают количество и толщина отдельных слоев. Поэтому надежность и долговечность многослойных покрытий при механических и трибологических нагрузках в значительной степени определяются их архитектурой.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является исследование влияния содержания Ta в покрытиях  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$ , а также количества и толщины слоев в многослойных композициях на основе системы  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  на их механические и трибологические характеристики

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Методом реактивного магнетронного распыления нанести покрытия  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  с различной концентрацией Ta
2. Изучить влияние содержания Ta на механические и трибологические характеристики покрытий  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$
3. Синтезировать многослойные покрытия  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/TiAl$  и  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/Ta$  с различной архитектурой слоев
4. Исследовать влияние количества и толщины отдельных слоев на механические и трибологические свойства покрытий  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/TiAl$  и  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN/Ta$

Положения, выносимые на защиту:

1. Повышение вязкости разрушения покрытий Ti-Al-N за счёт легирования Ta позволяет существенно увеличить их трещиностойкость и адгезионную прочность.



2. Введение промежуточных слоев Ti-Al и Ta в покрытия на основе системы Ti-Al-Ta-N подавляет в них рост столбчатых зерен и обуславливает отклонение трещин на границах раздела между слоями, способствуя увеличению износостойкости покрытий.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые было проведено комплексное исследование механических и трибологических свойств покрытий  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  с содержанием тантала от  $y = 0$  до  $y = 0,65$ . Впервые продемонстрировано влияние вязких металлических подслоев TiAl и Ta на механические и трибологические свойства покрытий на основе системы  $Ti_{1-y-x}Al_xTa_yN$  с различной архитектурой слоев.

Практическая значимость результатов ВКР заключается в разработке и создании покрытий, использование которых позволяет повысить надежность и долговечность деталей и механизмов, работающих в условиях сильных механических и фрикционных нагрузок.

Реализация и апробация работы: результаты, полученные в рамках выполнения выпускной квалификационной работы, были представлены на VIII Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2021.

## Глава 1. Износостойкие защитные покрытия на основе системы Ti-Al-N

### 1.1 Микроструктура, механические и термические свойства покрытий Ti-Al-N

На сегодняшний день наряду с модификацией поверхностного слоя основным способом повышения эффективности эксплуатации и долговечности конструкций и механизмов, используемых в современной промышленности, является нанесение износостойких защитных покрытий. В частности, благодаря своим превосходным характеристикам, таким как высокие твердость и износостойкость, широкое промышленное применение получили бинарные покрытия TiN [8]. Однако низкая стойкость к окислению, а также высокий коэффициент трения подобных покрытий обусловили необходимость создания новых покрытий с улучшенными свойствами [9].

Решением данной проблемы стало создание трехэлементного покрытия Ti-Al-N, обладающего повышенной твердостью, износостойкостью и окислительной стойкостью. В равновесных условиях бинарное покрытие TiN кристаллизуется в ГЦК структуре NaCl B1 (с-TiN), в то время как AlN – в структуре вюрцита B4 (w-AlN), что обуславливает низкую растворимость AlN в TiN (<2 ат.% при 1000 °C [10]). В то же время, методы физического осаждения покрытий из паровой фазы (PVD), такие как дуговое испарение и магнетронное распыление, характеризуются высоконеравновесными условиями осаждения, при которых возможно формирование твердого раствора  $Ti_{1-x}Al_xN$  с концентрацией алюминия достигающей  $x \sim 0,63$  [11]. Высокие скорости осаждения и охлаждения обуславливают кристаллизацию ГЦК AlN, тем самым позволяя синтезировать пересыщенный твердый раствор Ti-Al-N, в котором алюминий частично замещает атомы титана в кристаллической решетке с-TiN (рисунок 1.1).

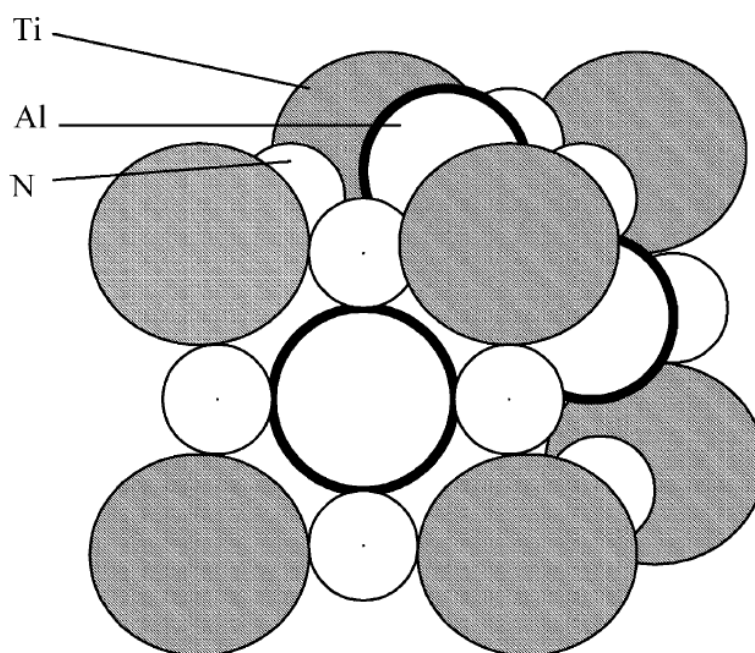


Рисунок 1.1 – Структура твердого раствора Ti-Al-N [12]

Образование фазы  $\epsilon$ -AlN в покрытиях  $Ti_{1-x}Al_xN$  является энергетически выгодным до  $x \sim 0,6-0,7$ , тогда как при более высокой концентрации Al формируется гексагональная фаза вюрцита ( $w$ -AlN) [13]. В силу того, что ионный радиус алюминия меньше, чем титана, то увеличение концентрации Al приводит к уменьшению параметра решетки покрытий  $Ti_{1-x}Al_xN$  с 0,424 нм вплоть до 0,417 нм в зависимости от концентрации [14]. Это обуславливает упругую дисторсию кристаллической решетки и, как следствие, твердорастворное упрочнение материала покрытия [15]. Таким образом, повышение содержания алюминия в метастабильных покрытиях  $Ti_{1-x}Al_xN$  позволяет достичь величины твердости  $\sim 40$  ГПа [16]. Увеличение концентрации Al свыше  $x \sim 0,7$  приводит к образованию областей, обогащенных алюминием, где формируется фаза  $w$ -AlN. Так как вюрцит имеет существенно меньшую твердость, чем  $\epsilon$ -AlN, то твердость покрытий  $Ti_{1-x}Al_xN$  резко снижается [17]. Дополнительного повышения твердости покрытий  $Ti_{1-x}Al_xN$  можно добиться путем их отжига в инертной атмосфере или в вакууме в диапазоне температур от 700 до 950 °С. Данный эффект объясняется спинодальным разложением метастабильного твердого раствора  $Ti_{1-x}Al_xN$ , имеющего однофазную ГЦК

структуру, и образованием доменов  $c\text{-TiN}$  и  $c\text{-AlN}$  [18]. Различие параметров решеток этих фаз и необходимость их когерентности, обуславливает дисторсию кристаллической решетки, накладывая ограничение на движение дислокаций, тем самым способствуя повышению твердости покрытий.

В то же время при температурах свыше  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  спинодальный распад метастабильной фазы  $c\text{-AlN}$  в стабильный  $w\text{-AlN}$  сопровождается образованием микротрещин в покрытии, в следствие резкого увеличения объема вюрцитной фазы [19]. Подобные дефекты действуют как пути для быстрой диффузии кислорода, существенно снижая стойкость покрытий к окислению при повышенных температурах [20]. Кроме того, при температуре выше  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит окисление покрытия  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  с образованием двухслойной оксидной окалины. Верхний слой, преимущественно содержащий  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеет плотную структуру и снижает скорость диффузии кислорода вглубь покрытия. В то же время нижний оксидный слой, обогащенный  $\text{TiO}_2$ , характеризуется пористой структурой и ухудшает адгезию оксида, что приводя к его отслоению и скалыванию [21]. Последнее стимулировало поиск способов дальнейшего улучшения свойств покрытий  $\text{Ti-Al-N}$  среди которых, одним из наиболее эффективных является их легирование дополнительными элементами, то есть создание четырех-, пяти- и более элементных систем.

## **1.2 Четырехкомпонентные защитные покрытия**

### **1.2.1 Легирование покрытий $\text{Ti-Al-N}$ неметаллами (B, C, Si)**

Одним из способов улучшения характеристик покрытий на основе системы  $\text{Ti-Al-N}$  является введение в них неметаллических элементов, например B, C и Si. Атомы данных элементов внедряются в подрешетку азота [22-25], что приводит к выделению аморфных фаз  $\text{BN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и C (графит) на границах зерен кубического  $\text{Ti-Al-N}$  с уменьшением размера последних. Таким образом, образуется нанокompозитная структура, позволяющая существенно увеличить

твердость данных покрытий. Также легирование покрытий Ti-Al-N бором, углеродом и кремнием способствует замедлению стадии роста метастабильной фазы анатаза и последующего его превращения в рутил, что предотвращает дальнейшее разрушение покрытий на основе Ti-Al-N [21, 26, 27].

### 1.2.2 Легирование металлами III-VI групп

Другой подход основан на легировании покрытий системы Ti-Al-N переходными металлами III-VI групп (Y, Cr, V и Mo). Эти химические элементы, напротив, замещают Ti или Al в подрешетке металла, что позволяет в широких пределах варьировать электронную конфигурацию атомов (число валентных электронов, дополнительные электронные d- и f-состояния и т.п.). Это обуславливает существенное изменение характера химической связи и, тем самым, ключевых свойств покрытий. Так добавление в покрытия Ti-Al-N до 1 ат.% Y приводит к уменьшению размера столбчатых зерен с сохранением их кубической структуры [28]. Также легирование иттрием позволяет повысить твердость покрытий Ti-Al-Y-N до  $\approx 33$  ГПа, а также снизить величину сжимающих напряжений в сравнении с покрытиями Ti-Al-N [29]. Данные покрытия характеризуются повышенной стойкостью к окислению вследствие высокой скорости роста  $Al_2O_3$ , который выступает в роли защитного слоя, препятствующего проникновению кислорода к первичному покрытию [30]. При более высоких содержаниях Y (от 2 до 9 ат.%) твердый раствор Ti-Al-Y-N характеризуется тенденцией к разделению фаз на кубическую и вюрцитную, что снижает его механические характеристики [31].

Легирование Cr покрытий Ti-Al-N приводит к незначительному повышению их твердости за счет твердорастворного упрочнения [32], а также к снижению коэффициента трения [33]. В работе [34] показано, что покрытия с добавлением хрома демонстрируют выдающуюся стойкость к окислению, а образование пленок состоящих из смеси оксидов алюминия и хрома способствует улучшению трибологических свойств образцов. В работах [35] и

[36] показано, что повышение содержания Cr в Ti-Al-N приводит к замедлению образования w-AlN во время отжига при температуре выше 1000 °С.

Добавление малого количества V в покрытия Ti-Al-N приводит к формированию двухфазной структуры, состоящей из ГЦК и вюрцита. Постепенное повышение содержания ванадия до 25 ат.% обеспечивает стабилизацию ГЦК фазы и формирование однофазной структуры [37]. Также увеличение содержания ванадия сопровождалось ростом твердости покрытий Ti-Al-V-N от 21 до 28 ГПа и уменьшением в них остаточных сжимающих напряжений с 690 до 330 МПа [38]. Трибологические испытания при температуре 700 °С продемонстрировали, что с повышением концентрации V от 2 до 25 ат.%. коэффициент трения снижается с 0,85 до 0,27 [39]. Подобное поведение связано с формированием смазывающего слоя, содержащего фазу Магнели V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [40], позволяющего эффективно повысить износостойкость покрытий на начальных этапах трибологических испытаний. При дальнейших испытаниях в условиях высокой температуры происходит восстановление V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, и, как следствие, увеличение коэффициента трения.

В работе [41] было показано, что легирование покрытий Ti-Al-N малым количеством Mo не приводит к возникновению новых фаз, в отличие от добавления Y, Cr или V. При увеличении содержания молибдена в покрытиях Ti-Al-Mo-N до 12,1 ат.% наблюдается изменение их структуры с блочной на столбчатую, сопровождающееся ростом твердости покрытий до ~ 41 ГПа. При содержании молибдена более 27 ат.% происходит выделение вторичной ГЦК-фазы Mo<sub>2</sub>N (29,4 ГПа), твердость которой выше, чем у Ti-Al-N (24,6 ГПа), что в совокупности с уменьшением размера зерен является причинами роста твердости покрытий Ti-Al-Mo-N [42]. Коэффициент трения и интенсивность износа данных покрытий, снижаются в связи с увеличением твердости и образованием фазы Магнели MoO<sub>3</sub>, выполняющей роль смазывающего материала [43].

Добавление в покрытия Ti-Al-N элементов IV и V групп (Zr, Nb и Ta) являются ещё одним перспективным способом улучшения характеристик

данных покрытий. Так, легирование небольшим количеством Zr приводит к увеличению твердости покрытий на основе Ti-Al-N [44], а также замедляет образование стабильной фазы  $w$ -AlN во время термического отжига. Последнее, является причиной высоких значений твердости ( $\sim 40$  ГПа) в широком диапазоне температур (700-1100 °C) [45, 46]. Кроме того, Zr способствует образованию плотной окалины, выполняющей роль барьерного слоя, сдерживающего активное окисление защитного покрытия.

Легирование покрытий Ti-Al-N ниобием в широких пределах его концентрации (от 0 до 61 ат.%), приводит к незначительному снижению их твердости вследствие эволюции текстуры с (111) на (200) [47]. Изменение связей с преимущественно ионных на ковалентные способствует увеличению пластичности покрытий, что, несмотря на уменьшение твердости, способствует повышению вязкости разрушения [48]. Добавление Nb также замедляет процесс образования вюрцитной фазы, так что кубическая фаза Ti-Al-Nb-N сохраняется даже при температуре 1450 °C [49],

Одним из наиболее перспективных легирующих элементов, относящихся к рассматриваемой группе, является Ta [50-54]. При введении тантала в покрытия Ti-Al-N изменяется их электронная структура [55], что в совокупности с более высокой энергией активации диффузии Ta по сравнению с Ti и Al приводит к повышению температуры термически индуцированного разложения данных покрытий на  $\sim 200$ -300 °C до  $\sim 1200$  °C [50]. Улучшение стойкости к окислению покрытий Ti-Al-Ta-N является следствием образования на их поверхности слоев оксидов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub>, обогащенного танталом. Частичное замещение титана атомами Ta в кристаллической решетке рутила способствует уменьшению количества вакансий кислорода, тем самым обуславливая снижение массопереноса последнего к границе нитридного слоя. [52].

В работе [56] показано, что увеличение  $y$  от 0 до 0,37 приводит к тому, что преимущественная ориентация покрытий Ti<sub>1-x-y</sub>Al<sub>x</sub>Ta<sub>y</sub>N изменяется с (111) на (200), а столбчатая структура становится более компактной и тонкой. Уменьшение размера зерен, а также твердорастворное упрочнение покрытий,

вызванное упругой дисторсией кристаллической решетки, способствуют повышению твердости покрытий вплоть до 31,2 ГПа при  $y = 0,21$ .

В теоретических работах [57, 58] показано, что четырехкомпонентные покрытия  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  должны иметь более высокую пластичность и вязкость разрушения, чем  $Ti-Al-N$ , что весьма важно, учитывая характерную хрупкость нитридов переходных металлов [59]. Оценка вязкости разрушения покрытий, легированных Ta, проводилась экспериментальных работах [60, 58] с помощью отношения  $H/E$ . Показано, что максимальные значения 0,085 и 0,095 параметра  $H/E$  достигаются при  $y = 0,15$  и 0,37 соответственно, что обусловлено резким увеличением твердости и снижением модуля упругости. В работе [61] исследованы покрытия  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с содержанием тантала от 0,07 до 0,28. Показано, что максимальная величина вязкости разрушения ( $4,7 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ ) достигается при  $y = 0,15$ , тогда как дальнейшее увеличение количества легирующего элемента приводит к её снижению. Однако обнаруженный в [61] пик вязкости разрушения можно объяснить наличием в покрытиях дополнительных фаз, в частности  $Ta_5N_6$ , образующейся из-за сверхстехиометрического содержания азота. Легирование Ta покрытий  $Ti-Al-N$  позволяет улучшить трибологические характеристики покрытий при высоких температурах [30]. В работе [62] показано, что образование субстехиометрической фазы рутила  $(Ti,Ta)_nO_{2n-1}$  при 900 °C обуславливает снижение сдвиговой прочности оксидного слоя и уменьшение коэффициента трения покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с увеличением  $y$ .

### **1.3 Многослойные защитные покрытия на основе системы $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$**

Помимо легирования дополнительными элементами, ещё одним перспективным способом повышения характеристик защитных покрытий является создание многослойных композиций, состоящих из чередующихся слоев различных материалов. Подобный подход позволяет путем изменения



архитектуры и состава покрытия получать многослойные структуры с уникальными свойствами.

Повышение износостойкости многослойных покрытий может достигаться за счет деформационного упрочнения, обусловленного наличием большого числа границ раздела между слоями. Основным механизмом этого процесса является скольжение дислокаций и их взаимодействие с границами раздела [63-65]. Двигаясь в кристаллической решетке материала, дислокации рано или поздно сталкиваются с энергетическим барьером на границе раздела между слоями и накапливаются вблизи нее, способствуя упрочнению покрытия [66]. Стоит отметить, что увеличение прочности, вызванное пластической деформацией и подчиняющееся закону Холла-Петча [67, 68], характерно для материалов с размером зерен  $d$  более 10 нм (рисунок 1.2) [69]. С другой стороны, при  $d$  менее 10 нм дислокации не генерируются вследствие того, что их длина меньше размера зерен, а увеличение твердости обусловлено взаимодействием атомов на границах зерен.

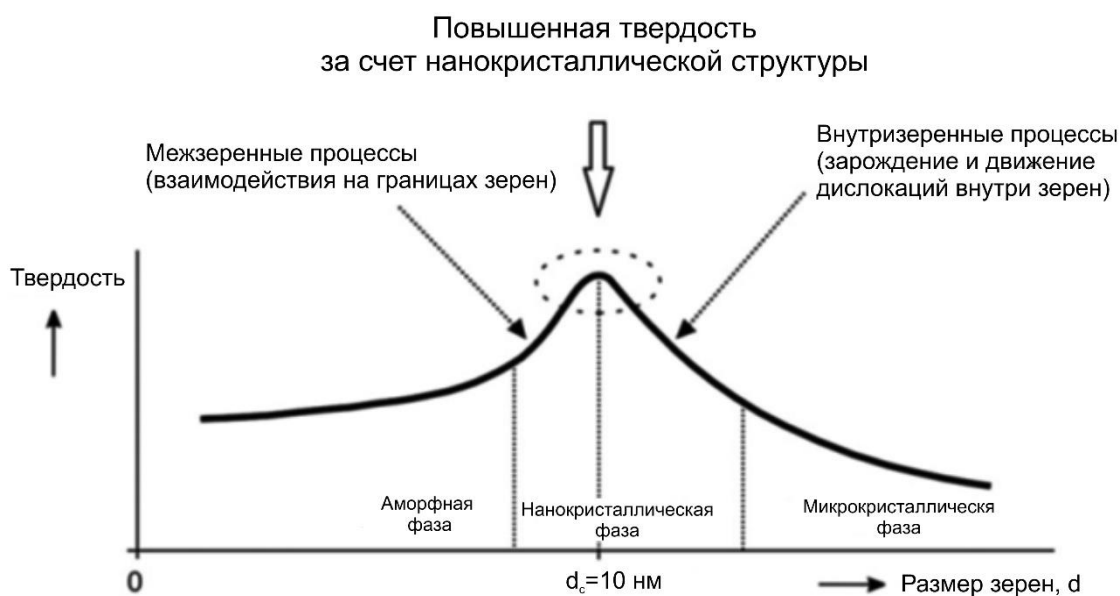


Рисунок 1.2 – Зависимость твердости покрытий от размера зерна  $d$  [69]

Ещё одним механизмом упрочнения многослойных композиций, является взаимодействие трещин, возникающих вследствие механического воздействия

на покрытия, с границами раздела между слоями [70, 71]. Как показано на рисунке 1.3, трещина, зарождающаяся на поверхности покрытия, может расщепляться или отклоняться на границах зерен или фаз внутри слоя, а также на границах раздела между слоями [72, 73, 74]. Кроме того, при росте трещин через многослойное покрытие происходит их взаимодействие с периодическими полями напряжений и деформаций, которые способствуют диссипации энергии разрушения в слоях и на их границах [75]. Наконец, трещина может распространяться через всю толщину покрытия к подложке, способствуя его полному отслоению. Повышения эффективности данных механизмов можно достичь путем варьирования величины размера зерен, элементного и фазового состава, а также количества и толщины отдельных слоев многослойных композиций.

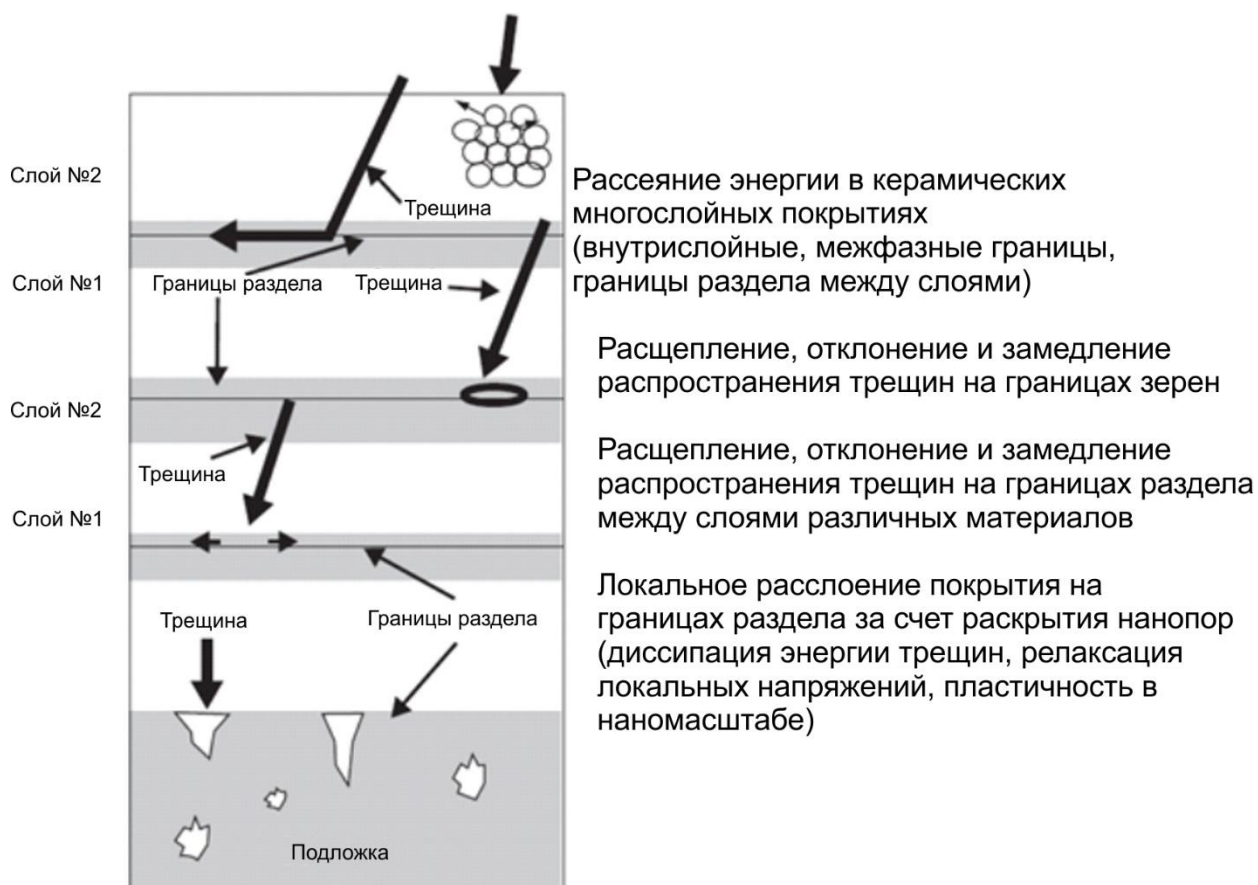


Рисунок 1.3 – Механизмы упрочнения в многослойных покрытиях [76]

Известно, что чередование слоев в многослойной композиции предотвращает рост столбчатых зерен, которые способствуют легкому распространению трещин по их границам [77, 78, 79]. Также ограничение роста столбчатых зерен приводит к снижению шероховатости поверхности покрытия [80]. Так, при уменьшении толщины бислоя покрытий TiAlTaN/Ta до 140 нм происходит снижение их шероховатости вплоть до 8,9 нм, что в свою очередь способствует уменьшению их коэффициента трения и адгезионного износа [81]. Механические характеристики многослойных покрытий сильно зависят от толщины бислоя [82]. В работе [83] показано, что твердость покрытий TiAlN/TiAlTaN увеличивается с ростом толщины бислоя, тогда как модуль упругости, напротив, снижается. В работе [84] продемонстрировано, что многослойная композиция, состоящая из чередующихся слоев TiAlTaN и TaAlN, обладает высокой твердостью, плотной структурой зерен и стабилизированным фазовым составом даже при высоких концентрациях Ta. Последнее оказывает существенное влияние на механические и окислительные свойства покрытий [85]. При осаждении покрытий TiAlTaN/TiAlN в метастабильной ГЦК-фазе их твердость достигает ~ 32,8 и 34,3 ГПа для 6 и 12% тантала соответственно [86]. Более того, замедление спинодального распада при легировании Ta способствует сохранению высоких значений твердости даже после отжига при 1000 °С. Однако зависимость механических и окислительных свойств наблюдается не только от содержания тантала, но и от толщины покрытий [87]. В работе [88] показано, что многослойная композиция Al-Cr-N/Ti-Al-Ta-N толщиной 3 мкм характеризуется более высокими значениями твердости (35 ГПа) по сравнению с однослойными покрытиями Al-Cr-N (28 ГПа) и Ti-Al-Ta-N (32 ГПа), а также обладает повышенной стойкостью к окислению. С увеличением толщины покрытия Al-Cr-N/Ti-Al-Ta-N до 20 мкм улучшаются как механические, так и окислительные свойства. В то же время, известно, что с увеличением толщины покрытия в нем возрастают остаточные внутренние напряжения [89]. Однако при увеличении толщины многослойных покрытий AlCrN/TiAlTaN свыше 4 мкм

наблюдается отсутствие её влияния не только на внутренние напряжения, но и на механические характеристики [90].

В настоящее время подавляющее большинство исследований многослойных структур на основе  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  проводятся для наноразмерных бислоев. Подобная архитектура позволяет создавать покрытия с повышенной твердостью [92, 93], однако слои в них характеризуются высокой степенью когерентности [94, 95], что затрудняет их деформационное упрочнение и снижает диссипацию энергии разрушения при распространении трещин ввиду отсутствия границ раздела между слоями.

Однако, несмотря на большое количество исследований, посвящённых изучению мех поведения покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , на сегодняшний день отсутствует подробная информация об изменении их мех свойств, в частности, вязкости разрушения в широком диапазоне концентраций тантала. Кроме того, практически отсутствуют работы, посвященные исследованию механических и трибологических свойств многослойных покрытий  $Ti-Al-Ta-N$  с промежуточными металлическими слоями. Таким образом, данная работа направлена на исследование влияния содержания Ta на механические и трибологические характеристики покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , а также на создание многослойных композиций на основе системы  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , обладающих оптимальным сочетанием характеристик, способствующем увеличению износостойкости по сравнению с однослойным покрытием  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ .

## Глава 2. Материалы и методы

Покрyтия  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  наносили на подложки из технического чистого титана марки ВТ1-0 и Si (001) размерами  $15 \times 10 \times 1 \text{ мм}^3$  и  $10 \times 10 \times 0,38 \text{ мм}^3$ , соответственно, нагретые до температуры  $425 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подложки из Ti подвергались механической шлифовке и полировке с последующей ультразвуковой очисткой в спирте. Для улучшения адгезии покрытий перед их нанесением все подложки были подвергнуты бомбардировке ионами Ag при рабочем давлении газа 0,02 Па в течение 20 минут. Покрyтия были нанесены методом реактивного магнетронного распыления на установке МИР-1М (рисунок 2.1) с помощью двух планарных магнетронов с использованием дисковых мишеней из сплава Ti/Al (55/45 ат.%) и Ta (99,99 ат.%) в среде смеси газов Ar и N<sub>2</sub>. Общее давление в рабочей камере составляло 0,3 Па, парциальное давление азота – 0,06 Па. Содержание Ta в покрытиях  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  варьировалось от 0 до 65%.

Нанесение многослойных покрытий проводилось путем чередования керамических ( $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ ) и металлических ( $Ti_{0,45}Al_{0,55}$  или Ta) слоев. Осаждение слоев  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  осуществлялось аналогично однослойным покрытиям. При нанесении металлических слоев прекращалась подача азота и выключался один из магнетронов. Полученные многослойные покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  состоят из семи и пятнадцати чередующихся слоев. Отношение толщин семислойных покрытий составило 0,7/0,1 и 0,6/0,2 мкм, в то время как пятнадцатислойных – 0,3/0,1 мкм (таблица 2.1). Толщина покрытий  $h$  составила 3,0-3,1 мкм.

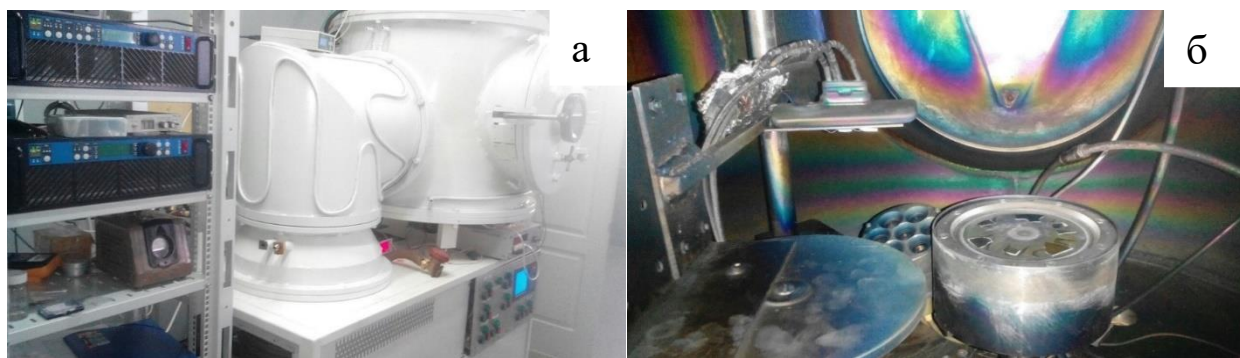


Рисунок 2.1 – Внешний вид установки для магнетронного распыления  
МИР-1М

Таблица 2.1 – Архитектура многослойных покрытий на основе системы  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$

Покрытие	Количество слоев	Толщина слоев, мкм	Толщина покрытия, мкм
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$	1	3,0	3,0
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$	4/3	0,7/0,1	3,1
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$	4/3	0,6/0,2	3,0
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$	8/7	0,3/0,1	3,1
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$	4/3	0,7/0,1	3,1
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$	4/3	0,6/0,2	3,0
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$	8/7	0,3/0,1	3,1

Морфологию поперечного сечения покрытий и дорожек трения на их поверхности, а также элементный состав изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss EVO 50, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Inca АСТ-Х. Структуру и фазовый состав покрытий исследовали методом рентгеновской дифракции в геометрии Брэгга-

Брентано с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-6000 с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). Микроструктуру поперечного сечения покрытий изучали с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM-2100. Образцы для ПЭМ-исследований подготавливали путем ионного травления с помощью установки Ion Slicer EM-09100IS.

Механические характеристики покрытий на основе системы  $\text{Ti}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ta}_y\text{N}$  были исследованы методом наноиндентирования с помощью установки NanoTest с использованием индентора Берковича. Твердость ( $H$ ) и модуль Юнга ( $E$ ) покрытий определяли по методу Оливера-Фарра [96]. Остаточные напряжения в покрытиях, нанесенных на подложки Si, были определены путем измерений кривизны прогиба поверхности подложки с использованием уравнения Стоуни [97].

Вязкость разрушения покрытий оценивалась с помощью испытаний на вдавливание сферического индентора с использованием метода, предложенного в [98, 99]. В соответствие с данным подходом, сфера большого диаметра  $D \gg h$  вдавливается в хрупкое покрытие на пластичной подложке под действием силы  $P$ , вызывая в последней большую деформацию, которая, в свою очередь, способствует возникновению растягивающих напряжений и деформаций в покрытии (рисунок 2.2). Величина радиальных деформаций покрытия  $\varepsilon_r$  возрастает от центра ( $\varepsilon_r = 0$ ) до края отпечатка ( $\varepsilon_r = \max$ ). При превышении предела прочности покрытия радиальные деформации способствуют образованию трещин по окружности отпечатка.

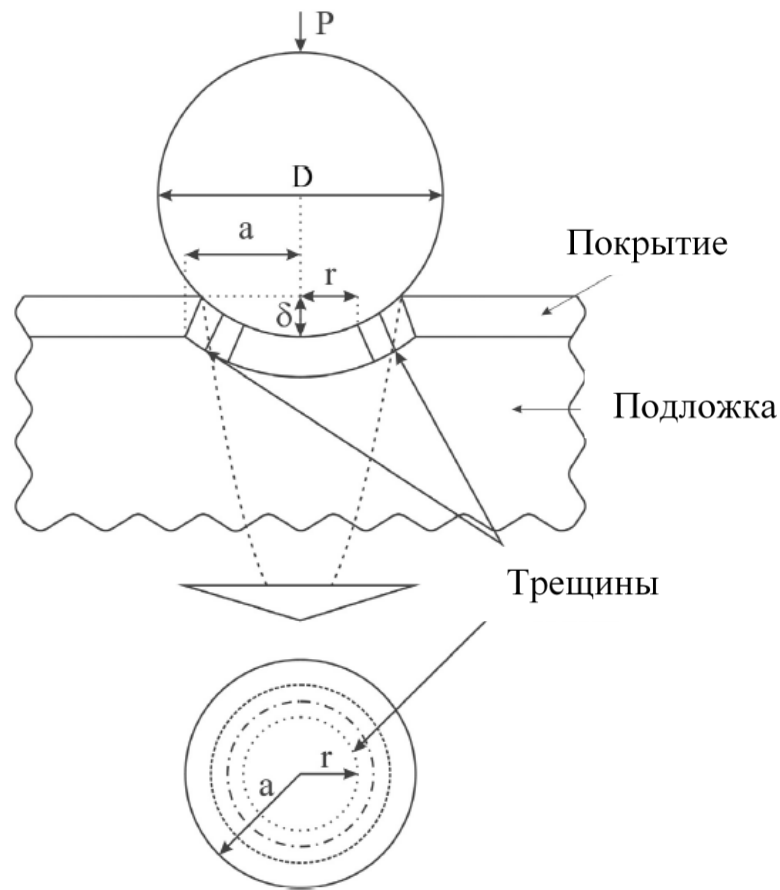


Рисунок 2.2 – Схема испытания на сферическое вдавливание [97]

Вязкость разрушения  $K_{IC}$  покрытия оценивали с помощью следующего уравнения:

$$K_{IC} = \sqrt{\bar{E}_c G}, \quad (2.1)$$

где  $\bar{E}_c = \frac{E_c}{(1-\nu_c^2)}$  – модуль плоской деформации покрытия ( $E_c$  и  $\nu_c$  – его модуль Юнга и коэффициент Пуассона), а  $G$  – скорость высвобождения энергии, которая определяется формулой [99, 100, 101]:

$$G = \frac{\pi h \varepsilon_c}{2} g(\alpha, \beta), \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_c$  – критическая деформация необходимая для растрескивания покрытия, а  $g(\alpha, \beta)$  – параметр, зависящий от параметров Дундурса  $\alpha$  и  $\beta$ , описывающих упругое несоответствие между покрытием и подложкой:



$$\alpha = \frac{\bar{E}_c - \bar{E}_s}{\bar{E}_c + \bar{E}_s}, \beta = \frac{\mu_c(1 - 2\nu_s) - \mu_s(1 - 2\nu_c)}{2[\mu_c(1 - \nu_c) + \mu_s(1 - \nu_c)]} \quad (2.3)$$

где  $E_s = \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)}$  – модуль плоской деформации подложки ( $E_s$  и  $\nu_s$  – ее модуль Юнга и коэффициент Пуассона),  $\mu_c$  и  $\mu_s$  – модули сдвига покрытия и подложки соответственно. Величина критической деформации  $\varepsilon_c$ , соответствующая растрескиванию покрытия определяется суммой деформации растяжения  $\varepsilon_r$ , вызванного деформацией подложки, а также остаточной деформации покрытия  $\varepsilon_R$ , возникшей в результате его осаждения:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_r + \varepsilon_R. \quad (2.4)$$

Численные расчеты, проведенные в [98], показали, что радиальную деформацию можно аппроксимировать формулой:

$$\varepsilon_r = \left[ m_1(\varepsilon_\gamma) \frac{r}{D} + m_2(\varepsilon_\gamma, n) \left( \frac{r}{D} \right)^3 \right] \varepsilon_\gamma, \quad (2.5)$$

где

$$m_1(\varepsilon_\gamma) = 1,45 + \frac{0,14}{\varepsilon_\gamma}, \quad (2.6)$$

$$m_2(\varepsilon_\gamma, n) = (1466 - 118n) + (-22,7 + 1,8n) \left( \frac{1}{\varepsilon_\gamma} \right) + (0,0075 - 0,003n) \left( \frac{1}{\varepsilon_\gamma} \right)^2, \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon_\gamma$  – деформация, соответствующая пределу текучести подложки,  $n$  – параметр Рамберга-Осгуда, который является обратной величиной к показателю деформационного упрочнения материала. Поскольку  $\varepsilon_c$  соответствует наименьшей деформации, при которой начинается растрескивание покрытия, а  $\varepsilon_r$  возрастает с увеличением расстояния от центра зоны контакта,  $r$  в уравнениях (2.5) – (2.7) является наименьшим радиусом образовавшихся концентрических трещин.

Испытания на вдавливание покрытий Ti-Al-Ta-N, нанесенных на подложки из титана, проводили на твердомере ТШ-2М с использованием шарика из сплава ВК8 (WC 92%) диаметром 5 мм. Максимальная приложенная нагрузка составляла 7350 Н. Полученные значения  $r$  были усреднены и использовались

для оценки критической радиальной деформации по формуле (2.5). Модуль Юнга, деформация, соответствующая пределу текучести и параметр Рамберга-Осгуда титановых подложек, определенные в результате испытаний на растяжение с использованием универсальной испытательной машины Instron 5582, составили 115 ГПа, 0,00217 и 20, соответственно. Используя значения  $\varepsilon_\gamma$  и  $n$  были рассчитаны параметры  $m_1(\varepsilon_\gamma)$  и  $m_2(\varepsilon_\gamma, n)$ , которые равны 66 и 8398 соответственно. Коэффициент Пуассона технического чистого титана – 0,32.

Скретч-тестирование покрытий на основе системы  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  проводилось с помощью установки Revetest RST с использованием конического индентора Роквелла с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления 200 мкм. Для исследования покрытий с различным содержанием Та путь перемещения индентора вдоль поверхности образца составлял 7 мм, скорость перемещения – 5 мм/мин, скорость нагружения 39 Н/мин, а максимальная приложенная нагрузка – 55 Н. Для исследования многослойных покрытий Та путь перемещения индентора вдоль поверхности образца составлял 7 мм, скорость перемещения – 3,5 мм/мин, скорость нагружения 20 Н/мин, максимальная приложенная нагрузка – 40 Н. Для каждого покрытия измерения проводили для двух образцов. На поверхности каждого образца было сделано по три царапины. В процессе царапания проводилась регистрация эволюции коэффициента трения, а также мониторинг сигналов акустической эмиссии. Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии изучена топография поверхности образцов в области царапин. Оптические исследования проводились на микроскопе Axiovert 40 Mat.

Трибологические испытания проводили при комнатной температуре в условиях сухого трения по схеме «шар-по-диск» с использованием трибометра CSEM CH2000. В качестве контртела использовался шарик из сплава ВК8 (WC 92%) радиусом 3 мм. Диаметр дорожки составлял 4 мм при скорости вращения подложки 2,5 см/с и нагрузке 5 Н. Путь, пройденный контртелом до прекращения испытаний, равен 80 м. Профиль поперечного сечения дорожки

трения измеряли с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ. Объемный износ образца и интенсивность износа рассчитывались по следующим формулам:

$$\Delta V_{\text{обр}} = Sl \text{ (мм}^3\text{)}, \quad (2.8)$$

$$I = \frac{\Delta V}{NF}, \quad (2.9)$$

где  $S$  – площадь сечения дорожки износа ( $\text{мм}^2$ ),  $l$  – длина дорожки износа (мм),  $N$  – полный путь, пройденный контртелом до конца испытаний (м),  $F$  – приложенная нагрузка (Н).

## Глава 3. Результаты и обсуждение

### 3.1 Влияние содержания Ta на механические и трибологические свойства покрытий $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$

#### 3.1.1 Фазовый состав и микроструктура покрытий

Исследование покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  методом энергодисперсионной спектроскопии показало, что покрытия без тантала представляют собой композицию  $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ , а состав покрытий, легированных Ta, варьируется от  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  до  $Ti_{0,20}Al_{0,15}Ta_{0,65}N$  (см. рисунок 3.1), что соответствует изменению содержания Ta от 5 до 32,5 ат.%. Методом рентгеновской дифракции установлено, что исследованные покрытия представляют собой твердый раствор  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с однофазной ГЦК структурой типа NaCl B1. При этом в соответствии с законом Вегарда увеличение содержания Ta приводит к линейному росту параметра кристаллической решетки с 0,417 нм у покрытий  $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$  до 0,434 нм у  $Ti_{0,20}Al_{0,15}Ta_{0,65}N$  (рисунок 3.2). Кроме того, происходит изменение преимущественной ориентации покрытий. Покрытия  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с низким содержанием Ta обладают выраженной текстурой (111), которая исчезает при  $y = 0,35$ . При более высоких  $y$  формируется текстура (200). Результаты рентгеноструктурных исследований хорошо согласуются с данными, полученными методом просвечивающей электронной микроскопии. Согласно этим результатам, в покрытиях с низким содержанием Ta формируется V-образная столбчатая структура (рисунок 3.3а), которая типична для конкурентного роста зерен [102], а при  $y \geq 0,35$  наблюдается образование столбчатых зерен с прямыми границами (рисунок 3.3б).

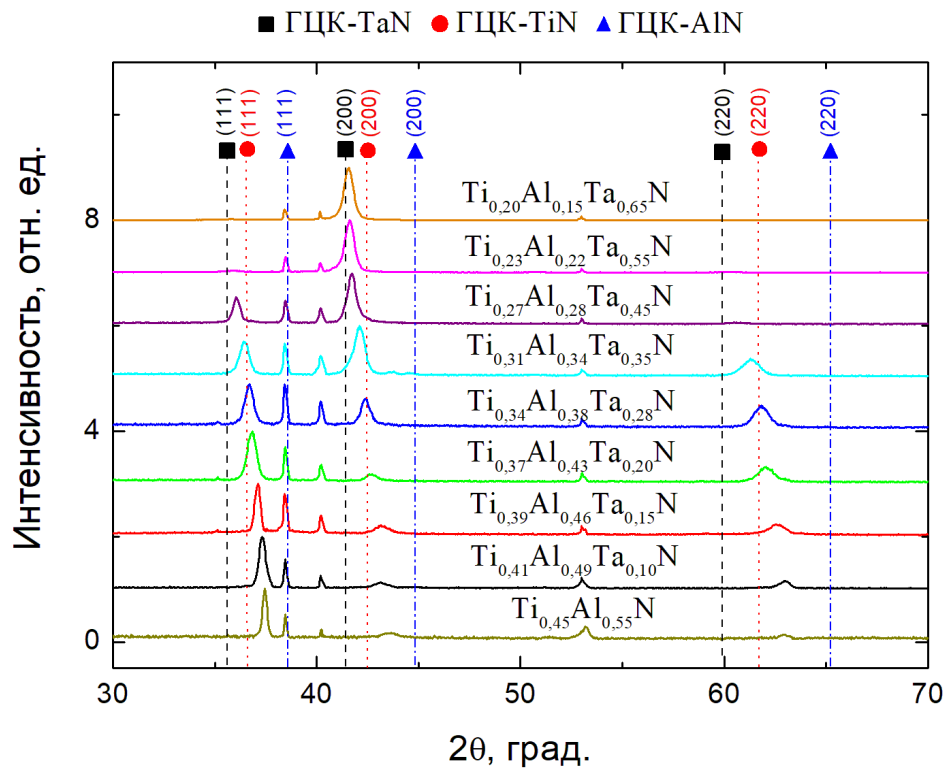


Рисунок 3.1 – Дифрактограммы покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с различным содержанием Ta

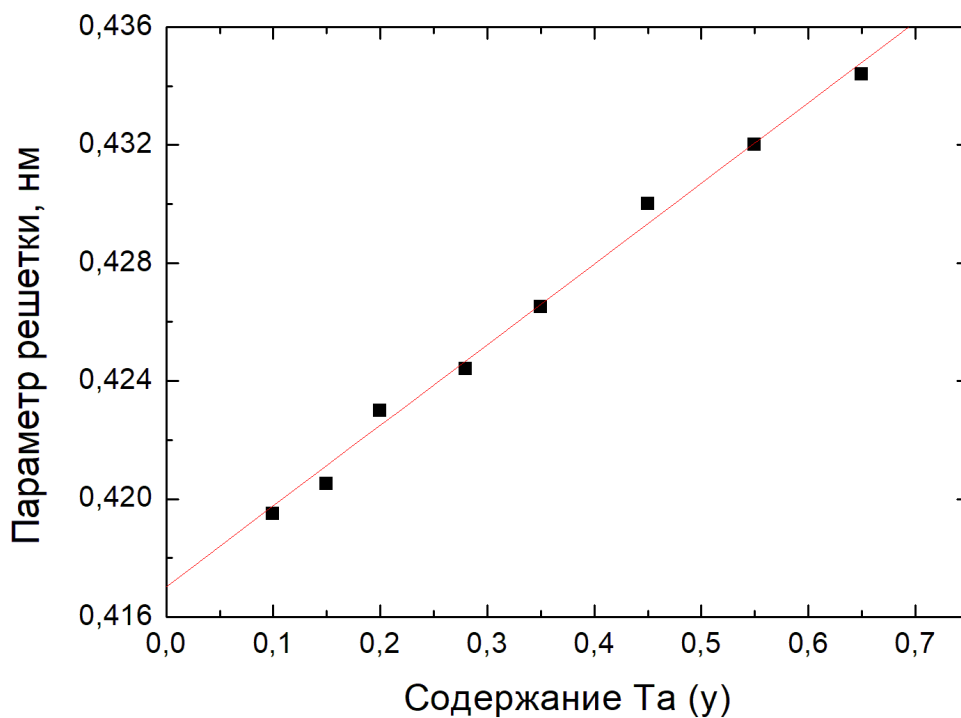


Рисунок 3.2 – Зависимость параметра решетки покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , определенного из данных рентгеновской дифракции от содержания Ta

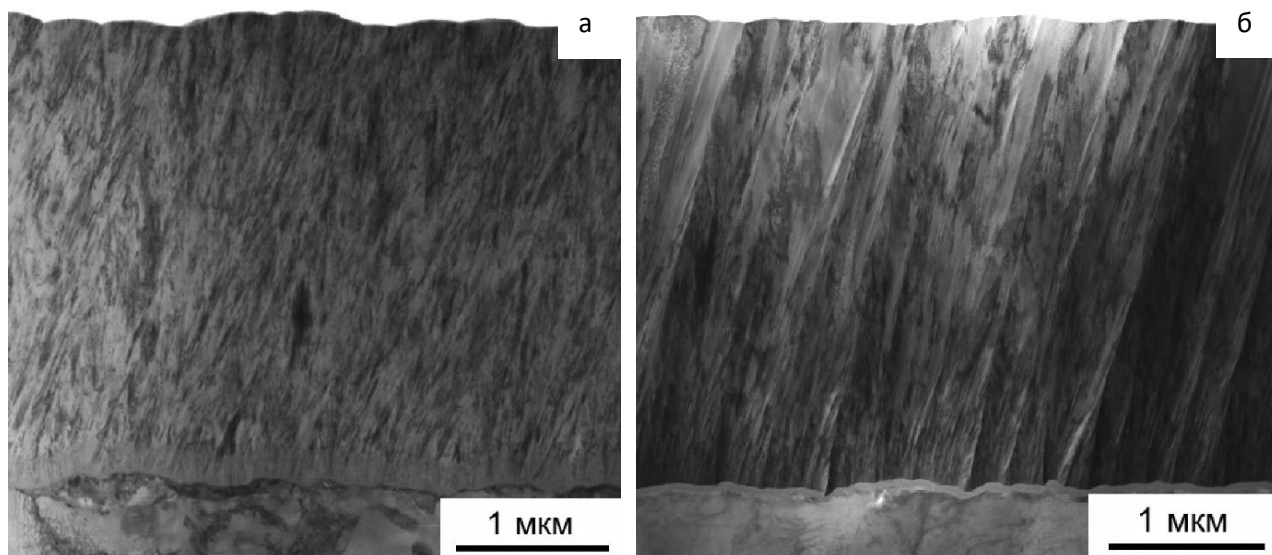


Рисунок 3.3 – ПЭМ-изображения поперечного сечения покрытий  $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$  (а) и  $\text{Ti}_{0,31}\text{Al}_{0,34}\text{Ta}_{0,35}\text{N}$  (б)

### 3.1.2 Механические характеристики

Методом наноиндентирования определена зависимость механических характеристик покрытий  $\text{Ti}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ta}_y\text{N}$  от содержания Ta. Установлено, что с увеличением  $y$  твердость покрытий  $H$  демонстрирует общую тенденцию к снижению с 31,2 ГПа у  $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$  до 28,3 ГПа у  $\text{Ti}_{0,20}\text{Al}_{0,15}\text{Ta}_{0,65}\text{N}$ . Однако при  $y = 0,35$  наблюдается локальный максимум  $H = 30,9$  ГПа (рисунок 3.4а). В свою очередь, модуль Юнга покрытий  $E$  монотонно снижается с ростом  $y$  с 463 ГПа у  $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$  до 351 ГПа у  $\text{Ti}_{0,20}\text{Al}_{0,15}\text{Ta}_{0,65}\text{N}$  (рисунок 3.4а). Параметры  $H/E$  и  $H^3/E^2$ , которые характеризуют предельные упругую и пластическую деформации материалов соответственно и используются для оценки вязкости и трещиностойкости покрытий, возрастают с увеличением  $y$  и имеют локальный максимум при  $y = 0,35$  (рисунок 3.4б).

Для выявления факторов, обуславливающих наличие максимума зависимости  $H(y)$  при  $y = 0,35$ , были определены остаточные внутренние напряжения в покрытиях методом измерения кривизны прогиба подложки. Обнаружено, что в процессе осаждения в покрытиях развиваются сжимающие напряжения, которые сначала растут с увеличением  $y$  от -1,6 ГПа у  $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$ ,

достигая максимума -3,9 ГПа у  $Ti_{0,31}Al_{0,34}Ta_{0,35}N$  (рисунок 3.5), после чего снижаются до -2,1 ГПа у  $Ti_{0,20}Al_{0,15}Ta_{0,65}N$ .

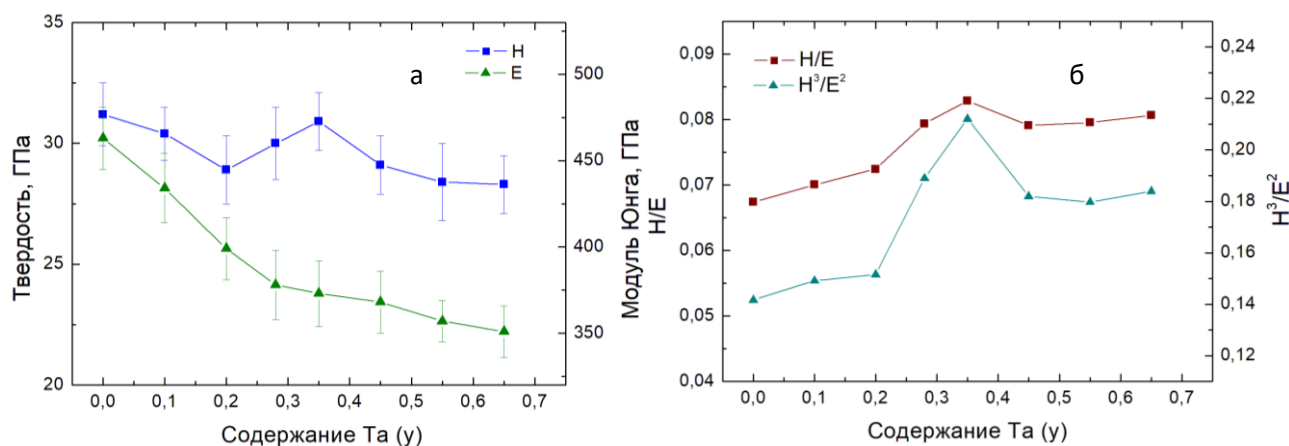


Рисунок 3.4 – Зависимость твердости и модуля Юнга (а), и остаточных внутренних напряжений (б) в покрытиях  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  от содержания Ta

Анализ выявленных закономерностей изменений твердости покрытий с ростом y свидетельствует о том, что они определяются конкуренцией между механизмами, ответственными за общее снижение  $H$  и  $E$ , и факторами, обуславливающими рост сжимающих напряжений. При  $y \leq 0,20$  механическое поведение покрытий главным образом определяется их разупрочнением с ростом содержания Ta, связанным с изменением характера химической связи (увеличением степени металличности) [103]. Последнее не только способствует снижению модуля Юнга покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , но и снижает их сдвиговую прочность по сравнению с композицией  $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ , которая преимущественно характеризуется ионным типом связи. При  $0,20 < y \leq 0,35$  повышение твердости связано с ростом сжимающих напряжений, который обусловлен внедрением в кристаллическую решетку Ti-Al-N атомов Ta, обладающих большим ионным радиусом, чем Ti и Al. Наконец, при  $y > 0,35$  увеличение степени металличности и снижение величины остаточных сжимающих напряжений приводят к уменьшению  $H$ .

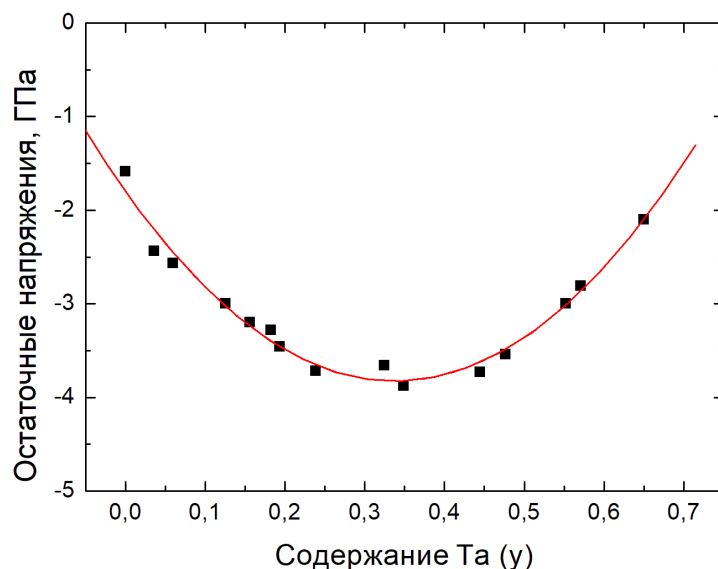


Рисунок 3.5 – Зависимость отношений  $H/E$  и  $H^3/E^2$  покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  от содержания Ta

Методом вдавливания сферического индентора установлено, что с увеличением  $y$  вязкость разрушения покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  возрастает от  $2,9 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  у  $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$  до  $3,9 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  у  $Ti_{0,20}Al_{0,15}Ta_{0,65}N$ , демонстрируя локальный максимум при  $y = 0,35$  (рисунок 3.6). Таким образом, характер зависимости вязкости разрушения от  $y$  полностью совпадает с аналогичными зависимостями отношений  $H/E$  и  $H^3/E^2$ , что подтверждает их применимость для прогнозирования трещиностойкости покрытий.

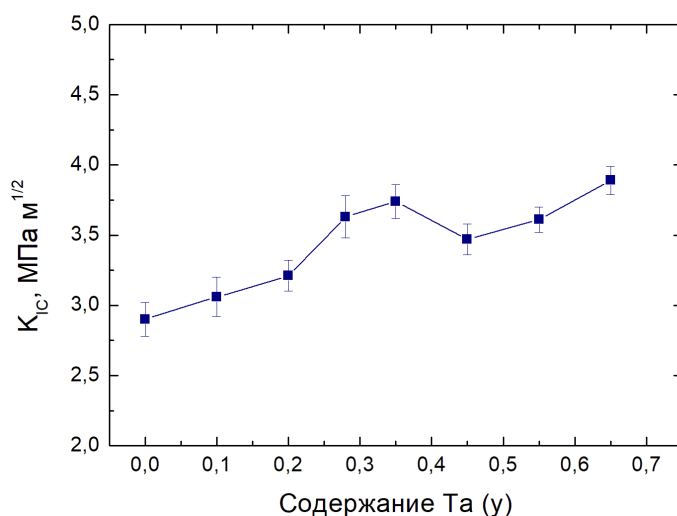


Рисунок 3.6 – Зависимость вязкости разрушения покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  от содержания Ta



### 3.1.3 Скретч-тестирование

Методом скретч-тестирования установлено, что при царапании покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  происходит пластическое оттеснение материала мягкой подложки  $Ti$  с образованием навалов перед индентором и по краям царапины. Разрушение покрытий начинается с образования трещин в зонах высокой локальной кривизны изгиба, в вершинах навалов, расположенных вдоль краев царапины. Формирование трещин обуславливает скачкообразную локальную релаксацию растягивающих напряжений, приводя к появлению импульсов акустической эмиссии с крутым фронтом (рисунок 3.7). Путем регистрации данных импульсов определена критическая нагрузка разрушения покрытий  $L_{c1}$ , которая возрастает с 5,0 Н у  $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$  до 10,2 Н у  $Ti_{0,31}Al_{0,34}Ta_{0,35}N$ . После этого наблюдается ее снижение до 9,4 Н у покрытий  $Ti_{0,27}Al_{0,28}Ta_{0,45}N$  и снова рост до 10,1 Н у  $Ti_{0,20}Al_{0,15}Ta_{0,65}N$ . Таким образом, зависимость  $L_{c1}$  от  $y$  полностью согласуется с изменениями параметров  $H/E$  и  $H^3/E^2$ . В то же время, критическая нагрузка  $L_{c2}$ , которая соответствует полному скалыванию покрытия внутри царапины и характеризует его адгезионную прочность, иначе зависит от содержания  $Ta$ . Наиболее сильной адгезией обладают покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  и  $Ti_{0,31}Al_{0,34}Ta_{0,35}N$ , у которых наблюдается лишь локальное отслоение небольших фрагментов, то есть  $L_{c2} > 55$  Н. В то же время при  $y \geq 0,45$  имеет место снижение  $L_{c2}$ , так что для покрытия  $Ti_{0,20}Al_{0,15}Ta_{0,65}N$  она оказывается ниже (47,5 Н), чем у  $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$  (48,7 Н). Подобное поведение  $L_{c2}$  связано с падением изгибной жесткости и, как следствие, несущей способности покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  при  $y \geq 0,45$  из-за одновременного уменьшения  $H$  и  $E$ . В результате происходит увеличение глубины проникновения индентора в образец, рост высоты навалов и, как следствие, увеличение кривизны изгиба покрытий.

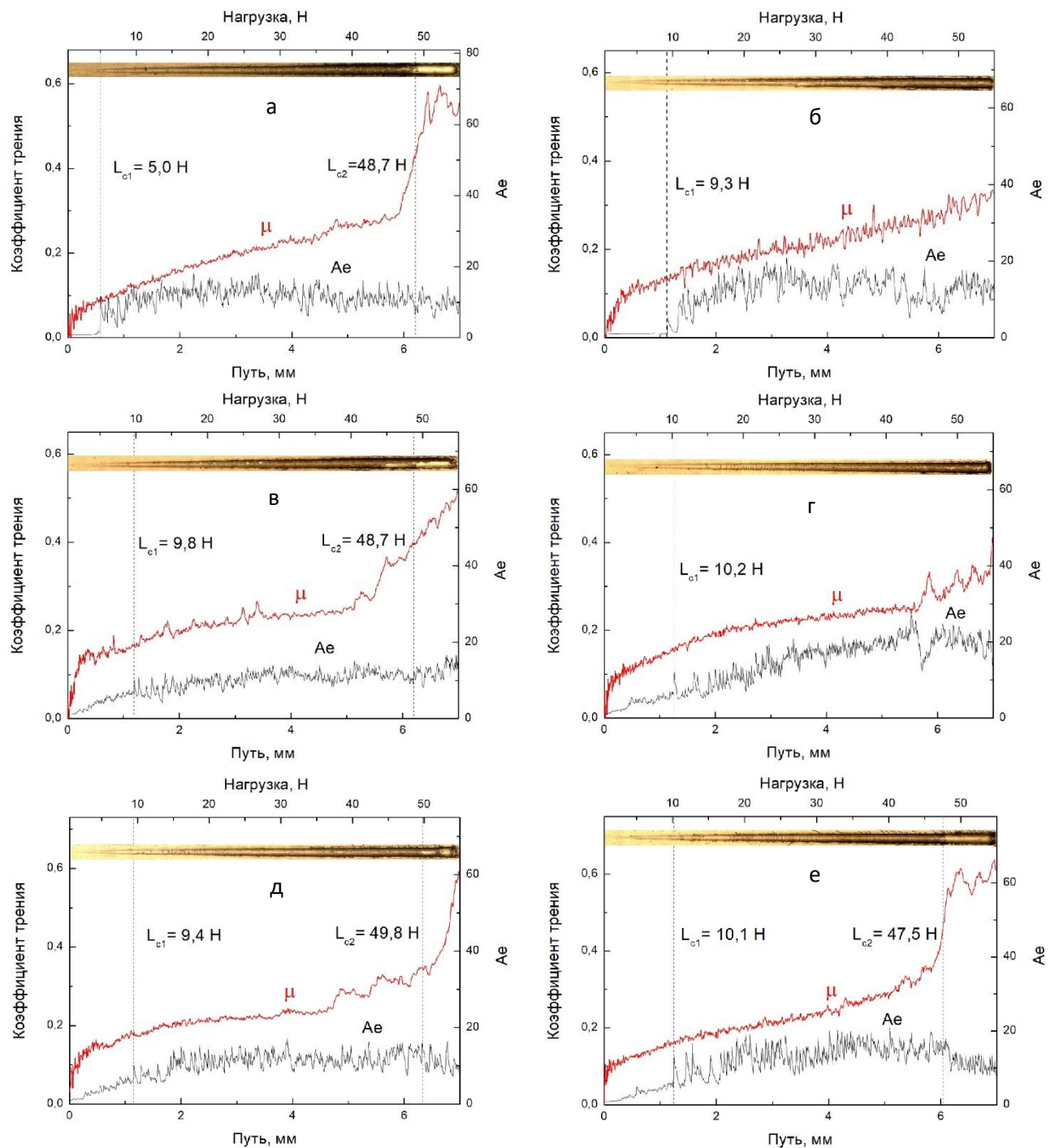


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента трения ( $\mu$ ) и сигнала акустической эмиссии (Ae) от длины царапины на поверхности покрытий  $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$  (а),  $\text{Ti}_{0,41}\text{Al}_{0,49}\text{Ta}_{0,10}\text{N}$  (б),  $\text{Ti}_{0,37}\text{Al}_{0,43}\text{Ta}_{0,20}\text{N}$  (в),  $\text{Ti}_{0,31}\text{Al}_{0,34}\text{Ta}_{0,35}\text{N}$  (г),  $\text{Ti}_{0,27}\text{Al}_{0,28}\text{Ta}_{0,45}\text{N}$  (д) и  $\text{Ti}_{0,20}\text{Al}_{0,15}\text{Ta}_{0,65}\text{N}$  (е), а также соответствующие изображения царапин

### 3.1.4 Трибологические испытания

Учитывая результаты скретч-тестирования, трибологические исследования были выполнены для покрытий с  $y \leq 0,35$ . Установлено, что на начальной стадии испытаний коэффициент трения покрытий ( $\mu$ ) составляет  $\sim 0,15$ , но возрастает через 5-20 м пути трения, достигая стабильных значений в диапазоне 0,45-0,54, типичных для покрытий на основе TiN (рисунок 3.8).

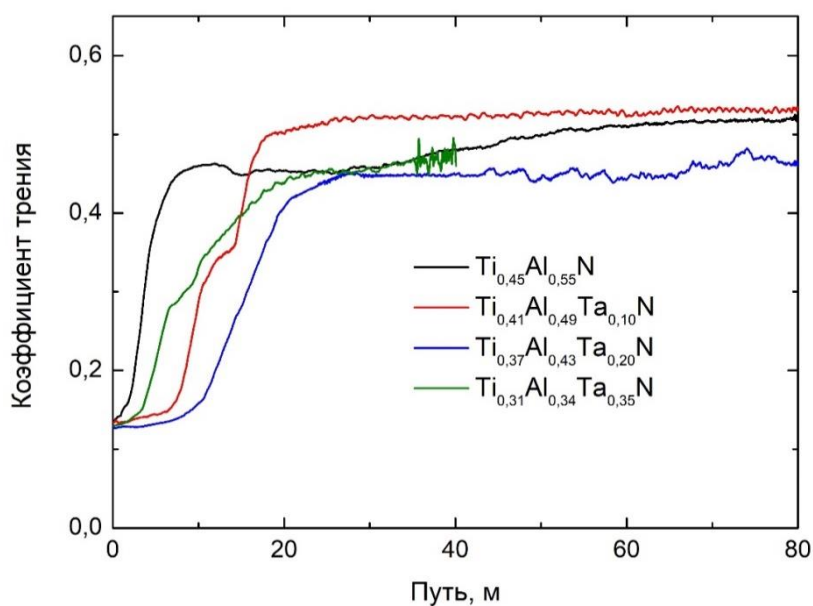


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента трения покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с различным содержанием Ta от длины пройденного пути

Исследование топографии поверхности триботреков показало, что на начальной стадии испытаний, как и при скретч-тестировании, происходят отеснение материала подложки Ti и образование навалов по краям триботрека. При этом остаточная глубина триботрека возрастает с уменьшением  $H$  и  $E$  покрытий. Основным механизмом изнашивания покрытий является абразивное выкрашивание мелких частиц. Интенсивность выкрашивания возрастает с уменьшением  $H$  и  $E$ , что вызвано увеличением площади контакта контртела и покрытия. В процессе испытаний продукты износа окисляются, так что перенесенные на поверхность трека фрагменты состоят исключительно из оксидов Ti, Al и Ta. Поскольку оксидные слои обладают меньшим

коэффициентом трения, чем покрытия, то их формирование является причиной низкого  $\mu$  на начальной стадии испытаний. Последующий рост  $\mu$  обусловлен истиранием данных слоев, которое происходит позднее у покрытий с большим содержанием Ta. При дальнейших испытаниях внутри трека в покрытиях образуются трещины, и происходит скалывание их фрагментов, причем интенсивность растрескивания и скалывания возрастает с повышением  $\mu$  (рисунок 3.9). Появление в области трибологического контакта крупных твердых фрагментов оказывает интенсивное абразивное воздействие. При этом интенсивность износа существенно растет с увеличением содержания Ta (рисунок 3.10). В результате покрытие  $\text{Ti}_{0,31}\text{Al}_{0,34}\text{Ta}_{0,35}\text{N}$  полностью изнашивается после 40 м пути трения (рисунок 3.9г), тогда как наиболее высокой износостойкостью характеризуется покрытие  $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$ .

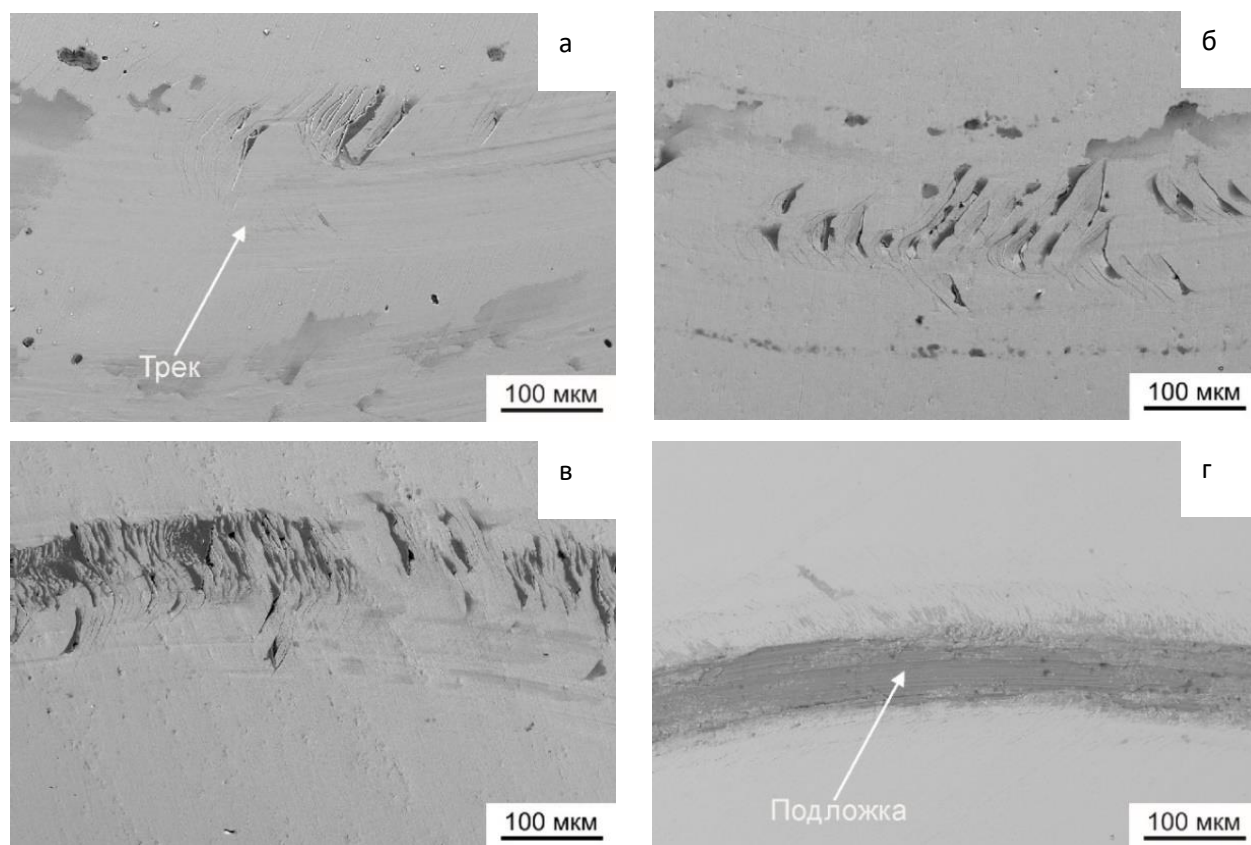


Рисунок 3.9 – СЭМ-изображения дорожек трения на поверхности покрытий  $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$  (а),  $\text{Ti}_{0,41}\text{Al}_{0,49}\text{Ta}_{0,10}\text{N}$  (б),  $\text{Ti}_{0,37}\text{Al}_{0,43}\text{Ta}_{0,20}\text{N}$  (в) и  $\text{Ti}_{0,31}\text{Al}_{0,34}\text{Ta}_{0,35}\text{N}$  (г) после 40 м пройденного пути

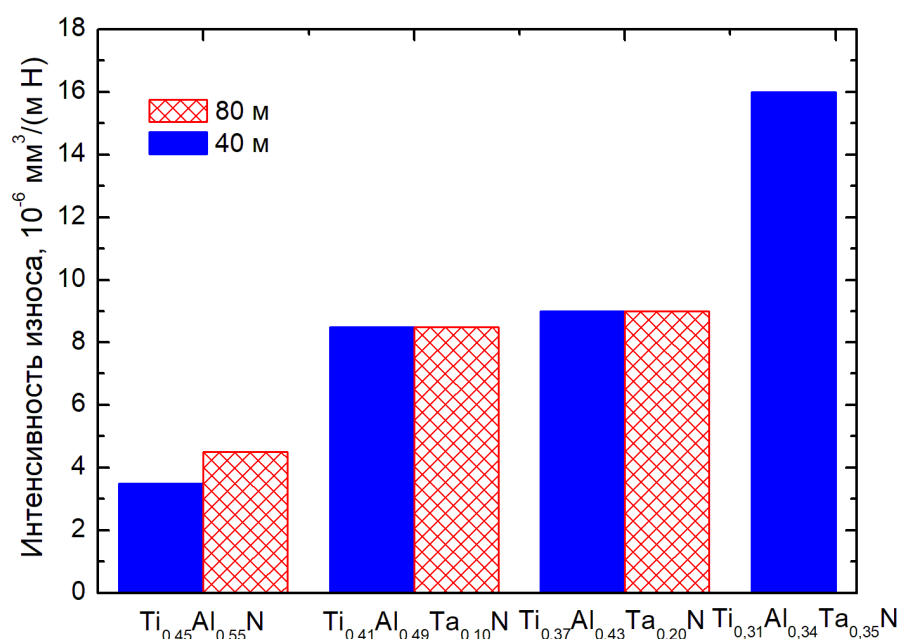


Рисунок 3.10 – Зависимость интенсивности износа покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  от содержания Ta после 40 и 80 м пройденного пути

Анализ результатов трибологических испытаний в сочетании с данными структурных исследований свидетельствует о том, что одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на износостойкость покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , является эволюция их микроструктуры с увеличением содержания Ta. Во-первых, текстура (111), обнаруженная в покрытиях с низким содержанием Ta, в материалах на основе TiN характеризуется большей износостойкостью, чем текстура (200), выявленная у покрытий с  $y > 0,35$ . Во-вторых, формирование d покрытиях с высоким содержанием Ta столбчатых зерен с прямыми ровными границами у вместо V-образной зеренной структуры способствует быстрому распространению усталостных трещин через всю толщину покрытия при циклических нагрузках и, как следствие, отслоению и скалыванию его фрагментов.

## 3.2 Влияние многослойной архитектуры на механические и трибологические характеристики покрытий

### 3.2.1 Фазовый состав и микроструктура многослойных покрытий

Учитывая результаты, описанные в разделе 3.1, для подавления распространения трещин вглубь покрытий на основе системы Ti-Al-Ta-N и, тем самым, для повышения их износостойкости были синтезированы многослойные композиции из чередующихся керамических и металлических слоев (Ti-Al и Ta). Известно, что введение металлических слоев позволяет подавить рост столбчатых зерен через всю толщину покрытия [104]. Для нанесения многослойных композиций были выбраны покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ , которые продемонстрировали наиболее высокую износостойкость. В результате были получены многослойные покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  с различным числом и толщиной слоев.

Анализ картин рентгеновской дифракции (рисунок 3.11) показал, что все керамические слои  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  в многослойных композициях, как и однослойное покрытие, имеют ГЦК структуру типа NaCl B1, то есть представляют собой твердый раствор, в котором Al и Ta частично замещают Ti в кристаллической решетке TiN. Металлические слои в покрытиях  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  демонстрируют дифракционные пики Ta и алюминиды титана с тетрагональной структурой L1<sub>0</sub> соответственно.

Исследование поперечного сечения покрытий методом сканирующей электронной микроскопии продемонстрировало, что все многослойные композиции обладают плотной структурой без видимых дефектов (рисунок 3.12).

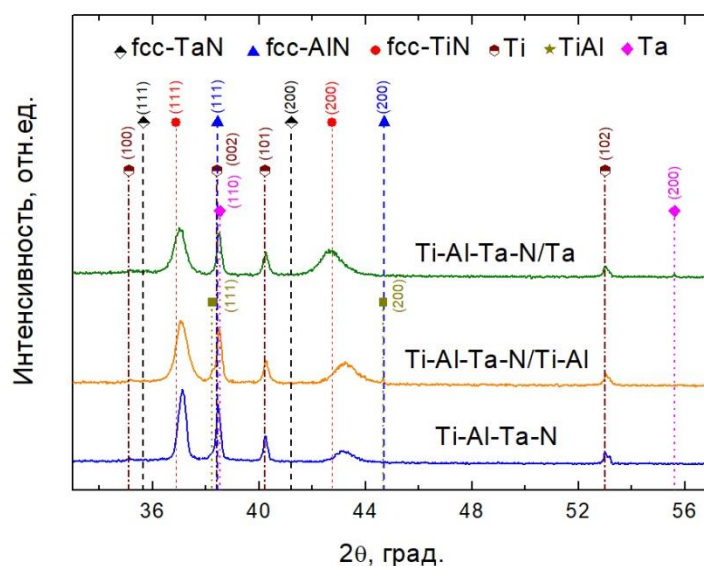


Рисунок 3.11 – Дифрактограммы покрытий на основе системы  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$

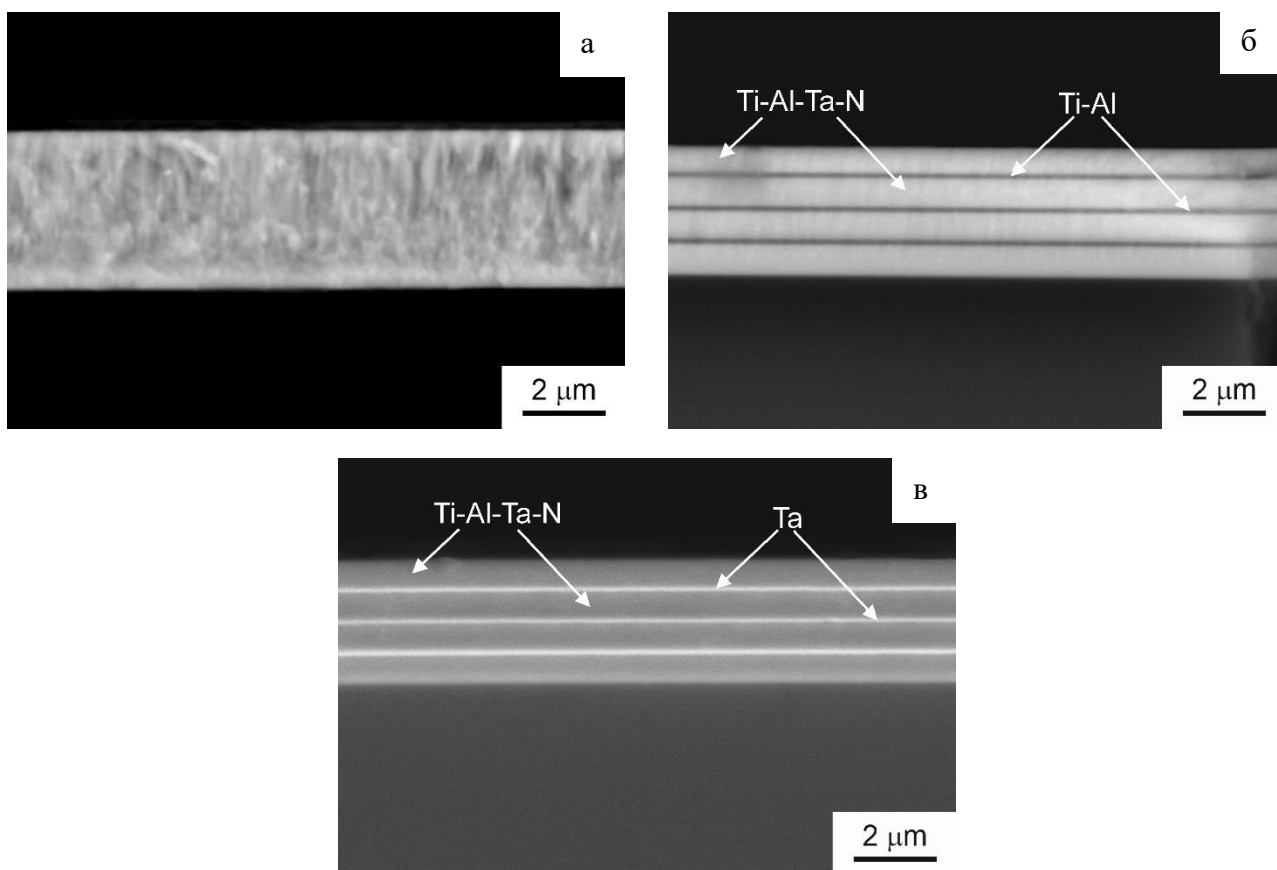


Рисунок 3.12 – СЭМ-изображения поперечного сечения покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  (а),  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  (б) и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  (в)

Исследование внутренней микроструктуры многослойных покрытий методом ПЭМ показало, что слои  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  обладают выраженной

столбчатой зеренной структурой. При этом чередование слоев эффективно подавляет рост столбчатых зерен через всю толщину покрытия (рисунок 3.13). В каждом новом слое  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  на границе с нижележащим металлическим слоем происходит образование зародышей и рост новых зерен, что способствует уменьшению их поперечного размера по сравнению с однослойным покрытием  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  с 200-300 нм до 50-80 нм.

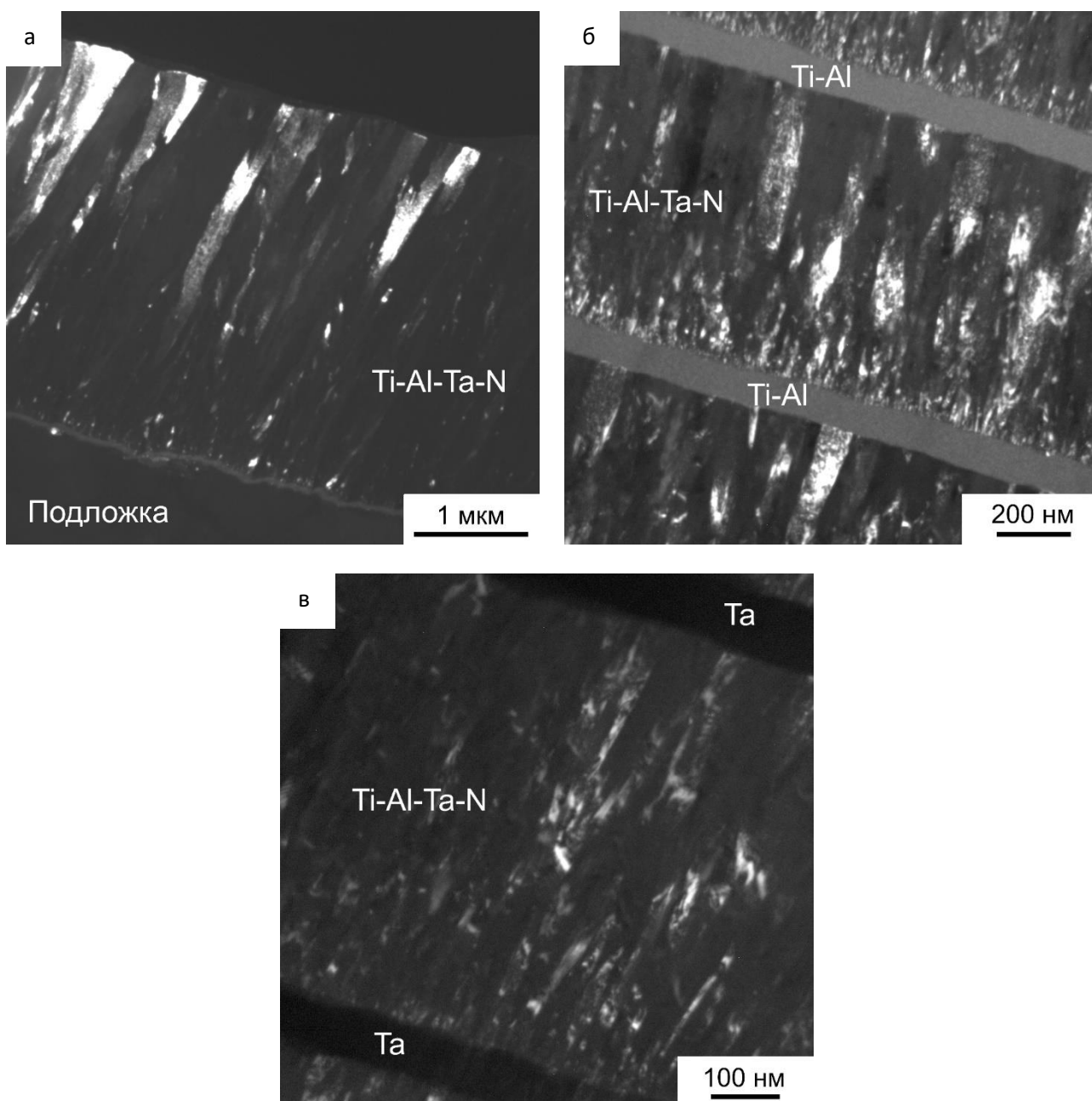


Рисунок 3.13 – Темнопольные ПЭМ-изображения поперечного сечения покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  (а),  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  (б) и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  (в).



### 3.2.2 Механические характеристики

Исследование механических характеристик семислойных покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  (4/3) методом наноиндентирования показало, что уменьшение отношения толщин керамических и металлических слоев с 7 (0,7 мкм/0,1 мкм) до 3 (0,6 мкм/0,2 мкм) привело к снижению твердости и модуля Юнга покрытий с 27,6 и 306 ГПа до 26,0 и 301 ГПа соответственно (Таблица 3.1). Еще более значительное падение механических характеристик произошло при увеличении количества слоев в данных покрытиях с 7 до 15. Несмотря на то, что при этом отношение толщин керамических и металлических слоев осталось равным 3 (0,3/0,1 мкм),  $H$  и  $E$  снизились до 18,9 и 256 ГПа соответственно. Аналогичный эффект наблюдался при уменьшении отношения толщин керамических и металлических слоев и общего количества слоев в покрытиях  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$ . Твердость и модуль Юнга покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  снизились с 28,5 и 311 ГПа у семислойных композиций с толщиной слоев 0,7/0,1 мкм до 21,3 и 248 ГПа у покрытий с 15 слоями толщиной 0,3/0,1 мкм. Таким образом, твердость и модуль Юнга всех многослойных покрытий оказались меньше, чем у однослойного покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  (30,0 и 346 ГПа). Это обусловлено вкладом металлических слоев, обладающих существенно более низкими  $H$  и  $E$ , в механический отклик покрытий, а также падением несущей способности и изгибной жесткости последних с уменьшением толщины керамических слоев. Наряду с падением твердости и модуля Юнга, уменьшение толщины керамических слоев в многослойных покрытиях  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  привело к существенному снижению величины отношений  $H/E$  и  $H^3/E^2$  (Таблица 3.1).

На основании анализа результатов измерения механических характеристик для дальнейших исследований были выбраны семислойные композиции  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  с толщиной слоев 0,7/0,1 мкм.

Таблица 3.1 – Количество и толщина слоев, общая толщина и механические характеристики покрытий на основе системы  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$

Покрытие	Количество слоев	Толщина слоев, мкм	Толщина покрытия, мкм	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа	$H/E$	$H^3/E^2$ , ГПа
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$	1	3,0	3,0	$30,0 \pm 2,5$	$346 \pm 11$	0,087	0,226
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/$ $Ti_{0,45}Al_{0,55}$	4/3	0,7/0,1	3,1	$27,6 \pm 2,8$	$306 \pm 12$	0,090	0,225
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/$ $Ti_{0,45}Al_{0,55}$	4/3	0,6/0,2	3,0	$26,0 \pm 3,1$	$301 \pm 14$	0,086	0,194
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/$ $Ti_{0,45}Al_{0,55}$	8/7	0,3/0,1	3,1	$18,9 \pm 2,8$	$256 \pm 9$	0,074	0,103
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$	4/3	0,7/0,1	3,1	$28,5 \pm 2,1$	$311 \pm 12$	0,092	0,239
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$	4/3	0,6/0,2	3,0	$27,5 \pm 2,6$	$303 \pm 9$	0,091	0,227
$Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$	8/7	0,3/0,1	3,1	$21,3 \pm 2,4$	$248 \pm 7$	0,086	0,157

Методом измерения кривизны прогиба подложки были определены остаточные внутренние напряжения, развивающиеся в покрытиях в процессе их осаждения. Установлено, что во всех многослойных композициях возникают сжимающие напряжения, при этом их величина снижается по сравнению с однослойным покрытием  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ , у которого они составляют 3 ГПа. При этом покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti-Al$  и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  характеризуются близкими значениями остаточных напряжений (1,9 и 2,1 ГПа соответственно).

### 3.2.3 Скретч-тестирование

Анализ результатов скретч-тестирования многослойных покрытий на основе системы  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  показал, что, как и в случае однослойных покрытий, пластическое отеснение материала мягкой подложки  $Ti$ , сопровождающееся когерентным упругим изгибом покрытий, привело к

возникновению зон сильной локальной кривизны в вершинах навалов перед индентором и по краям царапины. Разрушение всех исследованных покрытий началось с образования трещин в областях их максимального изгиба, в вершинах навалов, расположенных вдоль краев царапины (рисунок 3.14а). При увеличении нагрузки на этих же участках образовались трещины, расположенные под углом к царапинам, а затем поперечные трещины внутри царапин. При дальнейшем нагружении имело место локальное скалывание фрагментов покрытий вдоль краев царапины. Необходимо отметить, что локальное скалывание многослойных покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  преимущественно происходило посредством их расслоения из-за отклонения трещин на границах раздела между слоями (рисунок 3.14б). В результате площадь обнажившейся поверхности подложки была существенно меньше общей площади участков скола покрытия. Таким образом, наличие границ раздела между слоями в многослойных покрытиях обеспечило дополнительную диссипацию энергии за счет отклонения трещин и способствовало повышению их трещиностойкости и адгезионной прочности.

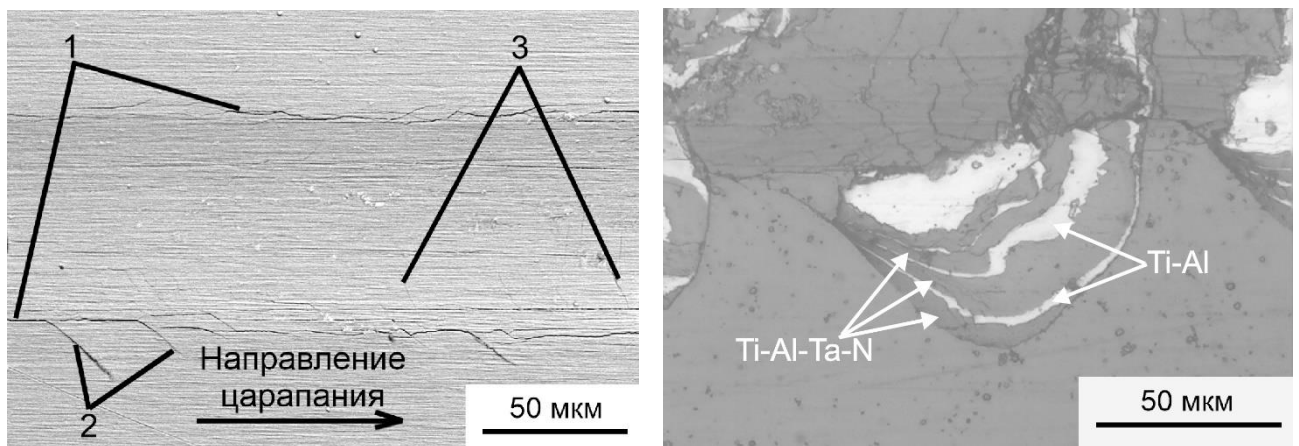


Рисунок 3.14 – СЭМ-изображения растрескивания (а) и локального скалывания (б) покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  при скретч-тестировании. Цифрами отмечены различные виды трещин: 1 – трещины вдоль краев царапины, 2 – трещины, расположенные по краям царапины под углом к ней, 3 – поперечные трещины.

Установлено, что во всех многослойных композициях величина  $L_{c1}$  была меньше, чем в однослойном покрытии  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  (рисунок 3.15). Основной причиной этого является большая глубина проникновения индентора в многослойные покрытия, обусловленная их меньшей несущей способностью и изгибной жесткостью. Кроме того, более низкие остаточные сжимающие напряжения в многослойных покрытиях способствовали достижению предела их прочности при меньшей изгибной деформации. В то же время, необходимо также отметить, что нагрузка  $L_{c1}$  у покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  (8,9 Н) оказалась лишь незначительно меньше величины, определенной для однослойного покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  (9,1 Н).

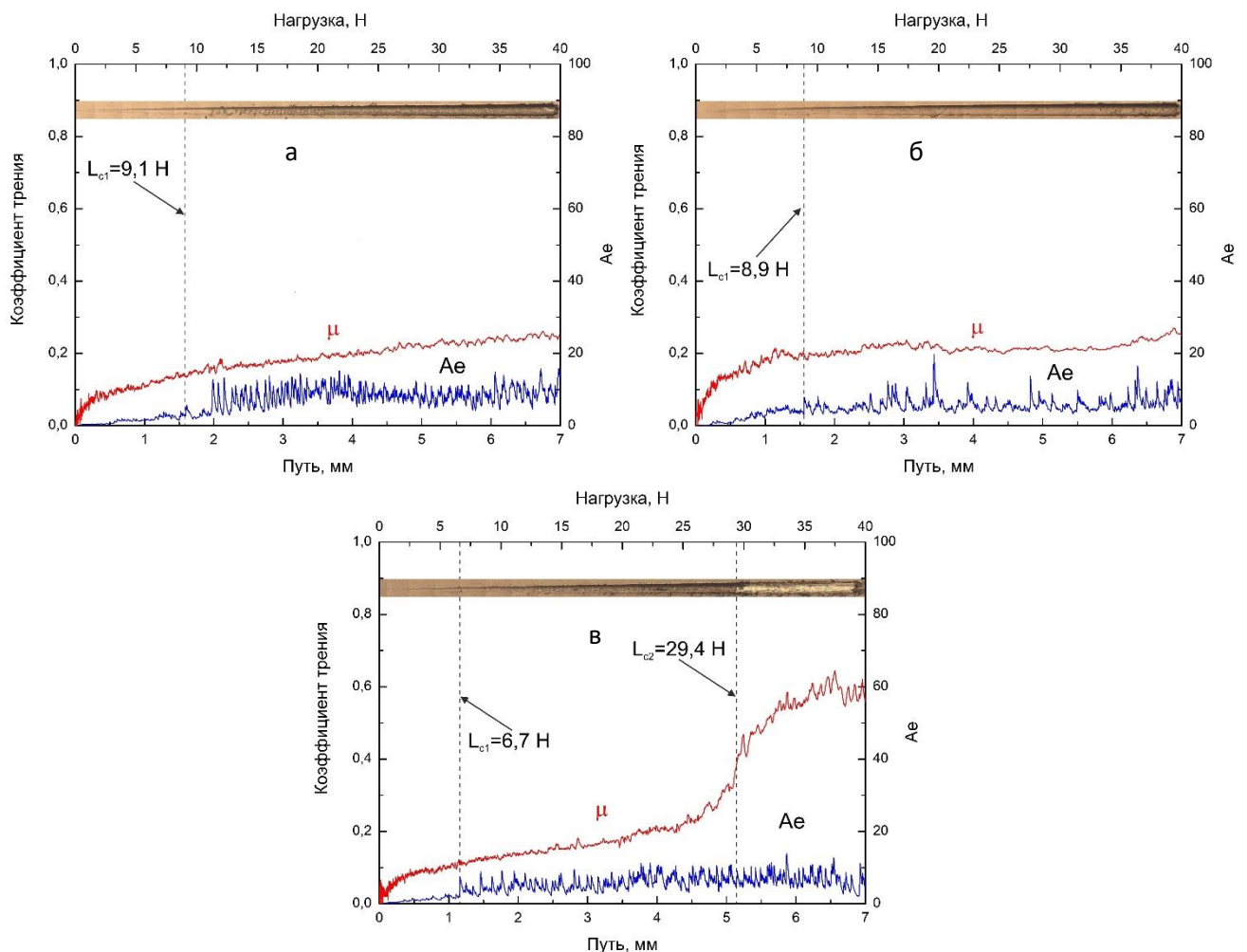


Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициента трения ( $\mu$ ) и сигнала акустической эмиссии (Ae) от длины царапины на поверхности покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  (а),  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  (б) и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  (в), а также соответствующие изображения царапин

Полное разрушение покрытия внутри царапины наблюдалось в исследованном диапазоне приложенных нагрузок только у покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$ , у которого критическая нагрузка  $L_{c2}$  составила 29,4 Н. В то же время полного разрушения однослойного покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  и многослойного  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  не наблюдалось до конца испытаний.

### 3.2.4 Трибологические испытания

Анализ результатов трибологических испытаний многослойных покрытий на основе  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  в условиях сухого трения показал, что на стадии приработки коэффициент трения всех образцов быстро увеличивался, достигая на стадии установившегося изнашивания стабильных значений в диапазоне 0,40-0,45 (рисунок 3.16). Как и в случае однослойных покрытий, основным механизмом изнашивания всех покрытий являлось их абразивное выкрашивание. Частицы износа переносились вдоль дорожек трения, размазывались по их поверхности и окислялись, приводя к формированию фрагментированных слоев переноса, состоящих из оксидов Ti, Al и Ta (рисунок 3.17). В процессе дальнейших испытаний циклические нагрузки привели к образованию в покрытиях трещин и скалыванию их фрагментов. При этом, как и при скретч-тестировании, скалывание многослойных композиций сопровождалось разрушением за счет отклонения трещин вдоль границ раздела между слоями (рисунок 3.18), что способствовало повышению их износостойкости по сравнению с однослойным покрытием (рисунок 3.19). Наиболее износостойкими оказались покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$ , у которых интенсивность изнашивания составила  $5,4 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(м Н), что примерно на 40 % меньше, чем у покрытия  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ .

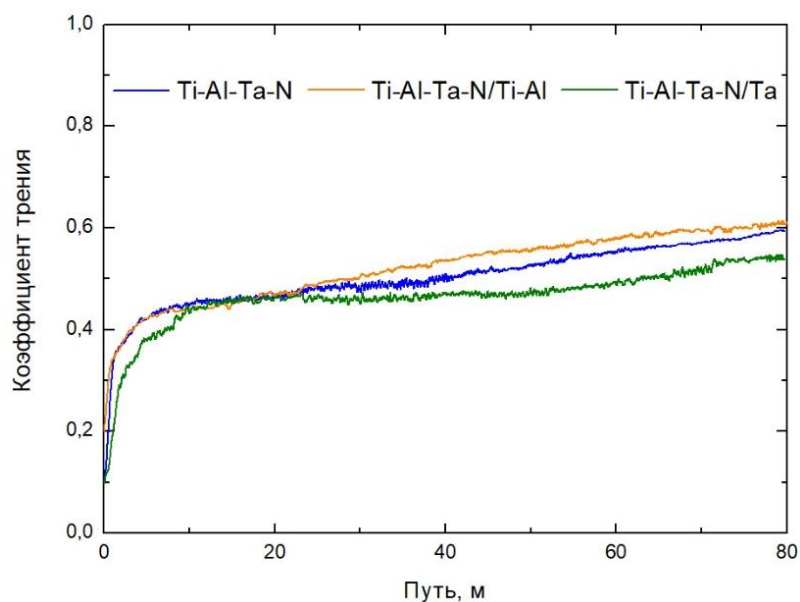


Рисунок 3.16 – Зависимость коэффициента трения покрытий на основе системы  $\text{Ti}_{0,41}\text{Al}_{0,49}\text{Ta}_{0,10}\text{N}$  от длины пройденного пути

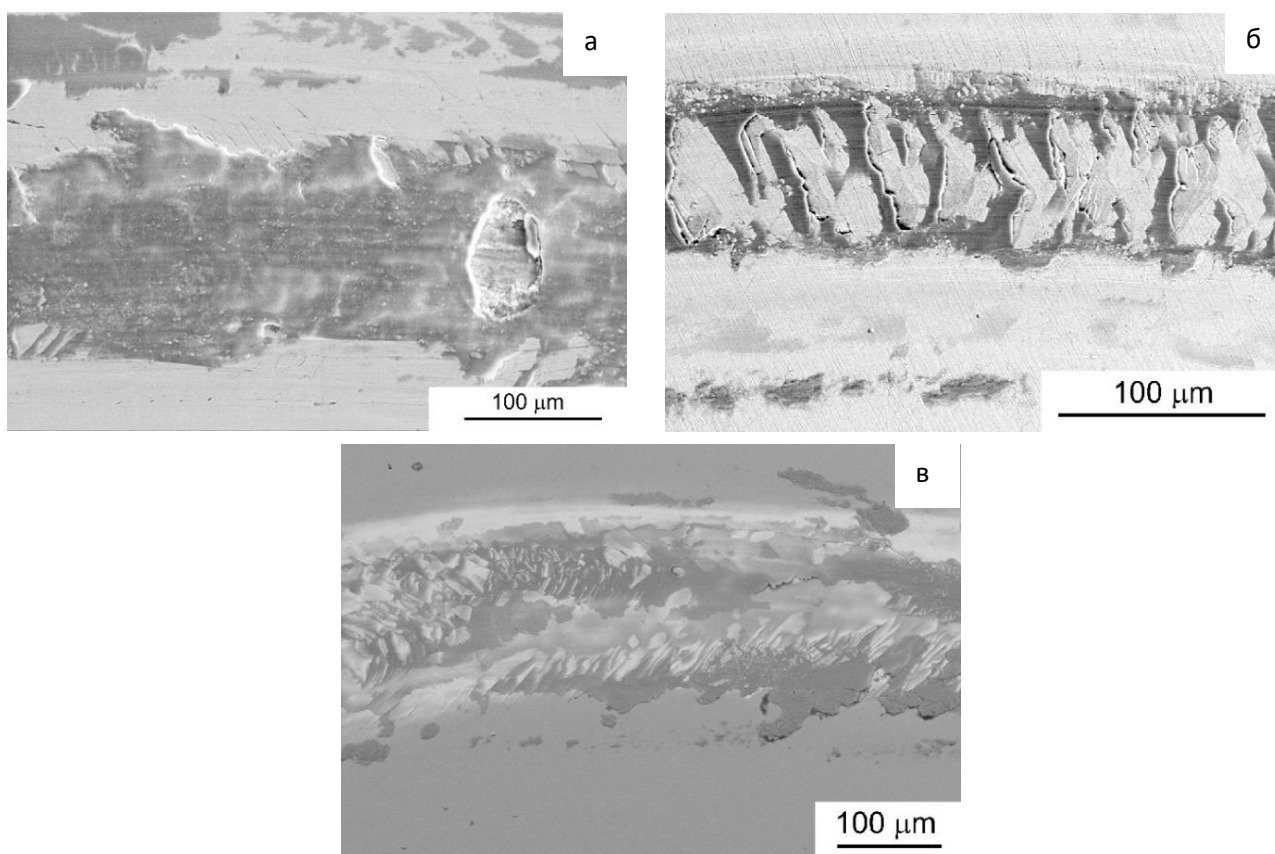


Рисунок 3.17 – СЭМ-изображения дорожек трения на поверхности покрытий  $\text{Ti}_{0,41}\text{Al}_{0,49}\text{Ta}_{0,10}\text{N}$  (а),  $\text{Ti}_{0,41}\text{Al}_{0,49}\text{Ta}_{0,10}\text{N}/\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}$  (б) и  $\text{Ti}_{0,41}\text{Al}_{0,49}\text{Ta}_{0,10}\text{N}/\text{Ta}$  (в) после 40 м пройденного пути.

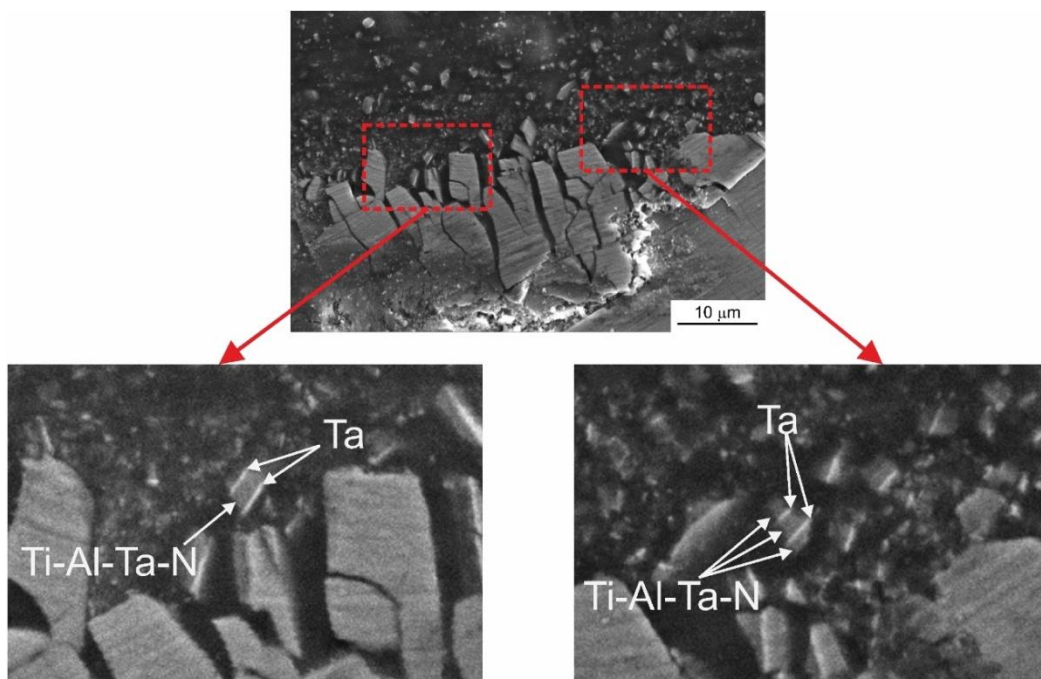


Рисунок 3.18 – СЭМ-изображения разрушения покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  при испытаниях на износ

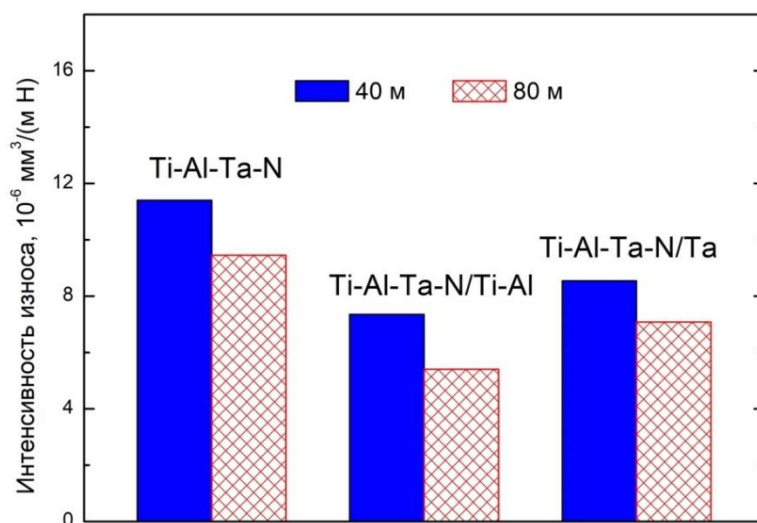


Рисунок 3.19 – Интенсивность износа покрытий на основе  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$  после 40 и 80 м пройденного пути

## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целесообразность выполнения тех или иных исследований в современном мире определяется коммерческой ценностью работы - ее финансовой выгодностью. Оценка коммерческой ценности (потенциала) исследований является обязательным условием в поиске источников финансирования для проведения научной работы и коммерциализации ее результатов. Это представляет важность для исследовательских организаций, которые должны оценить перспективы проводимых научных исследований. Благодаря такой оценке учёный может рассматривать поиски партнеров для дальнейшего проведения научного исследования, планировать коммерциализацию результатов своих результатов и запуск собственного производства.

Целью данного раздела является экономическое планирование и оценка ресурсоэффективности исследования влияния на механические и трибологические характеристики защитных покрытий на основе Ti-Al-Ta-N различного содержания Ta и многослойной архитектуры. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать конкурентные технические решения проекта;
- провести SWOT - анализ;
- выполнить планирование и организацию научного исследования;
- создать диаграмму или график Гантта;
- определить бюджет научного проекта;
- определить ресурсоэффективность проекта.



## 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

### 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения (таблица 4.1). Разработка 1 – покрытие Ti-Al-Ta-N. Конкурирующими материалами выбраны: Разработка 2 – покрытие Ti-Al-Cr-N; Разработка 3 – покрытие Ti-Al-Si-N. Расчет конкурентоспособности проводится по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $\text{Б}_i$  – балл показателя.

Таблица 4.1 – Оценочная карта сравнения конкурентных разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкрентоспособность		
		1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Механические характеристики	0,19	4	4	5	0,76	0,76	0,95
2. Трибологические характеристики	0,21	5	5	3	1,05	1,05	0,63
3. Окислительные свойства	0,18	5	3	4	0,9	0,54	0,72
4. Сложность получения покрытий	0,13	5	4	3	0,65	0,52	0,39
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	4	3	4	0,16	0,12	0,16
3. Цена	0,07	3	4	5	0,21	0,28	0,35
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	4	4	0,4	0,32	0,32
5. Финансирование научной разработки	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
Итого	1				4,58	4,04	3,92

Таким образом, конкурентоспособность научной разработки составила 4,58, в то время как у конкурентов 4,04 и 3,92, соответственно. Результаты показывают, что данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной и имеет полное преимущество по трибологическим и окислительным характеристикам, а также по сложности синтеза данных покрытий.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта (таблицы 4.2-4.6).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: S1. Универсальность технологии S2. Высокое качество покрытий S3. Актуальность тематики исследования	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: W1. Использование устаревшего оборудования для исследований W2. Высокая сложность повторяемости состава W3. Относительно высокая стоимость расходных материалов
Возможности: O1. Расширение технической базы ИФПМ СО РАН Томск O2. Использовать материально-техническую базу российских и зарубежных университетов.	O2S2S3. Высокое качество изготавливаемых и исследуемых покрытий актуальных на сегодняшний день позволяет организовать сотрудничество с привлечением дополнительного финансирования института.	O1W1W3. Устаревшее оборудование и высокая стоимость расходных материалов не позволяет перенаправлять средства на развитие и расширение технической базы. O2W1W2. Низкий уровень технического обеспечения и сложности в синтезе покрытий являются барьером для эффективного сотрудничества.
Угрозы: T1. Отсутствие спроса на результаты исследования T2. Несвоевременное финансирование	T1S1S2. Универсальность технологии и высокое качество покрытий делает результаты исследования востребованными	T1W1. Применение устаревшего оборудования может поставить под сомнение качество результатов исследования T2W2W3. Высокие траты на отработку режимов и расходные

научного исследования при дальнейшем развитии проекта. Т3. Развитая конкуренция среди научных групп с аналогичной тематикой	T2S3 исследований возможность финансирование грантовой основе	Актуальность дает получить на	материалы в совокупности с несвоевременным финансированием тормозят исследование вплоть до полной остановки Т3W1. Более современное оборудование позволяет ускорить процесс исследования и получение результатов
---	---	--	--

Таблица 4.3 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3
O1	-	-	-
O2	-	+	+

Таблица 4.4 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2	W3
O1	+	-	+
O2	+	+	-

Таблица 4.5 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3
T1	+	+	-
T2	-	-	+
T3			

Таблица 4.6 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W3
T1	+	-	-
T2	-	+	+
T3	+	-	-

Таким образом, проведенный SWOT-анализ показал, что на данном этапе технология исследования не лишена недостатков. Тем не менее, данные недостатки легко устраняемы, путем внедрения новых методов исследования.

Несомненно, что на мировом рынке достоинства данной разработки должны быть оценены на высоком уровне.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения исследовательского проекта формируется рабочая (научная) группа, в состав которой могут входить инженеры, техники, научные, сотрудники, преподаватели и лаборанты, численность группы может варьироваться. Каждый исполнитель получает соответствующую должность исходя из запланированных работ. Для дальнейшей оценки экономической эффективности составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и распределение исполнителей по видам работ (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Этапы и работы научного исследования

Этапы работы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания – постановка цели, определение задач	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	2	Изучение литературы по теме работы	Инженер
	3	Нанесение покрытий	Инженер
	4	Структурные, морфологические, механические и трибологические испытания покрытий	Руководитель, Инженер
Оценка результатов	5	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, Инженер
	6	Составление диссертационной работы	Инженер

## 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта. Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости  $t_{ож\ i}$  определяется по формуле:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5}$$

где  $t_{min\ i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;  $t_{max\ i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн. На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ :

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i},$$

где  $Ч_i$  – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел. По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.8.

## 4.2.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи. Для построения

графика Гантта длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней переводились в календарные дни по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $k_{\text{кал}}$  – календарный коэффициент.

Для каждого исполнителя расчеты производились индивидуально. Календарный коэффициент определялся по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

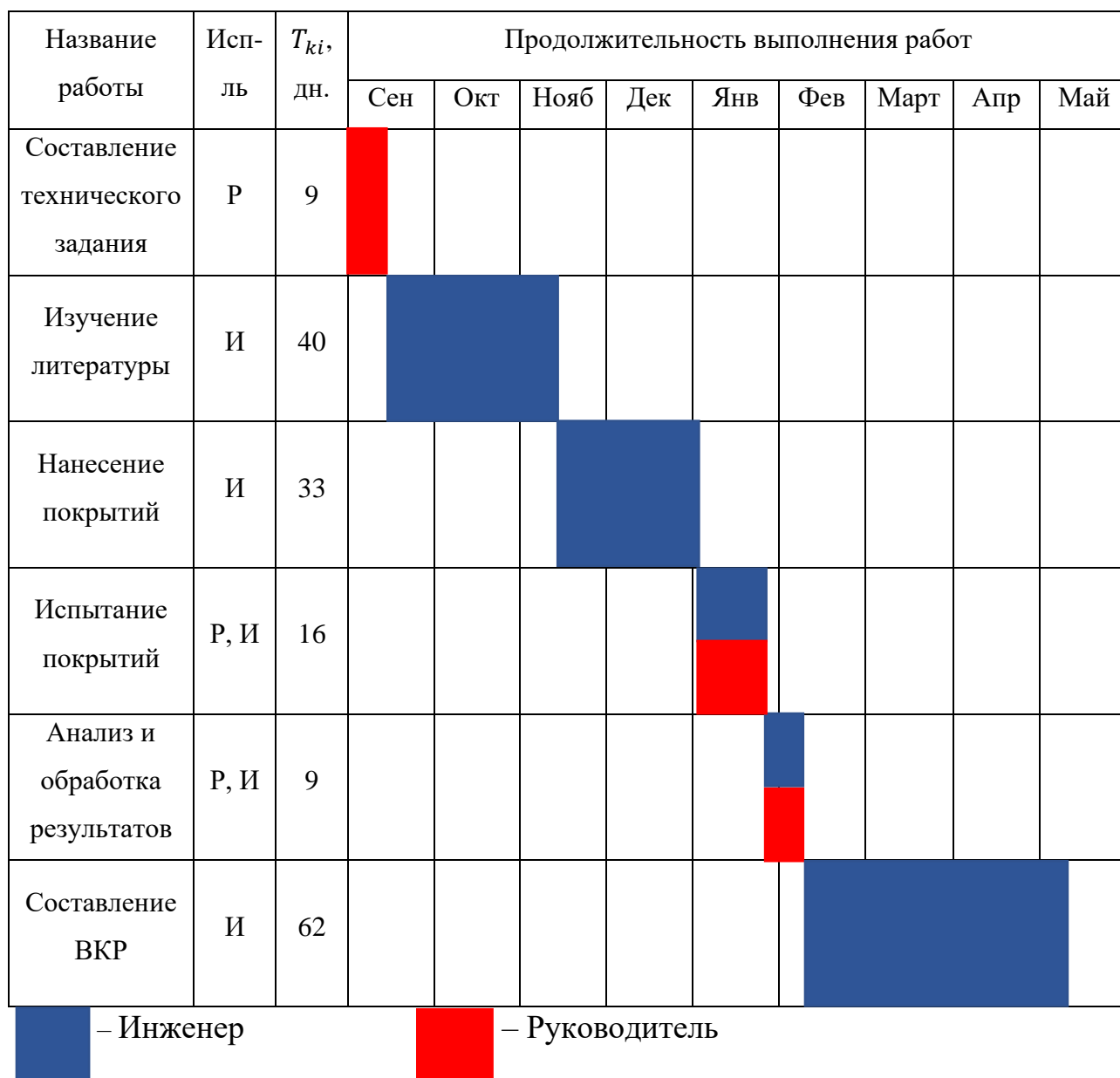
где  $T_{\text{кал}}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – общее количество праздничных дней в году.

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Для планирования НИР была выбрана диаграмма Гантта (таблица 4.9), для построения которой определялась длительность каждого из этапов работы.

Таблица 4.8 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Исполнитель	Трудоемкость			Длительность в рабочих днях, $T_{pi}$	Длительность в календарных днях, $T_{ki}$
		$t_{min}$ , чел-дни	$t_{max}$ , чел-дни	$t_{ож\ i}$ , чел-дни		
Составление и утверждение технического задания	Руководитель	5	7	5,8	5,8	9
Изучение литературы	Инженер	30	60	27	27	40
Нанесение покрытий	Инженер	20	30	22	22	33
Структурные, морфологические, механические и трибологические испытания покрытий	Руководитель, Инженер	20	30	22	11	16
Анализ и обработка результатов	Руководитель, Инженер	25	30	12	6	9
Составление диссертационной работы	Инженер	40	45	42	42	62

Таблица 4.9 – Диаграмма Гантта



В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

### 4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

#### 4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме (таблица 4.10). Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода. Также в стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (5 % от цены). Материальные затраты в данном исследовании составили 26498 руб.

Таблица 4.10 – Материальные затраты

Наименование	Единицы измерения	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Лист титана BT1-0	м <sup>2</sup>	840	0,9	756
Баллон Ar	Шт.	680	1	680
Баллон N	Шт.	470	1	470
Мишень Ti/Al	Шт.	8330	1	8330
Мишень Ta	Шт.	15000	1	15000
Транспортно-заготовительные расходы				1262
Итого				26498



### 4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме. Норма амортизации рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет. Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot t,$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $t$  – время использования, мес. Результаты расчетов представлены в таблице 4.11. Общие амортизационные расходы составили 25333 руб.

Таблица 4.11 – Амортизационные расходы

Наименование оборудования	$I$ , руб.	$n$ , лет	$H_A$ , %	$t$ , мес	$A$
Персональный компьютер	60000	5	20	2	2000
Установка МИР-1М	1400000	10	10	2	23333
Итого:					25333

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей исследования

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада. Основная заработная плата одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d},$$

где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные и праздничные дни)	118	118
Отпуск	24	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{\text{тс}}$ );  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Основная заработная плата работников

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$ , руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_d$	$k_p$	$Z_M$ , руб.	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	49150	0,3	0,2	1,3	95843	4728	33	156013
Инженер	12140	0,3	0,2	1,3	23673	1168	91	106263
Итого $Z_{\text{осн}}$								262276

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей исследования

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.,  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}},$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15). Расчет дополнительной заработной платы приведен в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Дополнительная заработная плата исполнителей исследования

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб.	156013	106263
Дополнительная зарплата, руб.	23402	15940
Суммарная зарплата, руб.	179415	122203
Итого, руб.	301617	

#### 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды (таблица 4.15) определяется по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2021 году – 30,2% (ст. 425, 426 НК РФ).

Таблица 4.15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Суммарная зарплата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды
Руководитель	179415	53824
Исполнитель	122203	36661
Итого:		90485

#### 4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = \text{сумма статей} \cdot k_{\text{нр}}$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = (25333 + 262276 + 26498 + 301617 + 90485) \cdot 0,16 = 112993 \text{ руб.}$$

#### 4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы по теме: «Исследование влияния содержания Ta и многослойной архитектуры покрытий на основе системы Ti-Al-Ta-N на их механические и трибологические свойства», является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Рассчитанный бюджет затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	26498
2. Амортизация оборудования	25333
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей исследования	262276
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей исследования	301617
5. Отчисления во внебюджетные фонды	90485
6. Накладные расходы	112993
Бюджет затрат НТИ	819202

Таким образом, бюджет исследования, включающий в себя материальные затраты, амортизационные расходы, затраты на основную и дополнительную заработную плату, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы составил 819202 рублей. Самыми затратными статьями расходов являются заработная плата, как основная, так и дополнительная, а также накладные расходы.

#### 4.4 Определение ресурсной эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения. В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайšie аналоги магнетронного распыления ( $\Phi_{p1} = 820000$ ), электролитический метод осаждения пленок ( $\Phi_{p2} = 560000$ ) и дуговое испарение ( $\Phi_{p3} = 710000$ ). Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{624008}{624008} = 1;$$

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{420000}{624008} = 0,68;$$

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{540000}{624008} = 0,87;$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля). Таким образом, выбор электролитического или дугового методов осаждения покрытий позволил бы снизить стоимость разработки на ~ 32% и ~ 13% соответственно

Интегральный показатель ресурсоэффективности. Оценка ресурсоэффективности проекта определялась посредством расчета интегрального критерия по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент проекта;  $b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания. путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.17

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерий	Весовой коэффициент	Магнетронное распыление	Электролитический метод	Дуговое испарение
Чистота покрытий	0,25	5	3	3
Скорость осаждения	0,15	5	5	5
Адгезионная прочность	0,15	5	3	4
Коррозионная стойкость	0,2	5	4	4
Безопасность использования	0,13	4	4	4
Надежность	0,12	4	3	3
Итого:	1	4,55	3,63	3,78

Видно, что магнетронное распыление является более выгодным методом нанесения относительно выбранных критериев.

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп 1}} = \frac{I_{\text{р исп 1}}}{I_{\text{фин.р}}} = 4,55.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (таблица 4.18). Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ ):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп 1}}}{I_{\text{исп 2}}} = 0,84.$$

Таблица 4.18 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

Показатели	Исполнение 1	Исполнение 2	Исполнение 3
Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,68	0,87
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,55	3,63	3,78
Интегральный показатель эффективности	4,55	5,34	4,34
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,85	1,05

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Анализ конкурентных решений проекта показал, что такие возможные аналоги, как Ti-Al-Cr-N и Ti-Al-Si-N имеют более низкие показатели конкурентоспособности (4,04 и 3,92 соответственно), чем исследуемое покрытие Ti-Al-Ta-N (4,58). Таким образом, данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной и имеет преимущество по трибологическим и окислительным характеристикам.

2. В результате SWOT – анализа были выявлены сильные и слабые стороны исследования, а также угрозы и возможности последнего. Показано, что не смотря на имеющиеся недостатки и явные угрозы, в виде устаревшего оборудования и слабого финансирования, исследование характеризуется огромным потенциалом и существенными преимуществами, среди которых актуальность тематики исследования и высокое качество покрытий. Возможности данной разработки включают в себя расширение технической базы ИФПМ СО РАН, а также использование материально-технической базы российских и зарубежных университетов.

3. В ходе планирования научно-исследовательских работ определены структура и перечень работ, выполняемых рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель и инженер. Согласно составленному плану работ длительность трудовой занятости сотрудников научно-исследовательского проекта составила 169 календарных дней. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, построенный на основе диаграммы Ганта.

4. В работе был определен бюджет научного исследования. В ходе расчетов было выявлено, что материальные и амортизационные затраты составили соответственно 26498 и 25333 рублей. Заработная плата исполнителей складывается из основной и дополнительной, составившие 262276 и 301617 рублей соответственно. Отчисления во внебюджетные фонды, принятые как 30,2% от заработной платы составили 90485 рублей. Накладные расходы в



размере 16% от остальных расходов равны 112993 рублей. Таким образом бюджет затрат научно-технического исследования составил 819202 рублей.

5. Ресурсоэффективность проекта определялась с помощью интегральных показателей в сравнении с такими методами осаждения покрытий как электролитическое и дуговое осаждение. В результате было показано, что наиболее выгодным методом нанесения покрытий является дуговое осаждение. В то же время, метод магнетронного распыления позволяет получать более качественные покрытия с лучшими характеристиками по сравнению с другими методами.

## **Глава 5. Социальная ответственность**

Настоящая магистерская диссертация посвящена исследованию износостойких покрытий на основе системы Ti-Al-Ta-N нанесенных при помощи установки магнетронного распыления. Исследование предполагает работу с высоким напряжением и различными газами. Объектом исследования являются защитные покрытия, а предметом их механические и трибологические характеристики. Покрытия были получены методом реактивного магнетронного распыления на установке МИР-1М в кабинете №102, 3 корпуса ИФПМ СО РАН.

Рабочее место оператора МИР-1М позволяет человеку в полной мере осуществлять рабочие движения и перемещения при эксплуатации и техническом обслуживании оборудования. Прибор соответствует функциональным требованиям и предполагаемым условиям эксплуатации. На рабочем месте присутствует необходимое естественное и искусственное освещение. Основные органы управления размещены в оптимальном рабочем пространстве, где обеспечены наилучшие условия для ручного управления и контроля. Аварийные и ответственные органы управления размещены в оптимальной зоне досягаемости руки. Рабочее место оператора обеспечивает оптимальные условия проявления психических и физиологических функций оператора, т. о. в таких условиях достигается максимальная эффективность, точность и надёжность деятельности при минимальных энергетических затратах

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

К работе на установке магнетронного распыления МИР-1М допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте [105]. К самостоятельной работе допускаются работники после

получения II группы электробезопасности и допуска к работе с газовыми баллонами, работающими под давлением [106]. Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, а также правил безопасной работы с газовыми баллонами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца [107].

Для работы на установке МИР-1М должны выполняться следующие требования [108]:

- Отсутствие затруднения выполнения трудовых действий работающим со стороны конструктивных частей установки, предназначенных для устранения или снижения уровней опасных и вредных производственных факторов до допустимых значений;
- Конструкция установки должна обеспечивать высокую эффективности функционирования системы "человек - производственное оборудование", а также такие физические нагрузки на работающего, при которых энергозатраты организма в течение рабочей смены не превышали бы 1046,7 кДж/ч (250 ккал/ч);

### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. Все необходимое для выполнения работ должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

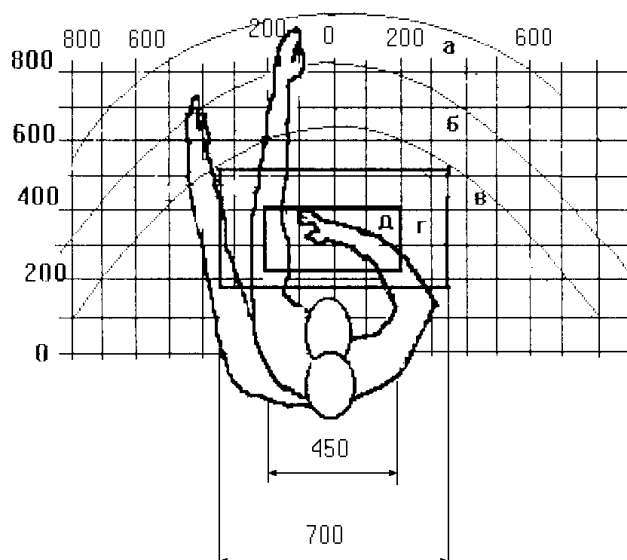


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм [108]. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной — не менее 500 мм, глубиной на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья [109]. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглубленным передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм [110]. Согласно нормам, угол наблюдения в

горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране. Также должна предусматриваться возможность регулирования высоты и угла наклона экрана. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края.

## 5.2 Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические [110]. В таблице 5.1 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003–2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Повышенный уровень локальной вибрации	-	+	-	СН 2.2.4/2.1.8.566–96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий
2. Повышенный уровень шума	-	+	-	ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация»
3. Недостаточная освещенность рабочего места	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
4. Отклонение показателей микроклимата	-	+	-	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
5. Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	-	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

## **5.2.1 Анализ вредных производственных факторов**

При работе на установке МИР-1М возможно воздействие вредных и опасных факторов, негативно влияющих на здоровье сотрудников. К первой группе факторов можно отнести повышенный уровень локальной вибрации и шума, а также недостаточную освещенность помещения. В качестве второй группы факторов необходимо рассмотреть возможность поражения электрическим током [111].

### **5.2.1.1 Повышенный уровень локальной вибрации**

Воздействие вибрации может приводить к нарушениям сердечной деятельности, расстройству нервной системы, спазму сосудов, изменению в суставах, приводящему к ограничению подвижности и изменению в вестибулярном аппарате [112]. Длительное воздействие вибрации приводит к вибрационной болезни. В качестве защиты от вибрационного воздействия могут использоваться виброгасители для установки, а также СИЗ оператора (сапоги, перчатки и т.д.) [113].

Помещение, в котором находится установка МИР-1М относится к категории 3 – технологического типа «а» [114]. Источником вибрации частотой 50 Гц является пластинчато-роторный насос с виброскоростью не превышающей 0,002 м/с. Согласно требованиям, при среднегеометрической частоте полос 50 Гц, виброскорость должна соответствовать значениям меньше 0,11м/с. Таким образом, используемое оборудование полностью соответствует требованиям уровня локальной вибрации.

### **5.2.1.2 Повышенный уровень шума**

Шум ухудшает условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через

центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Источник шумового загрязнения – вращающиеся части механических насосов. При работе механического насоса максимальность шумового загрязнения составляет 52 дБ на расстоянии 1 м [115]. Длительность возникновения максимальных шумов составляет не более 5 минут. Рабочее место расположено в 2-2,5 метров от установки. Предельно допустимый уровень шумов для напряженности легкой степени при легкой физической нагрузке составляет 80 дБ [116]. Для снижения негативного влияния шума на оператора установки могут применяться средства индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука [117]. При работе на установке МИР-1М используются наушники.

### **5.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочего места**

Уровень освещенности, на рабочем месте, должен соответствовать условиям работы и быть оптимальным по яркости (не более 500 кд/м<sup>2</sup> для площади рабочей поверхности более 0,1 м<sup>2</sup>) [118]. Световой спектр должен максимально соответствовать дневному освещению, так как оно оптимально соответствует человеческой физиологии. Очень высокий уровень освещенности, так же, как и недостаточный, приводит к быстрому утомлению зрения. Освещение должно быть равномерным на всей площади рабочего места, так как при переносе взгляда с более освещенных на менее освещенные участки рабочего места и наоборот происходит понижение остроты зрения на достаточно

долгий промежуток времени. Помещение, в котором располагается установка, имеет линейные размеры 6×5 м и высоту 3 м.

Учитывая особенности процесса работы на на установке МИР-1М (характеристика зрительной работы IV средней точности при норме наименьшего размера объекта различения от 0,5 до 1) возможно применение схемы общего равномерного освещения. Согласно нормам освещённости на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении в лаборатории требуется создать освещённость  $E=200$  лк [119].

В лаборатории применяется общая система освещения люминесцентными лампами ЛД. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решеткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda = 1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом,  $h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над полом в помещении высотой  $H$  равной 3 м:

$$h_n = H - h_c = 3 - 0,3 = 2,7 \text{ м}$$

Высота рабочей поверхности  $h_{рп} = 0,8$  м. Высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{рп} = 2,7 - 0,8 = 1,9 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 1,9 = 2,09 \text{ м.}$$

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле



$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = 2,73 \approx 2$$

где  $n_{\text{ряд}}$  – количество рядов;  $B$  – ширина помещения, м.

Длина светильника  $l_{\text{св}} = 1,23$  м.

Количество светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = 2,66 \approx 2$$

где  $n_{\text{св}}$  – количество светильников в ряду;  $A$  – длина помещения, м.

Общее количество светильников с люминесцентными лампами в помещении определяется по формуле:

$$N = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} = 4$$

где  $N$  – общее количество светильников;  $n_{\text{ряд}}$  – количество рядов;  $n_{\text{св}}$  – количество светильников в ряду.

Светильники размещаются в два ряда. В каждом ряду можно установить 2 светильника типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,23 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 1,84 м. План помещения и размещения на нем светильников представлен на рисунке 5.2. Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении равно  $N=8$ .

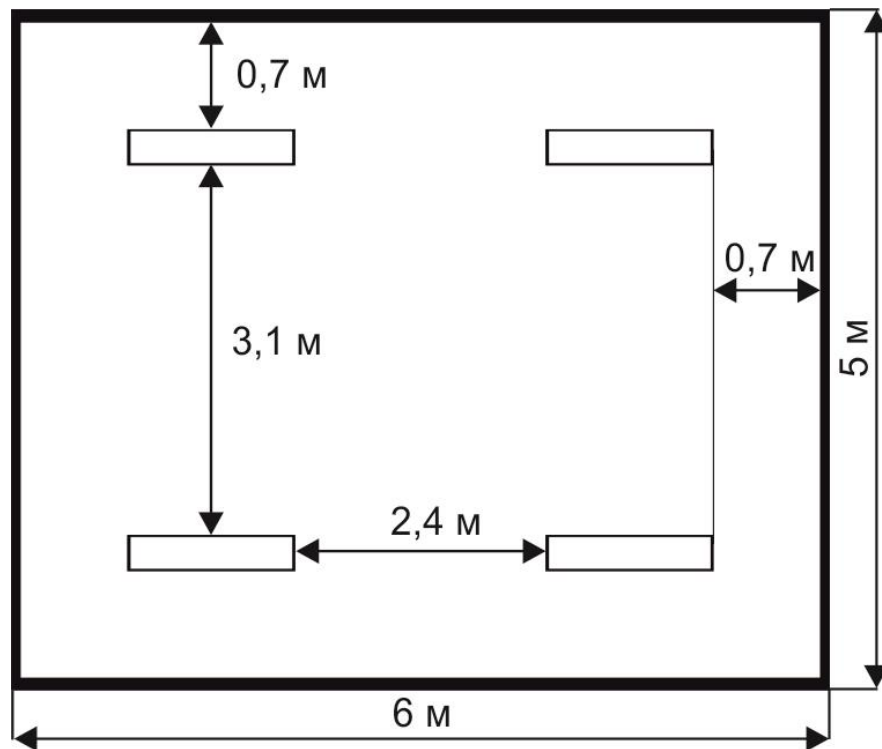


Рисунок 5.2 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h(A + B)} = \frac{30}{1,9 \cdot (6 + 5)} = 1,44$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения: 30% для стен и 50% для потолка. Коэффициент использования светового потока  $\eta$  светильников с люминесцентными лампами с учетом индекса помещения соответственно равен 51 %.

Потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N_l \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 30 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,51} = 2426 \text{ лм}$$

Ближайшая стандартная лампа – ЛД 40 Вт с потоком 2300 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

$$-10\% \leq -5,47\% \leq +20\%$$

Таким образом, электрическая мощность осветительной установки:

$$P = 8 * 40 = 320 \text{ Вт.}$$

#### 5.2.1.4 Отклонение показателей микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура воздуха, температура поверхностей, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата для категории Ia (уровень энергозатрат до 139 Вт) приведены в таблице 5.2 согласно СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [120].

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	22-24	21-25	60-40	0,1
Теплый	23-25	22-26	60-40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%,

скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

## **5.2.2 Анализ опасных факторов**

### **5.2.2.1 Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий**

Источниками поражения электрическим током являются неисправное электрооборудование в лаборатории и несоблюдение правил техники безопасности при работе с электрооборудованием. В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Установка МИР-1М относится к классу электроустановок с номинальным напряжением до 1000 В, следовательно помещение, в котором она находится, относится к категории помещений без повышенной опасности [121]. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Опасность электропоражения существует в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

- при коротком замыкании в высоковольтных блоках.

Проходя через организм человека, электроток производит термическое, электролитическое, механическое, биологическое, световое воздействие. Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока.

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте. К СКЗ относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов – в результате изолированные участки сети обладают большим сопротивлением изоляции и малой емкостью проводов относительно земли, за счет чего значительно улучшаются условия безопасности [122]. Основными электрозащитными средствами в электроустановках напряжением до 1000 В являются изолирующие штанги, а также изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ. К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.

### **5.3 Экологическая безопасность**

Основной урон окружающей среде процесс синтеза защитных покрытий составляет выброс продуктов горения машинного масла при работе пластинчато-роторного и диффузионного насосов. Для предотвращения дальнейшего загрязнения атмосферы необходимо улучшить систему фильтрации масляных паров при работе пластинчато-роторных насосов [123].

## **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований**

Наиболее типичными ЧС являются утечка газа из баллона и возгорание. В случае обнаружения утечки газа из баллона немедленно прекратить подачу газа и сообщить об аварийной ситуации непосредственному руководителю. При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, закрыть баллоны с газом, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 112, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

### **5.4.2 Разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных ЧС является пожар. Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага. Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия [124]:

- 1) использование только исправного оборудования;
- 2) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- 3) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;

4) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии (рисунок 5.3).

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды. В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

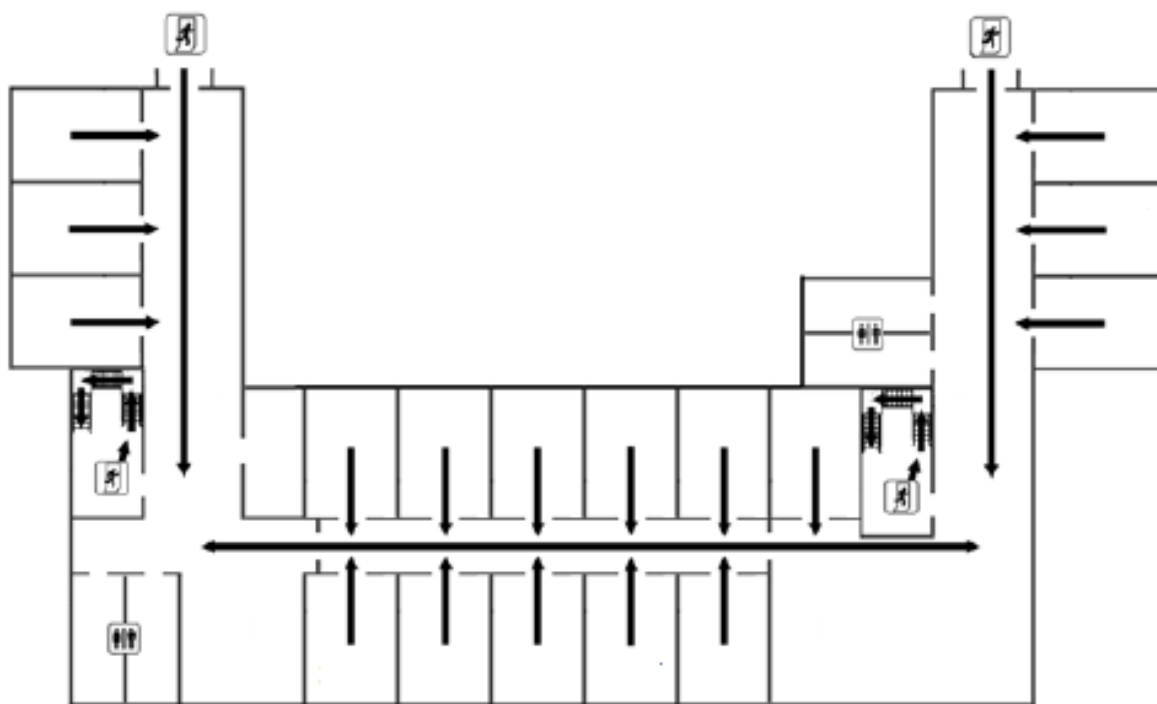


Рисунок 5.3 – План эвакуации при пожаре и других ЧС

Помещение, в котором располагается установка МИР-1М относится к категории Г умеренной пожароопасности вследствие наличия нагревательного элемента диффузионного насоса. Однако, наиболее вероятной причиной пожара служит короткое замыкание в электрических цепях установки. Для тушения пожара в помещении предусмотрен углекислотный огнетушитель (ОУ-8).

## 5.5 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены необходимые правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, в которых регламентируются условия труда, необходимые инструкции по работе со специальным оборудованием, а также гигиенические требования к организации работы.

Были выявлены и проанализированы опасные и вредные факторы производственной среды. К вредным факторам можно отнести: воздействие электрического напряжения на организм человека, микроклимат, воздействие шума и высоких электромагнитных полей. К опасным факторам можно отнести: электробезопасность, термическую опасность и пожаровзрывоопасность.

К факторам рабочего места, влияющим на окружающую среду, относятся масляные пары. Для предотвращения негативного влияния эксплуатации установки могут использоваться масляные фильтры. Также были рассмотрены различные чрезвычайные ситуации при работе на вакуумной установке и правильный порядок действий при их возникновении.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована эволюция микроструктуры и механических свойств покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  с содержанием Ta от  $y = 0$  до  $y = 0,65$ . Установлено, что с ростом содержания Ta в покрытиях  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  происходит изменение их преимущественной ориентации с (111) на (200), а также зеренной структуры с V-образной на столбчатую. Показано, что изменение элементного состава и микроструктуры покрытий приводит к снижению их твердости и модуля Юнга. В то же время твердость демонстрирует локальный максимум при  $y = 0,35$ , обусловленный развитием в покрытиях  $Ti_{0,31}Al_{0,34}Ta_{0,35}N$  максимальных остаточных сжимающих напряжений. Вязкость разрушения покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , напротив, увеличивается с ростом содержания Ta, достигая локального максимума при  $y = 0,35$ .

Методом скретч-тестирования продемонстрировано, что при повышении содержания Ta от  $y = 0$  до  $y = 0,35$  увеличение вязкости разрушения покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  способствует повышению их трещиностойкости и адгезионной прочности. В то же время, дальнейшее увеличение концентрации легирующего элемента обуславливает более быстрое разрушение покрытий при скретч-тестировании вследствие значительного снижения их твердости и изгибной жесткости, которое вызывает рост глубины проникновения индентора в образец и, как следствие, развитие в покрытиях более сильных напряжений.

Установлено, что, несмотря на повышение трещиностойкости покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ , с увеличением содержания Ta происходит существенное снижение их износостойкости. Все покрытия, легированные Ta, продемонстрировали более высокую интенсивность износа, чем покрытие  $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ . Основными причинами этого являются изменение текстуры покрытий с (111) на (200), которая в материалах на основе TiN характеризуется меньшей износостойкостью, а также формирование столбчатых зерен с прямыми ровными границами, способствующими быстрому распространению усталостных трещин через всю толщину покрытия при циклических нагрузках.

Для повышения износостойкости покрытий  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  были синтезированы многослойные композиции, состоящие из чередующихся керамических и металлических слоев ( $Ti_{0,45}Al_{0,55}$  и Ta). Установлено, что введение металлических промежуточных слоев позволило подавить рост столбчатых зерен через всю толщину покрытий, что обусловило снижение скорости распространения трещин к подложке. Вязкие металлические слои также способствовали подавлению распространения трещин в глубь покрытий, поскольку в них при вершине трещины возникает зона пластической деформации, резко повышающая энергию разрушения. Еще одним фактором, снижающим скорость распространения трещин в многослойных покрытиях, является наличие границ раздела между слоями, которые способствуют диссипации энергии деформации за отклонения трещин. Суммарное действие всех указанных факторов обусловило повышение износостойкости многослойных покрытий  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}$  и  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ta$  по сравнению с однослойным покрытием  $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lind H. et al. Improving thermal stability of hard coating films via a concept of multicomponent alloying // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 99, No. 9. – P. 091903.
2. Mayrhofer P.H. et al. Protective Transition Metal Nitride Coatings // *Comprehensive Materials Processing*. – 2014. – P. 355-388.
3. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al) N: a review // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Vol. 342, No. 1-2. – P. 58-79.
4. Hollerweger R. et al. Origin of high temperature oxidation resistance of Ti–Al–Ta–N coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 257. – P. 78-86.
5. Zhang S. et al. Toughening of hard nanostructural thin films: a critical review // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 198, No. 1-3. – P. 2-8.
6. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection // *Surface and Coatings Technology*. – 1995. – Vol. 76. – P. 328-336.
7. Shugurov A. R., Kazachenok M. S. Mechanical properties and tribological behavior of magnetron sputtered TiAlN/TiAl multilayer coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 353. – P. 254-262.
8. González-Carmona J. M. et al. Wear mechanisms identification using Kelvin probe force microscopy in TiN, ZrN and TiN/ZrN hard ceramic multilayers coatings // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46, No. 15. – P. 24592-24604.
9. Chim Y. C. et al. Oxidation resistance of TiN, CrN, TiAlN and CrAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc // *Thin Solid Films*. – 2009. – Vol. 517, No. 17. – P. 4845-4849.
10. Schuster J. C., Bauer J. The ternary system titanium-aluminum-nitrogen // *Journal of Solid State Chemistry*. – 1984. – Vol. 53, No. 2. – P. 260-265.

11. Cremer R., Witthaut M., Neuschütz D. Experimental determination of the metastable (Ti, Al) N phase diagram up to 700 deg C // *Value-Addition Metallurgy*. – 1998. – C. 249-258.
12. Knotek O., Böhmer M., Leyendecker T. On structure and properties of sputtered Ti and Al based hard compound films // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 1986. – Vol. 4, No. 6. – P. 2695-2700.
13. Holec D. et al. Phase stability and alloy-related trends in Ti–Al–N, Zr–Al–N and Hf–Al–N systems from first principles // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 206, No. 7. – P. 1698-1704.
14. Kalss W. et al. Modern coatings in high performance cutting applications // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2006. – Vol. 24, No. 5. – P. 399-404.
15. Liu Z. J., Shum P. W., Shen Y. G. Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti–Al–N solid solution films // *Thin Solid Films*. – 2004. – Vol. 468, No. 1-2. – P. 161-166.
16. Zhou M. et al. Phase transition and properties of Ti–Al–N thin films prepared by rf-plasma assisted magnetron sputtering // *Thin solid films*. – 1999. – Vol. 339, No. 1-2. – P. 203-208.
17. Chen L. et al. Thermal stability and oxidation resistance of Ti–Al–N coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 206, No. 11-12. – P. 2954-2960.
18. Mayrhofer P. H. et al. Spinodal decomposition of cubic  $Ti_{1-x}Al_xN$ : comparison between experiments and modeling // *International journal of materials research*. – 2007. – Vol. 98, No. 11. – P. 1054-1059.
19. Rachbauer R. et al. Decomposition pathways in age hardening of Ti-Al-N films // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 110, No. 2. – P. 023515.
20. Cremer R., Neuschütz D. Optimization of (Ti, Al) N hard coatings by a combinatorial approach // *International Journal of Inorganic Materials*. – 2001. – Vol. 3, No. 8. – P. 1181-1184.

21. Pfeiler M. et al. Improved oxidation resistance of TiAlN coatings by doping with Si or B // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 203, No. 20-21. – P. 3104-3110.
22. Baker M. A. et al. A study of the nanostructure and hardness of electron beam evaporated TiAlBN Coatings // *Thin solid films*. – 2010. – Vol. 518, No. 15. – P. 4273-4280.
23. Zeng Y. et al. Superhard TiAlCN coatings prepared by radio frequency magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. – 2015. – Vol. 584. – P. 283-288.
24. Morales-Hernandez J. et al. Structure and mechanical properties of (Ti, Al)(B, N) coatings fabricated by reactive DC magnetron sputtering // *Vacuum*. – 2004. – Vol. 76, No. 2-3. – P. 161-164.
25. Chen M. et al. Influence of vacuum annealing on structures and properties of AlTiSiN coatings with corrosion resistance // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 312. – P. 25-31.
26. Zhou J. et al. Effect of B-doping on the mechanical properties, thermal stability and oxidation resistance of TiAlN coatings // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – Vol. 98. – P. 105531.
27. Shtansky D. V. et al. The structure and properties of Ti–B–N, Ti–Si–B–N, Ti–Si–C–N, and Ti–Al–C–N coatings deposited by magnetron sputtering using composite targets produced by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) // *Journal of Materials Synthesis and Processing*. – 1998. – Vol. 6, No. 1. – P. 61-72.
28. Zhu L. et al. The effect of yttrium on cathodic arc evaporated Ti<sub>0.45</sub>Al<sub>0.55</sub>N coating // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 214. – P. 53-58.
29. Belous V. et al. Cavitation and abrasion resistance of Ti–Al–Y–N coatings prepared by the PIII&D technique from filtered vacuum-arc plasma // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 223. – P. 68-74.
30. Aninat R. et al. Addition of Ta and Y in a hard Ti-Al-N PVD coating: Individual and conjugated effect on the oxidation and wear properties // *Corrosion Science*. – 2019. – Vol. 156. – P. 171-180.

31. Moser M. et al. Influence of yttrium on the thermal stability of Ti-Al-N thin films // *Materials*. – 2010. – Vol. 3, No. 3. – P. 1573-1592.
32. Xu Y. X. et al. Effect of CrN addition on the structure, mechanical and thermal properties of Ti-Al-N coating // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 235. – P. 506-512.
33. Zou C. et al. Characterization and Mechanical Properties of Ti–Al–Cr–N Nanocomposite Coatings Deposited by Closed Field Unbalanced Middle Frequency Magnetron Sputtering // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 50, No. 12R. – P. 125806.
34. Fox-Rabinovich G. S. et al. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200, No. 5-6. – P. 1804-1813.
35. Lind H. et al. Improving thermal stability of hard coating films via a concept of multicomponent alloying // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 99, No. 9. – P. 091903.
36. Forsén R. et al. Decomposition and phase transformation in TiCrAlN thin coatings // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2012. – Vol. 30, No. 6. – P. 061506.
37. Kutschej K. et al. A new low-friction concept for  $Ti_{1-x}Al_xN$  based coatings in high-temperature applications // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 188. – P. 358-363.
38. Pfeiler M. et al. The effect of increasing V content on structure, mechanical and tribological properties of arc evaporated Ti–Al–V–N coatings // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2009. – Vol. 27, No. 2. – P. 502-506.
39. Franz R., Mitterer C. Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: A review // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 228. – P. 1-13.

40. Kutschej K. et al. Influence of oxide phase formation on the tribological behaviour of Ti–Al–V–N coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200, No. 5-6. – P. 1731-1737.
41. Yang K. et al. Effect of Mo content on the structure and mechanical properties of TiAlMoN films deposited on WC–Co cemented carbide substrate by magnetron sputtering // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol. 52. – P. 29-35.
42. Gao T. et al. Influence of Mo content on properties of Ti–Al–Mo–N films // *Surface Engineering*. – 2021. – Vol. 37, No. 4. – P. 519-526.
43. Tomaszewski Ł. et al. TiAlN based wear resistant coatings modified by molybdenum addition // *Vacuum*. – 2015. – Vol. 121. – P. 223-229.
44. Glatz S. A. et al. Thermal stability and mechanical properties of arc evaporated Ti–Al–Zr–N hard coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 266. – P. 1-9.
45. Chen L. et al. Influence of Zr on structure, mechanical and thermal properties of Ti–Al–N // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519, No. 16. – P. 5503-5510.
46. Yang B. et al. Effect of Zr on structure and properties of Ti–Al–N coatings with varied bias // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2013. – Vol. 38. – P. 81-86.
47. Mikula M. et al. Toughness enhancement in highly NbN-alloyed Ti-Al-N hard coatings // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 121. – P. 59-67.
48. Chen Y. H. et al. Enhanced thermal stability and fracture toughness of TiAlN coatings by Cr, Nb and V-alloying // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 342. – P. 85-93.
49. Mayrhofer P. H., Rachbauer R., Holec D. Influence of Nb on the phase stability of Ti–Al–N // *Scripta Materialia*. – 2010. – Vol. 63, No. 8. – P. 807-810.
50. Rachbauer R., Holec D., Mayrhofer P. H. Increased thermal stability of Ti–Al–N thin films by Ta alloying // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 211. – P. 98-103.

51. Hollerweger R. et al. Origin of high temperature oxidation resistance of Ti–Al–Ta–N coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 257. – P. 78-86.
52. Pfeiler M. et al. On the effect of Ta on improved oxidation resistance of Ti–Al–Ta–N coatings // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2009. – Vol. 27, No. 3. – P. 554-560.
53. Yang Y. et al. Improved Ti-Al-N coatings through Ta alloying and multilayer architecture // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 328. – P. 428-435.
54. Grossmann B. et al. Tailoring age hardening of  $Ti_{1-x}Al_xN$  by Ta alloying // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2017. – Vol. 35, No. 6. – P. 060604.
55. Ereemeev S. V., Shugurov A. R. Chemical bonding analysis in  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  solid solutions // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 395. – P. 125802.
56. Sui X. et al. Effect of Ta content on microstructure, hardness and oxidation resistance of TiAlTaN coatings // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2016. – Vol. 58. – P. 152-156.
57. Sangiovanni D. G., Chirita V., Hultman L. Toughness enhancement in TiAlN-based quaternary alloys // *Thin Solid Films*. – 2012. – Vol. 520, No. 11. – P. 4080-4088.
58. Mikula M. et al. Experimental and computational studies on toughness enhancement in Ti-Al-Ta-N quaternaries // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2017. – Vol. 35, No. 6. – P. 060602.
59. Shugurov A. R. et al. Study of crack resistance of TiAlN coatings by scratch testing // *Physical Mesomechanics*. – 2017. – Vol. 20, No. 2. – P. 185-192.
60. Seidl W. M. et al. Improved mechanical properties, thermal stabilities, and oxidation resistance of arc evaporated Ti-Al-N coatings through alloying with Ta // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 344. – P. 244-249.



61. Seidl W. M. et al. Influence of Ta on the fracture toughness of arc evaporated Ti-Al-N // Vacuum. – 2018. – Vol. 150. – P. 24-28.
62. Grossmann B. et al. High-temperature tribology and oxidation of  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  hard coatings // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 342. – P. 190-197.
63. Pogrebnjak A. D. et al. Superhard CrN/MoN coatings with multilayer architecture // Materials & Design. – 2018. – Vol. 153. – P. 47-59.
64. Li N., Liu X. Y. mechanical behavior of metal/ceramic interfaces in nanolayered composites—experiments and modeling // Journal of materials science. – 2018. – Vol. 53, No. 8. – P. 5562-5583.
65. Matizanhuka W. Structure-properties relationships // Microstructure-Property Correlations for Hard, Superhard, and Ultrahard Materials. – Springer, Cham, 2016. – P. 75-103.
66. Anwar S., Anwar S., Nayak P. Multilayer composite ceramic-metal thin film: Structural and mechanical properties // Surfaces and Interfaces. – 2018. – Vol. 10. – P. 110-116.
67. Hall E. O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1951. – Vol. 64, No. 9. – P. 747.
68. Petch N. J. The orientation relationships between cementite and  $\alpha$ -iron // Acta Crystallographica. – 1953. – Vol. 6, No. 1. – P. 96-96.
69. Musil J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 50-65.
70. Selivanov K. S. et al. Erosive wear behavior of Ti/Ti (V, Zr) N multilayered PVD coatings for Ti-6Al-4V alloy // Wear. – 2019. – Vol. 418. – P. 160-166.
71. Shuai J. et al. Comparative study on crack resistance of TiAlN monolithic and Ti/TiAlN multilayer coatings // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, No. 5. – P. 6672-6681.

72. He M. Y., Evans A. G., Hutchinson J. W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials: role of residual stresses // *International Journal of Solids and Structures*. – 1994. – Vol. 31, No. 24. – P. 3443-3455.
73. Tsai Y. Z., Duh J. G. Tribological behavior of CrAlSiN/W<sub>2</sub>N multilayer coatings deposited by DC magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. – 2010. – Vol. 518, No. 24. – P. 7523-7526.
74. Hutchinson J. W. Stresses and failure modes in thin films and multilayers // *Notes for a Dcamm Course*. Technical University of Denmark, Lyngby. – 1996. – Vol. 1. – P. 14.
75. Li X., Diao D., Bhushan B. Fracture mechanisms of thin amorphous carbon films in nanoindentation // *Acta materialia*. – 1997. – Vol. 45, No. 11. – P. 4453-4461.
76. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection // *Surface and Coatings Technology*. – 1995. – Vol. 76. – P. 328-336.
77. Shuai J. et al. Comparative study on crack resistance of TiAlN monolithic and Ti/TiAlN multilayer coatings // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46, No. 5. – P. 6672-6681.
78. Kumar S., Curtin W. A. Crack interaction with microstructure // *Materials today*. – 2007. – Vol. 10, No. 9. – P. 34-44
79. Vereschaka A. A., Grigoriev S. N. Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nano-structured coatings // *Wear*. – 2017. – Vol. 378. – P. 43-57.
80. Rahsepar M., Bahrololoom M. E. Study of surface roughness and corrosion performance of Ni/Zn–Fe and Zn–Fe/Ni compositionally modulated multilayer coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 204, No. 5. – P. 580-585.
81. Sui X. et al. Improved surface quality of layered architecture TiAlTaN/Ta coatings for high precision micromachining // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 320. – P. 298-303.
82. Ersen O. et al. Relation between interfacial structure and mechanical properties in AlN/TiN bilayers investigated by EXAFS // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2005. – Vol. 234, No. 3. – P. 308-320.

83. Kathrein M. et al. Multifunctional multi-component PVD coatings for cutting tools // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200, No. 5-6. – P. 1867-1871.
84. Koller C. M. et al. Structure and mechanical properties of architecturally designed Ti-Al-N and Ti-Al-Ta-N-based multilayers // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – P. 125355.
85. Koller C. M. et al. Thermally-induced phase transformation sequence of arc evaporated Ta-Al-N coatings // *Scripta Materialia*. – 2016. – Vol. 113. – P. 75-78.
86. Yang Y. et al. Improved Ti-Al-N coatings through Ta alloying and multilayer architecture // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 328. – P. 428-435.
87. Jiang C. L. et al. Influence of titanium interlayer thickness distribution on mechanical properties of Ti/TiN multilayer coatings // *Thin Solid Films*. – 2017. – Vol. 632. – P. 97-105.
88. Seidl W. M. et al. Mechanical properties and oxidation resistance of Al-Cr-N/Ti-Al-Ta-N multilayer coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 347. – P. 427-433
89. Ali R., Sebastiani M., Bemporad E. Influence of Ti-TiN multilayer PVD-coatings design on residual stresses and adhesion // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 75. – P. 47-56.
90. Seidl W. M. et al. Influence of coating thickness and substrate on stresses and mechanical properties of (Ti, Al, Ta) N/(Al, Cr) N multilayers // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 347. – P. 92-98.
91. Li N. et al. In situ nanoindentation study of plastic co-deformation in Al-TiN nanocomposites // *Scientific reports*. – 2014. – Vol. 4. – P. 6633.
92. Romero E. C. et al. Mechanical and tribological properties of nanostructured TiAlN/TaN coatings deposited by DC magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 378. – P. 124941.

93. Wang F. et al. Systematic ab initio investigation of the elastic modulus in quaternary transition metal nitride alloys and their coherent multilayers // *Acta Materialia*. – 2017. – Vol. 127. – P. 124-132.
94. Yue J., Liu Y., Li G. Template-induced coherent growth and mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>/TiN nano-multilayers // *Scripta Materialia*. – 2009. – Vol. 60, No. 4. – P. 240-243.
95. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Journal of materials research*. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564-1583.
96. Stoney G. G. The tension of metallic films deposited by electrolysis // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. – 1909. – Vol. 82, No. 553. – P. 172-175.
97. Begley M. R., Evans A. G., Hutchinson J. W. Spherical impression of thin elastic films on elastic-plastic substrates // *International journal of Solids and structures*. – 1999. – Vol. 36, No. 18. – P. 2773-2788.
98. Wang J. S. et al. The mechanical performance of DLC films on steel substrates // *Thin Solid Films*. – 1998. – Vol. 325, No. 1-2. – P. 163-174.
99. Beuth Jr J. L. Cracking of thin bonded films in residual tension // *International Journal of Solids and Structures*. – 1992. – Vol. 29, No. 13. – P. 1657-1675.
100. He N. et al. Toughness measurement and toughening mechanisms of arc ion plating Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films treated by annealing // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41, No. 8. – P. 9534-9541.
101. Abadias G. Stress and preferred orientation in nitride-based PVD coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202, No. 11. – P. 2223-2235.
102. Sangiovanni D. G., Chirita V., Hultman L. Toughness enhancement in TiAlN-based quaternary alloys // *Thin Solid Films*. – 2012. – Vol. 520, No. 11. – P. 4080-4088.

103. Wieceński P. et al. Failure and deformation mechanisms during indentation in nanostructured Cr/CrN multilayer coatings // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 240. – P. 23-31.

104. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).

105. ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения)

106. Инструкция No 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В

107. ГОСТ Р 12.4.026-2001 Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний

108. ГОСТ Р 50923-96 Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

109. ГОСТ 21889-76 Система «Человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования

110. ГОСТ 22269-76 Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования

111. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

112. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. — 178 с

113. ГОСТ 26568-85 Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация

114. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий

115. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности

116. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы
117. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда. Средства и методы защиты от шума.
118. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
119. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*»
120. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
121. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
122. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление
123. Третьякова Н. А. Нормирование выбросов в окружающую среду: учебное пособие. – 2018
124. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123–ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»

## Приложение А

### Глава 2 Materials and methods

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Кузьминов Евгений Дмитриевич		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Зяблова Н.Н.	к. ф. н		

## 2 MATERIALS AND METHODS

$Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  coatings were deposited on substrates made of commercially pure titanium and Si (001) with dimensions of  $15 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$  and  $10 \times 10 \times 0.38 \text{ mm}^3$ , respectively, heated to a temperature of  $425 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ti substrates were mechanically ground and polished, followed by ultrasonic cleaning in alcohol. Before the coating deposition all the substrates were sputter-cleaned with Ar ions at an operating gas pressure of 0.02 Pa for 20 minutes. The coatings deposition was performed by reactive magnetron sputtering on a MIR-1M setup (Fig. 2.1) using two planar magnetrons using disk targets made of Ti/Al (55/45 at.%) and Ta (99.99 at.%) alloys in a medium mixtures of Ar and  $N_2$  gases. The total pressure in the working chamber was 0.3 Pa, the partial pressure of nitrogen was 0.06 Pa. The Ta content in  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  coatings varied from 0 to 65%.

The deposition of multilayer coatings was carried out by alternating ceramic ( $Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N$ ) and metallic ( $Ti_{0.45}Al_{0.55}$  or Ta) layers. The deposition of  $Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N$  layers was carried out similarly to single-layer coatings. When the metal layers were deposited, the nitrogen supply was interrupted and one of the magnetrons was turned off. The obtained multilayer coatings  $Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ti_{0.45}Al_{0.55}$  and  $Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ta$  consist of seven and fifteen alternating layers. The ratio of the thicknesses of the seven-layer coatings was 0.7/0.1 and 0.6/0.2  $\mu\text{m}$ , while that of fifteen-layer coatings was 0.3/0.1  $\mu\text{m}$  (Table 2.1). The thickness of the coatings  $h$  was 3.0-3.1  $\mu\text{m}$ .

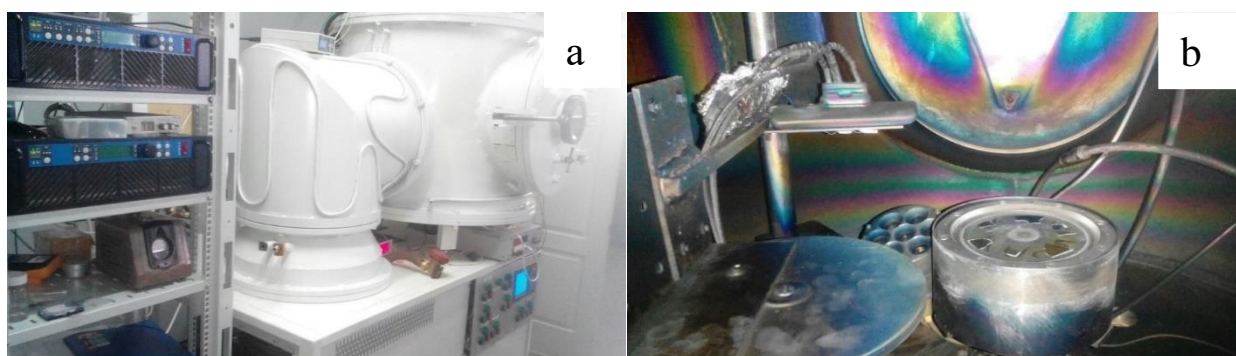


Fig. 2.1. External view of the installation for magnetron sputtering MIR-1M



Table 2.1. Architecture of multilayer coatings based on the  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  system

Coating	Number of layers	Layer thickness, $\mu m$	Coating thickness, $\mu m$
$Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N$	1	3.0	3.0
$Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ti_{0.45}Al_{0.55}$	4/3	0.7/0.1	3.1
$Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ti_{0.45}Al_{0.55}$	4/3	0.6/0.2	3.0
$Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ti_{0.45}Al_{0.55}$	8/7	0.3/0.1	3.1
$Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ta$	4/3	0.7/0.1	3.1
$Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ta$	4/3	0.6/0.2	3.0
$Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ta$	8/7	0.3/0.1	3.1

The morphology of the cross-section of the coatings and the friction tracks on their surfaces, as well as the elemental composition, were studied using a Carl Zeiss EVO 50 scanning electron microscope (SEM) equipped with an Inca ACT-X energy dispersive spectrometer. The structure and phase composition of the coatings were investigated by X-ray diffraction in the Bragg-Brentano geometry using a Shimadzu XRD-6000 diffractometer using  $CuK_{\alpha}$  radiation ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ). The microstructure of the cross-section of the coatings was studied using a JEM-2100 transmission electron microscope (TEM). Samples for TEM studies were prepared by ion-etching using an Ion Slicer EM-09100IS setup.

The mechanical characteristics of coatings based on the  $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$  system were investigated by the nanoindentation method using the NanoTest setup using a Berkovich indenter. The hardness ( $H$ ) and Young's modulus ( $E$ ) of the coatings were determined by the Oliver-Pharr method [95]. Residual stresses in coatings deposited on Si substrates were determined by measuring the curvature of the deflection of the substrate surface using the Stony equation [96].

The fracture toughness of the coatings was estimated using indentation tests of a spherical indenter using the method proposed in [97, 98]. In accordance with this approach, a sphere of large diameter  $D \gg h$  is pressed into a brittle coating on a plastic substrate under the action of a force  $P$ , causing a large deformation in the latter, which, in turn, contributes to the occurrence of tensile stresses and deformations in the coating

(Fig. 2.2). The magnitude of the radial deformations of the coating  $\varepsilon_r$  increases from the center ( $\varepsilon_r = 0$ ) to the edge of the indentation ( $\varepsilon_r = \max$ ). When the ultimate strength of the coating is exceeded, radial deformations contribute to the formation of cracks around the circumference of the indent.

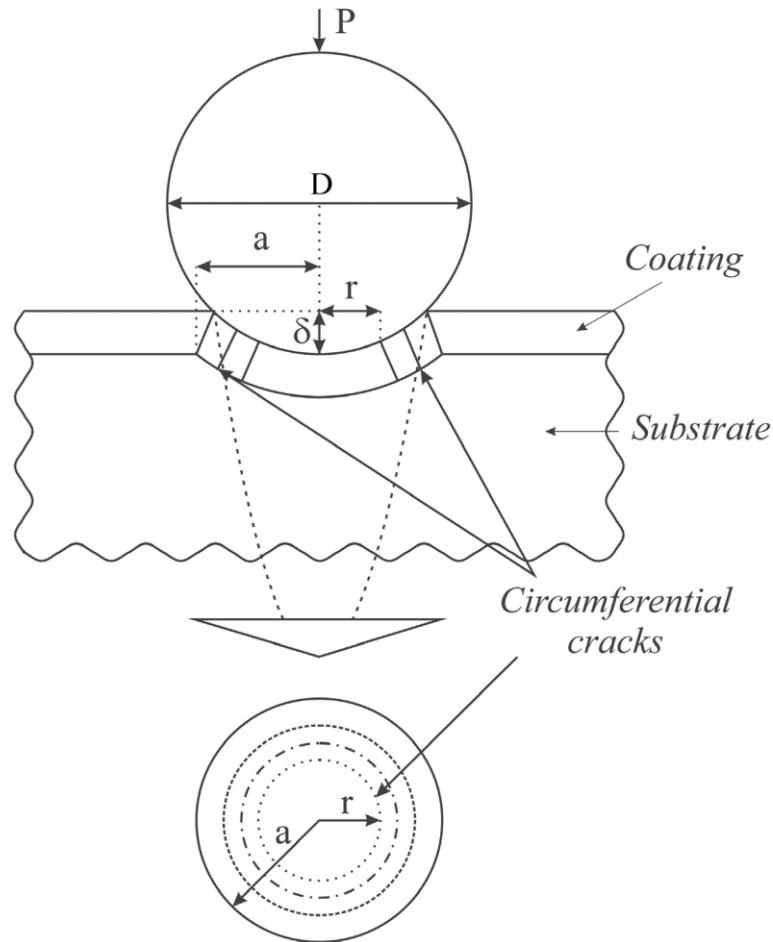


Fig. 2.2. Scheme of a spherical indentation test [96]

The fracture toughness of the  $K_{IC}$  coating was estimated using the following equation:

$$K_{IC} = \sqrt{\bar{E}_c G}, \quad (2.1)$$

where  $\bar{E}_c = \frac{E_c}{(1-\nu_c^2)}$  – is the plane-strain Young's modulus of the coating ( $E_c$  и  $\nu_c$  – are its Young's modulus and Poisson's ratio), a  $G$  – is the energy release rate that is given by [98, 100, 101]:

$$G = \frac{\pi h \varepsilon_c}{2} g(\alpha, \beta), \quad (2.2)$$

where  $\varepsilon_c$  – is the critical strain for coating cracking and  $g(\alpha, \beta)$  is the parameter dependent on the Dundurs parameters  $\alpha$  and  $\beta$  describing the elastic mismatch between the coating and substrate:

$$\alpha = \frac{\bar{E}_c - \bar{E}_s}{\bar{E}_c + \bar{E}_s}, \beta = \frac{\mu_c(1 - 2\nu_s) - \mu_s(1 - 2\nu_c)}{2[\mu_c(1 - \nu_c) + \mu_s(1 - \nu_s)]}, \quad (2.3)$$

where  $E_s = \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)}$  – is the plane-strain Young's modulus of the substrate ( $E_s$  и  $\nu_s$  – are its Young's modulus and Poisson's ratio),  $\mu_c$  и  $\mu_s$  – are the shear moduli of the coating and substrate, respectively. The critical strain  $\varepsilon_c$  corresponding to the cracking of the coating is determined by the sum of the tensile strain  $\varepsilon_r$  caused by the substrate deformation, as well as the permanent deformation of the coating  $\varepsilon_R$  resulting from its deposition:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_r + \varepsilon_R. \quad (2.4)$$

Numerical calculations carried out in [97] showed that the radial deformation can be approximated by the formula:

$$\varepsilon_r = \left[ m_1(\varepsilon_\gamma) \frac{r}{D} + m_2(\varepsilon_\gamma, n) \left( \frac{r}{D} \right)^3 \right] \varepsilon_\gamma, \quad (2.5)$$

where

$$m_1(\varepsilon_\gamma) = 1,45 + \frac{0,14}{\varepsilon_\gamma}, \quad (2.6)$$

$$m_2(\varepsilon_\gamma, n) = (1466 - 118n) + (-22,7 + 1,8n) \left( \frac{1}{\varepsilon_\gamma} \right) + (0,0075 - 0,003n) \left( \frac{1}{\varepsilon_\gamma} \right)^2, \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon_\gamma$  – is the yield strain for the substrate,  $n$  – is the Ramberg-Osgood parameter, which is the reciprocal of the strain-hardening exponent. Since the critical strain  $\varepsilon_c$  corresponds to the least strain resulting in coating cracking and the radial strain  $\varepsilon_r$  increases with increasing distance from the center of the contact area,  $r$  in Eqs. (2.5)-(2.7) is considered to be the radius of the most inner circumferential crack.

The indentation tests of Ti-Al-Ta-N coatings deposited on titanium substrates were carried out on a TSh-2M hardness tester using a ball made of VK8 alloy (WC 92%) with a diameter of 5 mm. The maximum applied load was 7350 N. The obtained  $r$  values were averaged and used to estimate the critical radial deformation according to formula (2.5). Young's modulus, yield stress and Ramberg-Osgood parameter of titanium substrates determined from tensile tests using an Instron 5582 universal testing machine were 115 GPa, 0.00217 and 20, respectively. Using the values  $\varepsilon_Y$  and  $n$ , the parameters  $m_1(\varepsilon_Y)$  and  $m_2(\varepsilon_Y, n)$  were calculated, which are 66 and 8398, respectively. Poisson's ratio of commercially pure titanium is 0.32.

Scratch testing of coatings based on the  $\text{Ti}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ta}_y\text{N}$  system was carried out using a Revetest RST installation using a Rockwell conical indenter with an apex angle of  $120^\circ$  and a radius of curvature of 200  $\mu\text{m}$ . To study coatings with different Ta content, the indenter movement path along the sample surface was 7 mm, the movement speed was 5 mm/min, the loading rate was 39 N/min, and the maximum applied load was 55 N. For the study of multilayer Ta coatings, the indenter movement path along the surface was the sample was 7 mm, the travel speed was 3.5 mm/min, the loading rate was 20 N/min, the maximum applied load was 40 N. For each coating, measurements were made for two samples. Three scratches were made on the surface of each sample. During the scratching process, the evolution of the friction coefficient was recorded, as well as the monitoring of acoustic emission signals. The topography of the surface of the samples in the area of scratches has been studied by the methods of optical and scanning electron microscopy. Optical studies were carried out using an Axiovert 40 Mat microscope.

Tribological tests were carried out at room temperature under dry friction conditions according to the "ball-on-disk" scheme using a CSEM CH2000 tribometer. A ball made of VK8 alloy (WC 92%) with a radius of 3 mm was used as a counterbody. The track diameter was 4 mm at a substrate rotation speed of 2.5 cm/s and a load of 5 N. The track traversed by the counterbody before testing was terminated was 80 m. The cross-sectional profile of the friction track was measured with an Alpha-Step IQ

contact profilometer. Sample volumetric wear and wear rate were calculated using the following formulas:

$$\Delta V_{\text{обп}} = Sl \text{ (mm}^3\text{)}, \quad (2.8)$$

$$I = \frac{\Delta V}{NF}, \quad (2.9)$$

where  $S$  – is the sectional area of the wear track ( $\text{mm}^2$ ),  $l$  – is the length of the wear track (mm),  $N$  – is the full path traveled by the counterbody until the end of the test (m),  $F$  – is the applied load (N).