

На правах рукописи



КОНОВАЛОВ ЕГОР ПАВЛОВИЧ

**ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
НА ПОВЕРХНОСТИ НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ
ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
СУХОГО РЕЗАНИЯ**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии
«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии
им. И.П. Бардина» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»)

Научный руководитель:

КОВАЛЕВ Анатолий Иванович,
кандидат технических наук, директор
Научного центра фундаментальных
и экспериментальных исследований
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Официальные оппоненты:

ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Материаловедение»,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет»

ФЕДОРОВ Сергей Вольдемарович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Высокоэффективные технологии
обработки» ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет»

Защита диссертации состоится 30 сентября 2025 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 31.1.007.01 на базе ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» по адресу: 105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2.

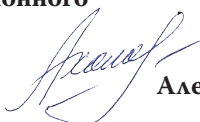
Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием даты составления, заверенные печатью, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» и на сайте <http://www.chermet.net>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

**Ученый секретарь диссертационного
совета 31.1.007.01,**

кандидат технических наук



Алексей Андреевич Холодный

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Разработка новых защитных покрытий для режущего инструмента на основе сплавов многокомпонентных нитридов, обладающих износостойкими, антифрикционными и термобарьерными свойствами, является сложной материаловедческой задачей, требующей применения большого комплекса экспериментальных и теоретических методов. Решение этой проблемы лежит на стыке нескольких научных направлений: нанотрибология, фазовые превращения и структурообразование при их изучении на атомном и электронном уровнях; термодинамика неравновесных процессов, изучающая структурную самоорганизацию в крайне неравновесных условиях. До настоящего времени при решении задачи повышения износостойкости режущих инструментов господствовала тенденция создания твердых и особо твердых покрытий, которые пассивно сопротивляются износу, накапливая повреждения до момента разрушения.

В настоящей работе впервые разрабатываются новые принципы создания адаптирующихся покрытий, которые улучшают свои свойства при износе в условиях экстремальных механических и тепловых нагрузок, динамически генерируют на своей поверхности термобарьерные пленки оксидов с низкими коэффициентами трения и радикально влияют на структурную трансформацию покрытия и его механические свойства. Такие покрытия представляют собой наноламинатный композит из многокомпонентных сплавов на основе неравновесных нитридов. Химический состав слоев, их толщина и компоновка являются внешними факторами, которые обеспечивают самоорганизацию этой сложной системы вдали от равновесия при функционировании обратных связей и активизации множества физических и химических процессов структурной и фазовой трансформации покрытия.

Результаты исследований, представленные в диссертации, были получены при выполнении проекта по гранту РФФИ № 21-79-10044.

Степень разработанности темы исследования

Механическая обработка высокопрочных материалов представляет собой уникальный пример экстремальных внешних воздействий. Это объясняется сочетанием высоких температур порядка 1000–1300 °С и давлений порядка 2–5 ГПа, развивающихся при высокоскоростном сухом резании. Более того, эти трибологические условия являются крайне неравновесными, что требует разработки покрытий, которые активно взаимодействуют с окружением и при этом улучшают свои свойства.

Значительный вклад в изучение процессов резания, принципов создания функциональных покрытий для режущего инструмента (торможение тепло-

вых потоков, фильтрация микро-капельной составляющей) и технологий формирования поверхностно-модифицирующих слоисто-многокомпонентных наносистем внесли научные группы под руководством Верещаки А.А. и Верещаки А.С. (МГТУ «Станкин»). Научные принципы создания износостойких защитных покрытий на режущем инструменте направлены на повышение их трещиностойкости и основаны на подборе композиций и архитектуры покрытий сверх высокой твердости. Они разрабатываются в научных коллективах Knotek, O, Stan Vepek, Верещаки А.А., Григорьева С.Н., Табакова В.П., Кабалдина Ю.Г., Внукова Ю.Н., Klocke F. Режущие инструменты с такими покрытиями имеют ограниченный ресурс работы в условиях применения СОЖ и невысоких скоростей резания.

Настоящая работа предполагает создание концепции для разработки составов и архитектуры покрытий, улучшающих свои функциональные свойства в процессе резания благодаря генерации на поверхности защитных пленок трибокерамик с низкими коэффициентами трения и теплопроводности. Область применения таких покрытий существенно шире. Они предназначены для высокоскоростного сухого резания трудно обрабатываемых сталей и сплавов. Физические основы их создания радикально отличаются от научных подходов создания вышеупомянутых покрытий, в которых реализуется лишь одна функция – высокая трещиностойкость в условиях пассивного сопротивления износу.

Базис концепции адаптирующихся покрытий, развиваемый в настоящей работе, основан на работах по трибологии Буше Н.А. (ВНИИЖТ) о формировании вторичных структур в процессе трения контактных поверхностей. Физические основы и принципы создания таких покрытий являются новыми. Они основаны на применении в нитридном сплаве поливалентных химических элементов, прогнозировании фазового и химического состава с применением квантово-химических расчётов композиций, активно формирующих пленки трибокерамик на поверхности покрытия.

Цель исследования

Комплексное изучение взаимосвязи химического и фазового состава с физическими и тепловыми свойствами защитных покрытий на инструментах под влиянием экстремальных воздействий в условиях сухого высокоскоростного резания.

Задачи исследования

1. Разработка концепции легирования и выбора состава нового класса многослойных наноламинатных покрытий из сплавов на основе неравновесных сложных нитридов с применением теоретических расчётов и компьютерного моделирования;

2. Изучение многофазной пространственной организации наноструктурных элементов в многослойных функциональных износостойких покрытиях с применением комплексных металлофизических исследований;

3. Создание прототипов адаптирующихся многослойных наноплазменных ионно-плазменных покрытий из сплавов на основе неравновесных сложных нитридов с поливалентным элементом $(\text{Ti}_{0.2}\text{Al}_{0.55}\text{Cr}_{0.2}\text{Si}_{0.03}\text{Y}_{0.02})\text{N}/(\text{Ti}_{0.25}\text{Al}_{0.65}\text{Cr}_{0.1})\text{N}$, $(\text{Ti}_{0.2}\text{Al}_{0.55}\text{Cr}_{0.2}\text{Si}_{0.03}\text{Y}_{0.02})\text{N}$, $(\text{Ti}_{0.2}\text{Al}_{0.55}\text{Cr}_{0.2}\text{Si}_{0.03}\text{Y}_{0.02})\text{N}/\text{WN}$ и высокоэнтропийного сплава на основе $(\text{AlCrZrTiTa})\text{N}$ и их испытание на износ;

4. Исследование фазовых и структурных превращений, тонких особенностей атомной и электронной структуры в многослойных покрытиях и трибопленках, физических параметров межатомного взаимодействия на границах раздела.

Научная новизна работы

1. Разработаны новые составы и структуры многослойных покрытий из сплавов на основе неравновесных сложных нитридов в виде однослойного $\text{Ti}_{0.2}\text{Al}_{0.55}\text{Cr}_{0.2}\text{Si}_{0.03}\text{Y}_{0.02}\text{N}$; многослойных $\text{Ti}_{0.2}\text{Al}_{0.55}\text{Cr}_{0.2}\text{Si}_{0.03}\text{Y}_{0.02}\text{N}/\text{Ti}_{0.25}\text{Al}_{0.65}\text{Cr}_{0.1}\text{N}$ и $(\text{TiAl}_{0.55}\text{CrSiY})\text{N}/\text{WN}$ покрытий, и покрытия из сплава на основе высокоэнтропийного нитрида $(\text{AlCrZrTiTa})\text{N}$, формирующих при эксплуатации на своей поверхности защитные трибоструктуры.

2. Впервые показано, что в условиях локализованных мегапластических деформаций наблюдается наблюдаются осцилляции квазиравновесных фазово-структурных состояний в ходе накопления дефектов кристаллического строения. Процесс формирования пленок трибооксидов на поверхности покрытий при трении и износе в условиях воздушной среды и динамической кристаллизации и аморфизации на различных этапах износа можно представить как самоорганизацию в крайне неравновесных термодинамических условиях.

3. Определены уникальные физические свойства аморфно-нанокристаллических пленок трибооксидов близких по составу к Al_2O_3 и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, такие как низкий коэффициент теплопроводности и малый коэффициент трения с аномальной сильной электронной поляризацией атомной структуры и присутствия отрицательного электростатического потенциала поверхности пленок. Такие трибопленки радикально повышают эксплуатационные свойства режущего инструмента.

4. Показано, что легирование покрытий микродобавками Hf и Y не приводит к активному образованию вторичных трибоструктур по сравнению с хромом, данные элементы в основном участвуют в формировании межатомных связей с другими металлами.

Теоретическая и практическая значимость работы

В результате систематического комплексного исследования свойств однослойных и многослойных защитных покрытий на основе $(\text{TiAlCrSiY})\text{N}$ и $(\text{TiAlCrSi(Y;Ta)})\text{N}/(\text{TiAlCr})\text{N}$ в различном диапазоне толщин общего слоя и количества нанослоев были получены следующие уникальные результаты, превосходящие текущий уровень исследований в мире:

1. Определены уникальные физические свойства аморфно-нанокристаллических плёнок трибооксидов, близких по составу к Al_2O_3 и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$: низкий коэффициент теплопроводности и малый коэффициент трения с аномальной сильной электронной поляризацией атомной структуры и присутствия отрицательного электростатического потенциала поверхности плёнок.

2. Проведены квантово-химические расчеты склонности к окислению этих покрытий с микродобавками Hf и Y показали, что данные элементы являются более инертными по сравнению с хромом и преимущественно участвуют в формировании межатомных связей с металлами Al, Ti, Cr, влияя на механические свойства нитридных покрытий.

3. На основе проведенных фундаментальных исследований созданы предпосылки разработки нового класса износостойких покрытий для высокоэффективного режущего инструмента, работающего в экстремальных условиях сухого высокоскоростного резания.

Методология и методы исследования

В основе работы находился анализ и сопоставление литературных данных, проведённых лабораторных теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых влиянию химического состава и структурной композиции нитридных сплавов на физические и тепловые свойства износостойких покрытий и эксплуатационные характеристики режущего инструмента при сухом высокоскоростном резании различных теплостойких металлов и сплавов. В качестве материала для исследования были выбраны сплавы на основе комплексных нитридов. Поставленные в работе задачи решали с использованием современных стандартных и нестандартных методик исследования анализа поверхности, компьютерного моделирования теплопроводности, а также математического анализа полученных результатов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. На поверхности износа покрытия из сплава на основе сложного нитрида при сухом высокоскоростном резании формируются тонкие защитные плёнки оксидов с аморфно-нанокристаллической структурой, близкие по составу к Cr_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 (сапфир) и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2)$ (муллит).

2. Механизмы формирования и фазово-структурной трансформации защитных трибоплёнок на поверхности покрытия носят динамический характер. Состав и концентрация защитных плёнок изменяется с течением времени во всём диапазоне процесса сухого высокоскоростного резания от стадии приработки до начала катастрофического износа.

3. Нанопленки муллита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2)$, образованные на этапе приработки, значительно снижают температуру в зоне резания по сравнению с пленками оксидов хрома Cr_2O_3 и титана TiO_2 и выполняют термобарьерную функцию, защищая режущий инструмент от перегрева.

4. Тугоплавкие элементы Hf и Y не играют большой роли в формировании трибооксидов на поверхности покрытия во время резания. Эти химические элементы являются более инертными по сравнению с хромом и преимущественно участвуют в формировании межатомных связей с металлами Al, Ti, Cr, влияя на механические свойства нитридных покрытий.

Степень достоверности результатов работы

Обеспечивалась использованием различных дополняющих друг друга временных апробированных экспериментальных методов исследований и метрологически аттестованной измерительной аппаратуры; проведением многократных повторных измерений экспериментальных образцов, подтверждающих воспроизводимость результатов; согласием полученных экспериментальных результатов с известными из литературы данными, а также теоретическими расчетами.

Апробация результатов работы

Основные материалы диссертации были доложены автором работы на следующих конференциях: Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2022)» (Москва, 2022 г.); Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2023)» (Москва, 2023 г.); European Materials Research Society, Spring Meeting (Страсбург, 2023 г.); Международная научно-техническая конференция «Технологическое обеспечение машиностроительных производств» (Могилев, 2024 г.).

Отдельные части представленной работы были отмечены званием лауреата конкурса «Молодые ученые 2023» на Международной выставке Металл-Экспо'23 (07–10 ноября 2023 г., Москва, ЦВК «Экспоцентр»).

Часть работы выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 21-79-10044.

Публикации

Результаты работы были опубликованы в 13 печатных работах, из которых 9 – в рецензируемых международных и российских научных изданиях, входящих в список ВАК, Web of Science и Scopus.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 2, 3 и 6 областей исследования, соответствующих паспорту специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 9 глав, выводов, списка использованных источников из 135 наименований, изложена на 139 страницах, содержит 4 таблицы и 56 рисунков.

Личный вклад автора

Выполнил анализ литературных данных по теме исследования, провел основную часть экспериментов, предложил составы покрытий с использованием Zr, Hf, осуществил обработку, анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных, участвовал в обсуждении и написании публикаций, популяризации полученных результатов на международных и российских конференциях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** описана актуальность научных проблем, сформулированы цель, задачи и методы данного исследования, основные научные результаты и практическая значимость работы, представлены данные по апробации результатов работы и публикациям, которые отражают основное содержание диссертационного исследования.

В **главе 1** выполнен аналитический обзор литературы о различных защитных покрытиях для режущего инструмента, в том числе на основе сплавов сложных нитридов, описаны их возможности применения и состояние исследований в данной области на текущий момент. Рассмотрено влияние различных параметров архитектуры одно- и многослойных покрытий на итоговые эксплуатационные свойства. Рассмотрены особенности и возможности применения покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов. Показано, что покрытия на основе нитридных сплавов и оксидов сложного состава представляют большой интерес в этой области, поскольку на их поверхности возникают различные тонкие пленки, повышающие теплозащитные и антифрикционные свойства. Образующиеся трибооксиды значительно повышают ресурс инструмента в ходе высокоскоростного сухого резания, помогая отводить тепло от зоны реза в стружку. Регулируя параметры толщины и количества слоев и их химического состава, можно создавать наиболее эффективные покрытия для обработки требуемого спектра металлов и сплавов. Также рассмотрена теория метода анализа электронной структуры тонких пленок EELFS, позволяющего определить структурные превращения в тончайших слоях толщиной порядка нескольких десятков ангстрем и различить аморфное и нанокристаллическое состояния вещества.

В **главе 2** рассмотрены материалы и методы, используемые для решения поставленных в настоящей работе задач, которые позволили определить характер износа покрытия и типы новообразованных трибокерамик. В качестве методов применялись:

- Растровая электронная микроскопия — для определения размера лунки износа и нароста с последующим построением графиков износа в координатах «длина лунки – длина резания» (JSM-35C, Япония).

- Просвечивающая электронная микроскопия — для исследования структурных изменений исследованных материалов, идентификации аморфных и кристаллических фаз.

- Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия — для определения фазового состава, электронной структуры покрытий и продуктов износа (ESCALAB MK2, VG, Англия).

- Микроскопия и спектроскопия Оже-электронов — для исследования структурных особенностей фаз, исследования микронеоднородностей химического состава и распределения элементов по поверхности наноламинатных покрытий (ESCALAB MK2, VG, Англия).

- Метод анализа тонкой структуры спектров потерь энергии электронов EELFS — для определения ближайшего атомного окружения в тонких пленках (ESCALAB MK2, VG, Англия).

- Времяпролетная масс-спектрометрия вторичных ионов — для построения глубинных профилей и трёхмерных карт распределения химических элементов, которые позволили детально представить исходную структуру нанесённых многослойных наноламинатных покрытий (TOF.SIMS 5, IONTOF GmbH, Германия).

- Рамановская спектроскопия — для использования в качестве экспресс-метода исследования фазового состава (ИнСпектр R532, Спектр-М, Россия).

В качестве материалов для исследования были использованы защитные покрытия на основе сплавов сложных нитридов (см. таблицу 1) различных конфигураций, которые наносились на подложки в виде твердосплавных фрез

Таблица 1 — Характеристика исследуемых покрытий на основе комплексных нитридов

Химический состав	Кристаллическая структура	Архитектура	Толщина покрытия, мкм	Твердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа
(TiAlCrSiY)N/ WN	B1 с малым количеством гексагональной фазы AlN	Нанокристаллическое многослойное	3	28.3	428
(TiAlCrSiY)N	B1	Нанокристаллическое однослойное		28.8	342
(TiAlCrSiY)N/ (TiAlCr)N	B1	Нанокристаллическое многослойное		30.2	547
(AlCrZrTiTa)N	B1	Нанокристаллическое однослойное		53.4	321

из карбида вольфрама KENNAMETAL KC5510 (CNGG432FS) методом ионно-плазменного магнетронного напыления с помощью экспериментальной PVD-установки AIP-SS002 (Kobe Steel Ltd., Япония). Толщина итогового покрытия составляла около 3 мкм с различным числом и толщиной бислоев в зависимости от времени напыления соответствующего слоя. Для лучшей адгезии покрытий подложка предварительно нагревалась до 600 °С.

В главе 3 с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics 5.6 было проведено компьютерное моделирование нагрева режущей пластины Kennametal KC5510 (CNGG432FS) в зависимости от образовавшихся на поверхности покрытия трибокерамик: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (муллит), CrO_2 и SiO_2 .

Работа модуля «Heat Transfer in Solids» заключается в решении методом конечных элементов формулы (1):

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = -\alpha T : \frac{dS}{dt} + Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность (кг/м^3), C_p – теплоёмкость при постоянном давлении ($\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$), T – абсолютная температура (К), u_{trans} – вектор скорости поступательного движения (м/с), q – передача теплоты посредством теплопроводности (Вт/м^2), q_r – передача теплоты посредством излучения (Вт/м^2), α – коэффициент термического расширения (К^{-1}), S – второй тензор напряжения Пиолы–Кирхгофа (Па), Q – дополнительные тепловые источники (Вт/м^3).

На рисунке 1 видно, что возникновение пленок трибооксидов типа муллит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) при нагреве в зоне резания значительно снижает коэффициент теплопроводности. Эти пленки выполняют термобарьерную функцию, защищая режущий инструмент от перегрева. Вместе с этим заметно, что такие теплоустойчивые покрытия отражают тепловую энергию в обрабатываемый металл и стружку, причем нагрев стружки является предпочтительным. Моделирование показало, что вследствие образования плёнок муллита на поверхности резца значительный нагрев объема металла происходит даже за пределами активной зоны резания.

В главе 4 проведены квантово-химические расчеты влияния добавок Si, Y и Hf на окислительную способность основного нитрида $(\text{TiAlCr})\text{N}$. Расчеты проводились с использованием программного пакета ArgusLab 4.0.1. методом РМЗ, и впоследствии были сопоставлены с данными из других разделов настоящей работы. Показано хорошее согласование полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Квантово-химические расчеты молекулярных орбиталей в решётке нитрида TiAlCrHfN (представлена на рисунке 2) показали, что такие поливалентные металлы, как Ti^{+4} , $\text{Cr}^{+5,6}$, Hf^{+4} , Al^{+3} , формируют очень сложную электронную структуру. В многокомпонентном нитриде эти металлы образуют двойные и тройные межатомные связи с незаполненными π^* -орбиталями атомов азота.

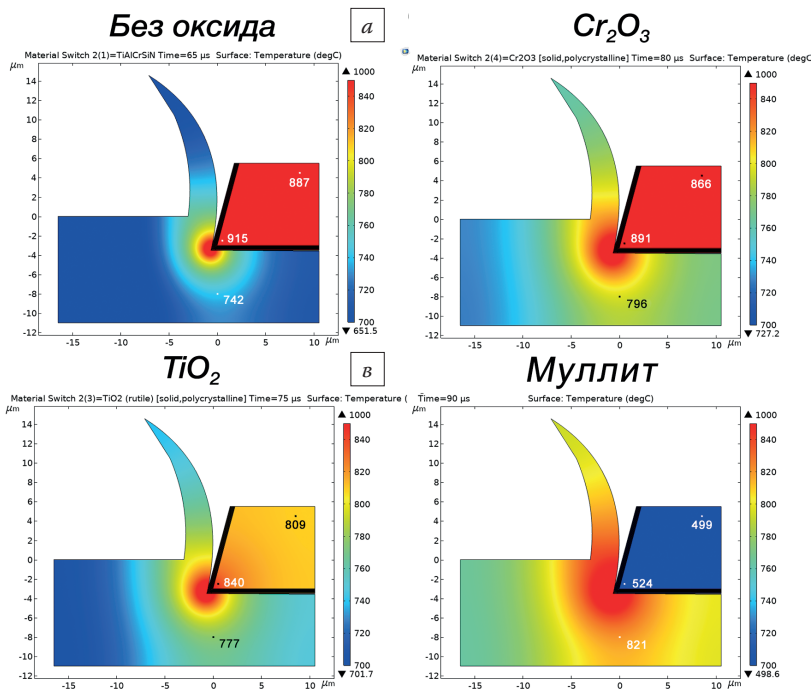


Рисунок 1 – Расчет методом конечных элементов распространения тепла в зоне резания штамповой стали в инструменте с покрытием (TiAlCrSi)N без трибопленок (а), с плёнками Cr_2O_3 (б), TiO_2 (в) и муллита (г)

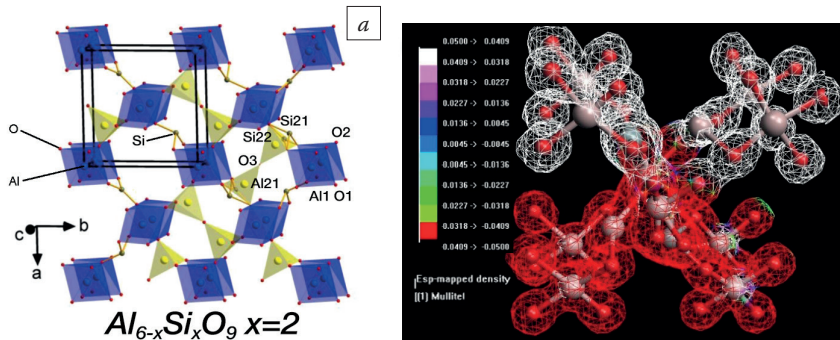


Рисунок 2 – Элементарная ячейка сложного оксида со структурой муллита на основе Al – Si – O (а) и рассчитанный электростатический потенциал (б)

Для обоих нитридных сплавов на основе TiAlCrYN и TiAlCrHfN на ранней стадии окисления возникает спиновая поляризация электронов на атомах кислорода в том случае, когда наблюдается гибридизация электронных уровней атома хрома с атомами азота. При этом формируется оксинитрид хрома, что установлено также по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Благодаря такому сильно поляризованному состоянию, где одна часть молекулы муллита обладает положительным потенциалом, а другая – отрицательным, такие тонкие слои одновременно обладают прекрасной адгезией к телу резца и работают как твердая смазка, существенно снижая коэффициент трения и предотвращая чрезмерное налипание обрабатываемого материала.

В главе 5 проведены испытания нитридных покрытий на резание различных инструментальных и теплоустойчивых сплавов.

В определении времени жизни инструмента критическую роль играют условия резания, такие как скорость реза, подача, глубина и сила реза и даже угол наклона инструмента по отношению к заготовке. Величина силы, которую испытывает контактная поверхность резания, можно выразить через формулу (2):

$$N_f = q_{e-f} \frac{d_w}{\sin k_r} h_f \approx \frac{HB}{3} \frac{d_w}{\sin k_r} h_f \left(\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right), \quad (2)$$

где q_{e-f} – контактное напряжение (кг/мм^2), d_w – глубина реза (мм), k_r – угол реза, h_f – ширина контактной поверхности (мм), HB – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю.

В качестве образца для наглядного сравнения преимущества адаптивных износостойких покрытий на основе комплексных нитридов была выбрана фреза производства фирмы Oerlikon Balzers с лучшим покрытием этого класса на основе AlTiN.

Длина резания определялась по формуле (3):

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \left(\frac{\text{м}}{\text{мин}} \right), \quad (3)$$

где D – диаметр заготовки по обрабатываемой поверхности (мм), n – частота вращения заготовки или инструмента, об/мин.

Как видно на рисунке 3, нитридные покрытия на основе однослойного (TiAlCrSiY)N даже в однослойном исполнении имеют существенные преимущества по сравнению с покрытиями фирмы Oerlikon Balzers при резании труд-

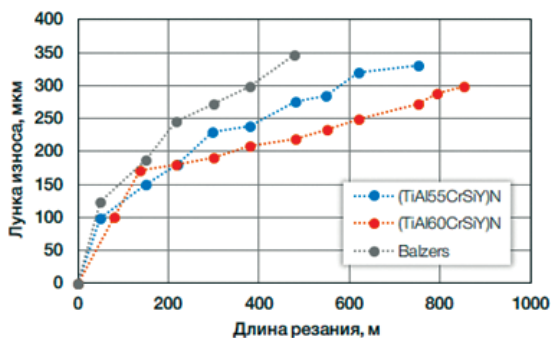


Рисунок 3 – Износостойкость однослойных износостойких покрытий при сухом резании со скоростью 60 м/мин жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР (47–48 HRC) в сравнении с лучшим покрытием этого класса AlTiN фирмы Oerlikon Balzers

нообрабатываемого авиационного сплава на основе никеля ХН45МВТЮБР (48 HRC) при сухом резании со скоростью 60 м/мин.

Даже в начальный период фрезерования ширина лунки износа у покрытия Balzers выше и составляет 124 мкм против 99 мкм и 100 мкм у однослойного нитридного покрытия с содержанием Al 55 ат.% и 60 ат.% соответственно. Значительная разница в износе сохраняется на всём промежутке процесса обработки. Видно, что покрытие Balzers перешло в стадию критического износа уже после 400 м, в то время как нитридные могут продолжать работать и после 700 м.

На рисунке 4 представлен график зависимости длины резания до минимального износа (с шириной лунки в 300 мкм) от скорости для многослойного (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N и однослойного (TiAlCrSiY)N покрытий при обработке инструментальной штамповой стали 4Х5МФ1С.

Скорость резания и глубина подачи подбирались с целью выхода на рабочие температуры обработки (до 1000 °С). Видно, что многослойное нитридное покрытие имеет заметное преимущество в сравнении с однослойным. При одинаковой скорости резания в 500 м/мин фреза с многослойным покрытием обработала на 124 м больше металла, нежели фреза с однослойным. С возрастанием скорости (а значит, и температуры) до 600 м/мин, разница немного сокращается, однако, сохраняется на всём диапазоне скоростей. Кроме того, многослойное покрытие позволяет ещё сильнее повысить скорость фрезерования, в то время как однослойное переходит в стадию критического износа и не способно дальше выполнять свою функцию. Дальнейшее увеличение скорости при резании данной штамповой стали одинаково губительно для обоих типов покрытия и приводит к его резкому изнашиванию и разрушению. Это подтверждает предположение о важности условий обработки для процессов адаптации подобных нитридных покрытий.

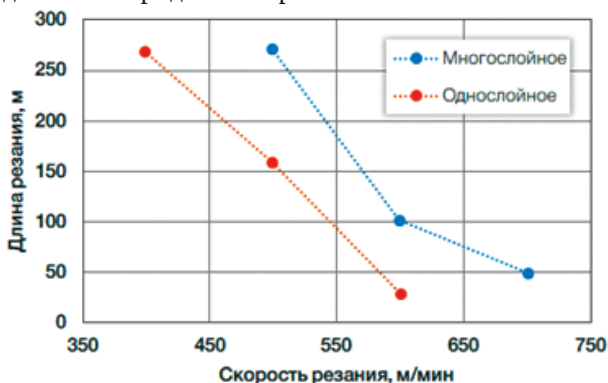


Рисунок 4 – Зависимость износа однослойного (TiAlCrSiY)N и многослойного (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N покрытий от скорости сухого резания штамповой стали 4Х5МФ1С с твердостью 53–55 HRC

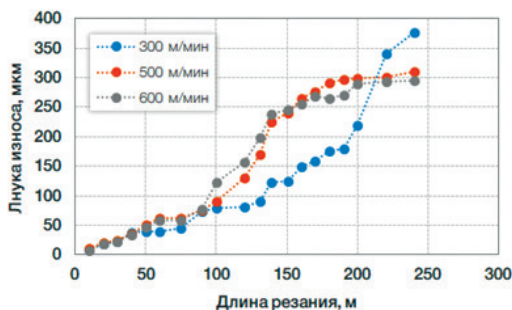


Рисунок 5 – Зависимость ширины лунки износа покрытий на основе (TiAlCrSiY)N/WN в зависимости от скорости резания

С целью изучения активности формирования трибооксидов поливалентными металлами было испытано покрытие на основе бислоев (TiAlCrSiY)N/WN точении инструментальной штамповой стали 4X5MФ1С.

Как видно на рисунке 5, покрытие при скорости резания 300 м/мин имело небольшое преимущество на стадии приработки по сравнению с работой при более высоких скоростях. Ширина лунки износа при этом не превышала 100 мкм.

Однако при резании на скорости 500 и 600 м/мин фаза приработки проходила значительно быстрее: уже после 150 м резания износ стабилизировался и наступала стадия установившегося нормального износа. В то время как при пониженной скорости резания в 300 м/мин износ покрытия резко возрастал уже после 200 м резания до лунки шириной 345 мкм (против 300 мкм у режимов с более высокой скоростью). Иными словами, покрытие проявляло свойства адаптации к условиям резания лишь при высоких скоростях обработки металла.

С целью определения параметров стойкости к износу покрытия на основе высокоэнтропийного сплава при резании нержавеющей стали AISI 304 фреза KC5510 была покрыта составом (AlCrZrTiTa)N в виде монослоя с примерно равной атомной концентрацией каждого из элементов.

Испытание, результаты которого изображены на рисунке 6, показало, что покрытие из высокоэнтропийного нитрида при 1200 м резания обладает большей износостойкостью по сравнению с традиционным покрытием на основе нитрида AlTiN, которое широко применяется для обработки штамповых сталей.

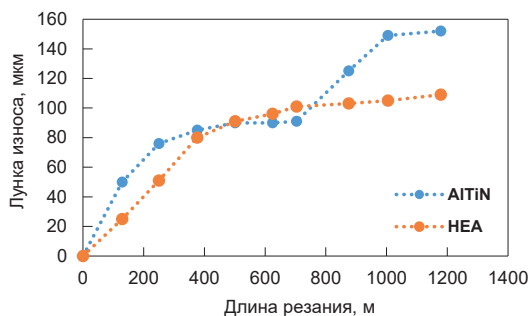


Рисунок 6 – Кривые износа режущего инструмента с различными нанесенными PVD-покрытиями при резании нержавеющей стали AISI 304

Видно, что несмотря на преимущество в виде меньшей лунки износа у AlTiN во время этапа приработки, фаза стабильного износа у данного покрытия наступает позже (после 1000 м), у ВЭС – уже после 400 м. Кроме того, заметно резкое изменение ширины лунки износа после 600 м у классического нитрида, что может привести к нежелательным вибрациям и ухудшению качества обрабатываемой поверхности заготовки при столь высокой скорости резания. В конечной точке эксперимента величина лунки износа составляет 100 мкм и 157 мкм для (AlCrZrTiTa)N и AlTiN соответственно.

В **главе 6** рассмотрен характер износа и образования нароста на поверхности нитридных покрытий различного состава и архитектуры после высокоскоростного сухого трения. Анализ характера износа и площади нароста играет важную роль для определения времени жизни режущего инструмента, так как чрезмерное его образование может привести к увеличенному износу и преждевременной поломке пластины.

Деформация покрытия на основе однослойного (TiAlCrSiY)N однослойного весьма значительна уже на ранней стадии износа. Данные просвечивающей электронной микроскопии нитридного покрытия под наростом подтверждают это положение. На рисунке 7 показана микроструктура нитридного покрытия на ранней стадии износа при длине резания 2 м.

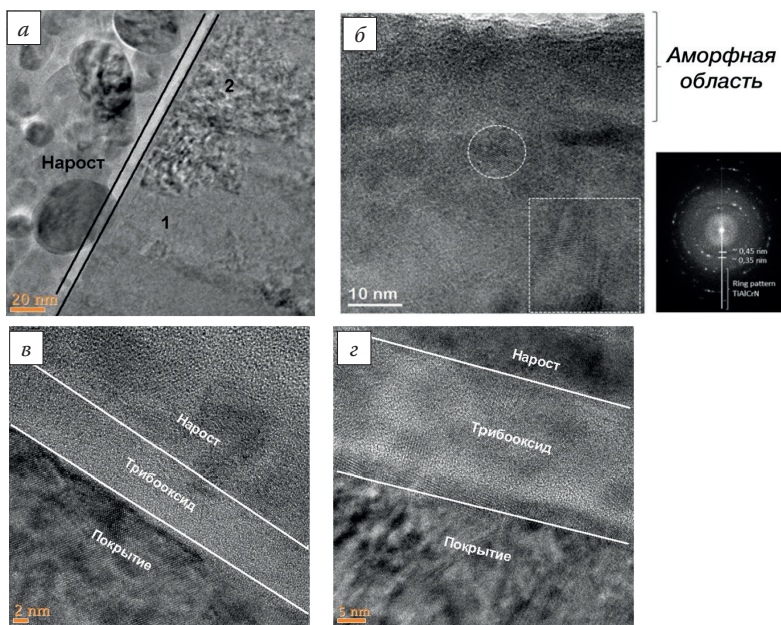


Рисунок 7 – Просвечивающая электронная микроскопия структуры поперечного сечения однослойного покрытия на разных стадиях износа при резании длиной 2 м (а), 15 м (б), 30 м (в) и 100 м (г) (светлое поле)

На поверхности покрытия сформировались нарост и аморфная пленка трибооксидов, которая представлена сплошными линиями. Под тонкой пленкой трибооксидов в массиве аморфизированного нитридного покрытия формируются области кристаллизации. Как представлено на рисунке 7, б, при увеличении длительности резания до 15 м покрытие аморфизируется по всему объему и кристаллические области занимают незначительный объем, что показано на электронограмме на врезке в рисунок.

При увеличении длительности резания до 30 м формируется пленка трибооксида толщиной порядка 4 нм под которой покрытие вновь кристаллизуется. При длине резания 100 м увеличивается толщина пленки трибооксидов до 20 нм, а нитридное покрытие частично кристаллизуется. То есть на начальных стадиях износа при резании под влиянием экстремальных локализованных деформаций в нитридном покрытии наблюдается периодность структурной аморфизации и кристаллизации, что свидетельствует о высокой степени неравновесности деформированного состояния приповерхностных слоев покрытия и в рамках термодинамики неравновесных процессов интерпретируется как признак самоорганизации.

На рисунке 8 заметно, что поверхность покрытия на основе высокоэнтропийного (AlCrZrTiTa)N частично изношена.

Длина кратера износа составляет 240 и 400 мкм при длине резания 130 и 260 м, соответственно. Адгезионный износ и разрушение нароста являются критическими моментами на этапе приработки. В нашем случае нарост покрывал поверхность менее 28 и 36 %, соответственно, для этих двух стадий резания. Отрыв нароста происходил без нарушения сплошности покрытия. Трибооксиды на поверхности, в зоне износа, снижают вероятность адгезионного износа покрытия на стадии устойчивого резания, что существенно увеличивает ресурс работы инструмента.

При понижении скорости резания с 600 до 300 м/мин уже на стадии приработки формируется нарост на поверхности покрытия на основе сплава (TiAlCrSiY)N/WN, который после 200 м резания приводит к выкрашиванию по-

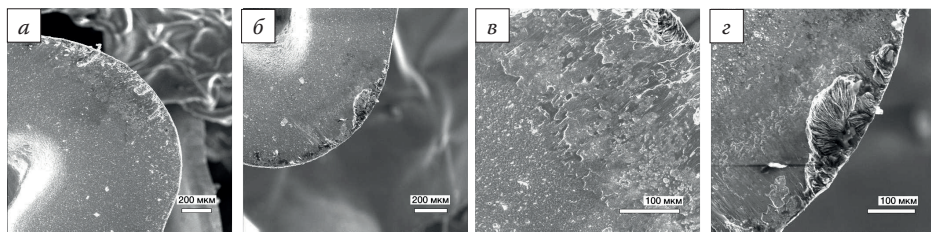


Рисунок 8 – Изображение износа задней грани режущей пластины с высокоэнтропийным (AlCrZrTiTa)N покрытием после 130 м (а, в) и 260 м (б, з) резания

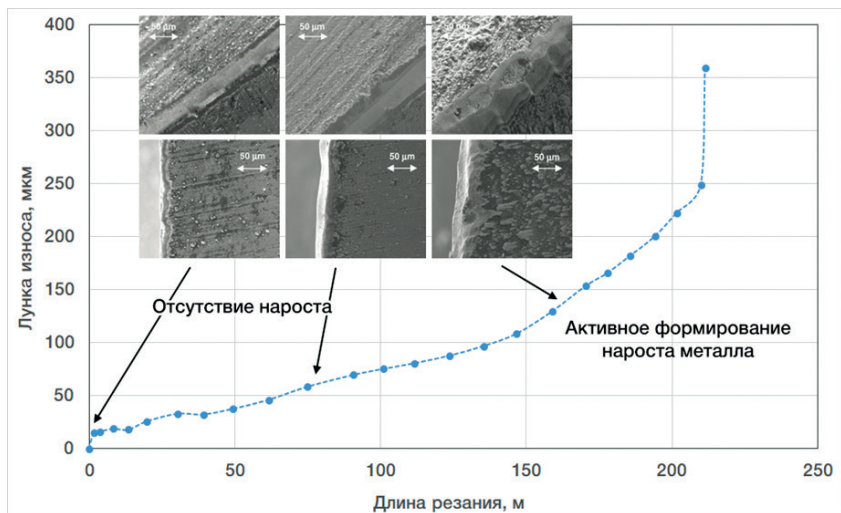


Рисунок 9 – Микроструктурная картина износа концевой фрезы с покрытием на основе (TiAlCrSiY)N/WN в зависимости от длины резания при скорости сухого резания 300 м/мин

крытия и ускоренному износу режущего инструмента, как это видно на рисунке 9.

Адаптация (TiAlCrSiY)N/WN покрытия в условиях резания наблюдается только при весьма высоких скоростях, что и определяет его функциональные свойства.

В главе 7 изучены химический и фазовый составы и структура образованных трибопленок методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, Оже-микроскопии и времяпролетной спектрометрии вторичных ионов.

Уже на начальной стадии износа на поверхности покрытия возникают пленки трибооксидов островкового типа. Химический и фазовый состав оксидных пленок зависит от температуры в области контакта со стружкой. Фазовый состав трибооксидов изменяется во время процесса металлообработки. Оксиды со слабой адгезией уносятся со стружкой из зоны резания. К таким, например, относятся оксиды титана TiO_2 со кристаллической структурой наподобие рутила.

На рисунке 10 представлены результаты компьютерной обработки в программном пакете Unifit 20.06 элементных линий соединений хрома Cr, титана Ti и алюминия Al на фотоэлектронных спектрах лунки износа на поверхности многослойного покрытия (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N после резания стали 4X5MФ1С со скоростью 60 м/мин на длине 30 м.

Эти элементы присутствуют в виде неравновесных нитридов и оксидов. Наличие на спектре Cr^{2p} компонент $\text{Cr}^{4+}\text{-O}$, Cr-N означает, что на этой стадии износа возникает оксинитрид Cr (см. рисунок 10, а). Заметно наличие образования нитридов и оксидов титана на рисунке 10, б. На спектре рисунка 10, в дублет

Al 2s объясняется присутствием межатомных связей Al–N и Al–O в связи с неполным окислением Al на поверхности нитридного покрытия в исследуемой зоне.

Анализ химических сдвигов на рентгеновских фотоэлектронных спектрах, представленных на рисунке 11, позволил идентифицировать межатомные взаимодействия и фазовый состав поверхности износа. Как видно на рисунке 11, а,

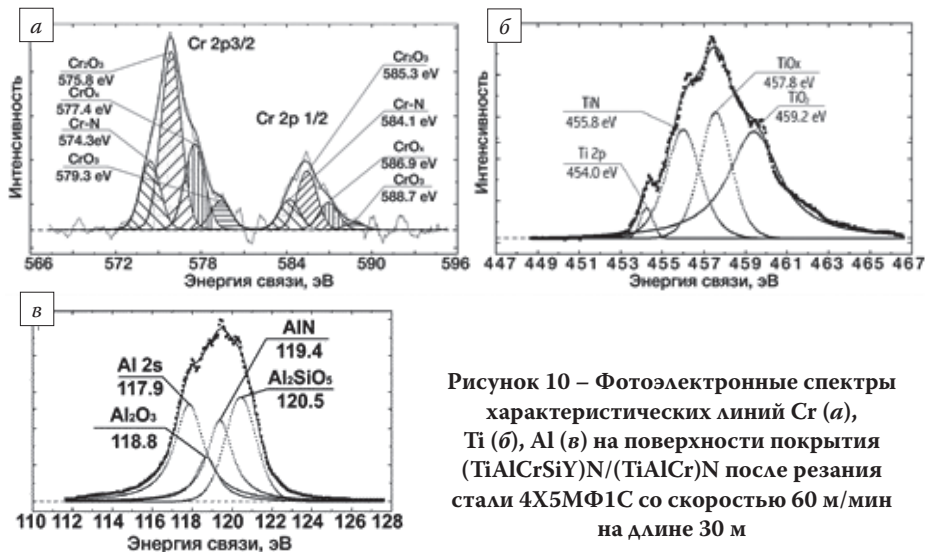


Рисунок 10 – Фотоэлектронные спектры характеристических линий Cr (а), Ti (б), Al (в) на поверхности покрытия (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N после резания стали 4Х5МФ1С со скоростью 60 м/мин на длине 30 м

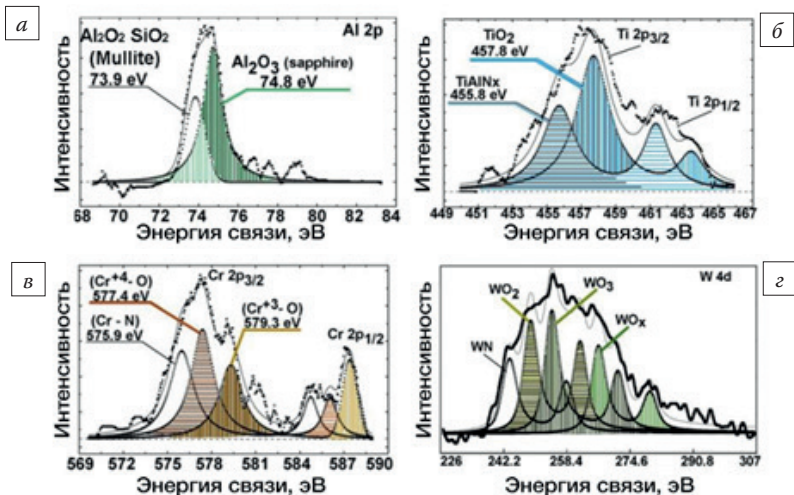


Рисунок 11 – Рентгеновские фотоэлектронные спектры от дуки износа концевой фрезы с (TiAlCrSiY)N/WN покрытием при длине резания 50 м штамповой стали со скоростью 600 м/мин

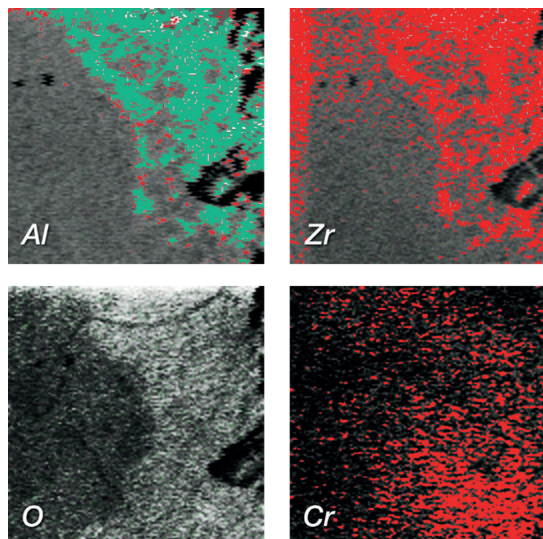


Рисунок 12 – Карты распределения Al, Zr, O, Cr в лунке износа после 260 м резания по данным Оже-микроскопии

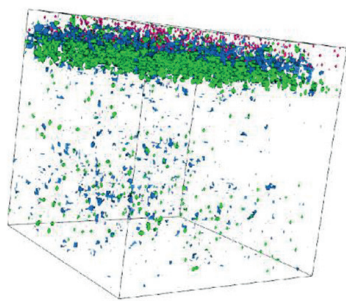
алюминий наряду с Al_2O_3 образуют сложный оксид с кремнием – муллит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Титан окисляется до оксида типа рутил TiO_2 (см. рисунок 11, б). Кроме того, было определено, что поливалентные элементы (такие как Cr и W) в многослойном покрытии (TiAlCrSiY) N/WN образуют гамму оксидов, тем самым повышая стойкость такого покрытия к износу (см. рисунки 11, в и 11, г).

На рисунке 12 показаны карты распределения элементов Al, Zr, O и Cr для покрытия на основе однослойного высокоэнтропийного нитрида (AlCrZrTiTa)N. Прежде всего,

Оже-изображения показывают, что трибопленки образуют островковые узоры, которые указывают на их динамическое зарождение, разрушение и повторное появление. Кроме того, пленки муллита не перекрывают пленки оксида хрома.

Использованный в работе метод комбинационного рассеяния света показал, что на стадии приработки структурные колебательные пики соответствуют межатомным расстояниям в оксидных и нитридных фазах при износе 130 м, при этом формируется оксид хрома. Оксиды CrO_2 и муллитоподобный оксид алюминия-циркония возникают на поверхности износа после резания в течение 260 м. Несмотря на высокую стойкость к сильному окислению высокоэнтропийных фаз, в условиях высоких температур и локальной интенсивной пластической деформации на покрытии (AlCrZrTiTa)N при сухом высокоскоростном резании образуются трибооксидные пленки различного химического состава. На ранней стадии образуется равновесный трибооксид хрома Cr_2O_3 ; на более поздней стадии – муллитоподобные ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2$), TaO_2 и CrO_2 .

Применение современного метода времяпролётной масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) с использованием спектрометра IONTOF.SIMS5 представить объемную картину формирования пленок трибооксидов. Благодаря высокой чувствительности и 3D-профилированию, можно установить распределение химических элементов и соединений по глубине. Кроме того, данный метод ВИМС позволил установить, что на поверхности многослойного



3D визуализация: Cr_2O_3^+ , TiO_2^+ , AlO^+

Рисунок 13 — 3D-распределение оксидов при отжиге многослойного покрытия (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N в течение 45 минут при температуре 700 °С (времяпролетная масс-спектропия)

покрытия (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N оксид хрома Cr_2O_3 формируется первым, затем возникает оксид титана TiO_2 , и наконец, алюминия Al_2O_3 . После удаления этих оксидов стало возможным определить перераспределение Si и Y в многослойном покрытии ниже окисленного слоя. На рисунке 13 представлено распределение элементов глубже 140 мкм от поверхности при модельном отжиге до температуры 700 °С пластины с нитридным покрытием на основе (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N в течение 45 мин. Превосходная чувствительность метода (до 10^{15} ат/см³) позволила обнаружить, что ионы оксидов алюминия Al_2O_3 и титана TiO_2 диффундируют

на значительную глубину режущей пластины на основе WC-Co.

В главе 8 методом анализа протяженной тонкой структуры спектров потери энергии отраженных электронов EELFS определена роль наноструктурного состояния в причине аномального изменения физических и тепловых свойств трибопленок.

В ходе эксперимента были получены спектры потери энергии электронов вблизи линии упруго-рассеянных электронов. Для определения длины межатомных связей в ближайших координационных сферах (усредненные и парциальные функции радиального распределения) в работе применялся Фурье-анализ амплитудной модуляции EELFS спектра следующего вида (4):

$$F(R) = \int_{K_{min}}^{K_{max}} \chi(k) \cdot k^n \cdot W(k) \cdot \sin(kR) dk \quad (4)$$

где $k \sim \sqrt{E_0 - E}$, $\chi(k)$ соответствует модуляциям интенсивности тонкой структуры; k_{min} и k_{max} – начало и окончание спектра, k^n – безразмерный фактор; $W(k)$ – весовая функция, часто $W(k) = 1$.

Рисунок 14 содержит информацию о размещении атомов на поверхности износа покрытия (TiAlCrSiY)N/WN и межатомных расстояниях в ближайших координационных сферах для участка нитрида, плёнок оксида алюминия, муллита и оксида хрома. Интерпретация данных спектроскопии проводилась сопоставлением обнаруженных межатомных расстояний со стандартными функциями радиального распределения для фаз известного состава. Фазовый состав пленок трибооксидов по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и EELFS согласуются между собой. Определено, что ближний порядок в атомном размещении наблюдается лишь на расстояниях менее

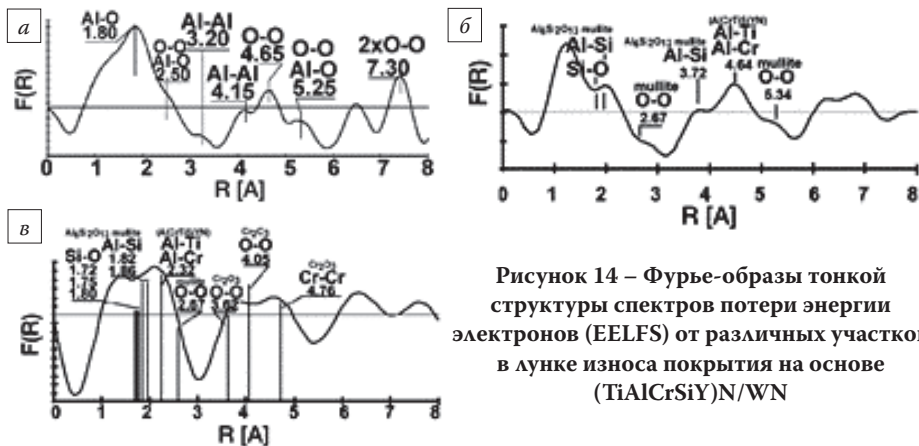


Рисунок 14 – Фурье-образы тонкой структуры спектров потери энергии электронов (EELS) от различных участков в лунке износа покрытия на основе (TiAlCrSiY)N/WN

5 – 6 $\text{\AA}$. Это говорит о том, что плёнки трибооксидов преимущественно имеют аморфное структурное состояние.

Проведенный анализ методом EELS позволил сделать вывод о том, что при износе покрытия существенно уменьшается концентрация свободных электронов в покрытии и формируются на поверхности пленки новых фаз, в результате окисления и схватывания обрабатываемого металла. Снижение концентрации свободных электронов в покрытии обусловлено накоплением дефектов кристаллического строения и формированием вокруг них облаков свободных электронов. Этот эффект известен и наблюдается при пластической деформации металлов и сплавов.

В главе 9 предложена феноменологическая модель самоорганизации (адаптации) наноструктурированных покрытий при резании.

На рисунке 15 представлена схема структурной трансформации нитридного покрытия и фазово-структурной трансформации динамически возникающих трибооксидов на его поверхности.

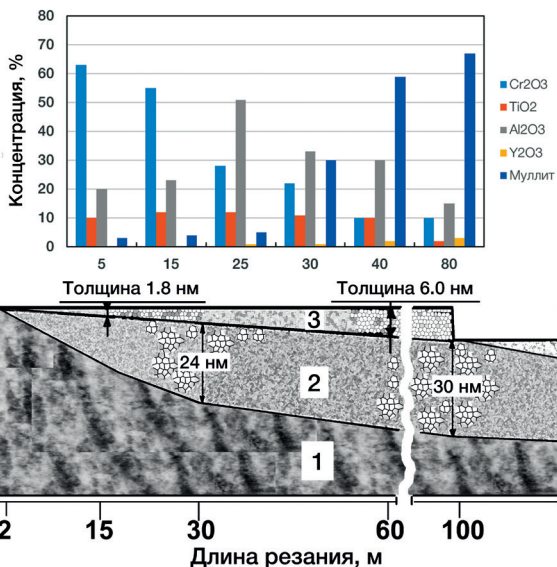


Рисунок 15 – Схема фазовых и структурных превращений в однослойном покрытии на основе (TiAlCrSiY)N при резании стали H13 со скоростью 600 м/мин

Как показано на рисунке 15, *а*, химический состав трибооксидов на поверхности изменяется в ходе резания. На рисунке 15, *б* изображены три области: 1 – недеформированная область покрытия; 2 – сильно деформированная область покрытия, в которой наблюдается периодическая аморфизация и динамическая рекристаллизация структуры; 3 – пленка защитных трибооксидов, которая возникает и уносится стружкой в ходе резания.

Фазовый состав лунки износа лишь приблизительно характеризует реальную динамику окисления в зоне контакта. Этот состав характеризует наиболее устойчивые фазы, оставшиеся на поверхности в результате износа. Менее устойчивые фазы в процессе износа удаляются из зоны трения. Это свидетельствует о селективности износа при трибоокислении. Наблюдаемая картина фазово-структурной самоорганизации является следствием накопления и рассеяния энергии по различным каналам. Схема упрощенно представляет периодичность структурно-фазовой перестройки поверхности при резании и не учитывает ряда дополнительных условий, которые могут усложнить общую картину. Но принцип периодичности является основополагающим при самоорганизации покрытия в условиях далеких от равновесных, полностью согласуется с представлениями термодинамики неравновесных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На поверхности износа PVD-покрытий из сплавов на основе сложных нитридов при сухом высокоскоростном резании возникают тонкие защитные пленки оксидов с аморфно-нанокристаллической структурой, близкие по составу к Cr_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 (сапфир) и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2)$ (муллит). Как показали испытания на резание сталей и сплавов различных составов, адаптирующиеся покрытия значительно превосходят классические защитные на основе TiAlN . Такое преимущество объясняется тем, что тонкие пленки трибооксидов, сформированные в жестких условиях металлообработки, обладают низкими коэффициентами трения и теплопроводности, работая в качестве твердой смазки и защищая инструмент.

2. Установлен факт периодической аморфизации и кристаллизации структуры нанокристаллических покрытий и защитных трибопленок на их поверхности. Количество и фазовый состав пленок трибооксидов изменяется с течением времени во всем диапазоне процесса сухого высокоскоростного резания. Возникновение пленок трибооксидов изменяет теплофизические условия в зоне резания и локализует объем области фазовой и структурной перестройки в зоне резания, что соответствует признакам адаптации материала с позиций термодинамики неравновесных процессов.

3. Установлено, что нанопленки трибооксида со структурой муллита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, образованные на этапе приработки, значительно снижают температуру вблизи зоны резания по сравнению с пленками оксидов хрома Cr_2O_3 .

и титана TiO_2 и выполняют термобарьерную функцию, защищая режущий инструмент из WC-Co от перегрева. С увеличением длительности резания объёмная доля плёнок муллита возрастает.

4. Установлено, что легирующие добавки Hf и Y в составе покрытия из сплава на основе многокомпонентного нитрида (TiAlCrSi)N при резании слабо образуют трибооксиды, они участвуют в формировании металлических межатомных связей и пластифицируют нитрид. При поиске легирования нитридных покрытий тугоплавкими элементами необходимо квантово-химическими расчетами определять их окислительную способность в структуре многокомпонентного сплава на основе сложного нитрида, принимая во внимание различие их свойств в свободном состоянии и в кристаллической структуре многокомпонентного сплава.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

Статьи в рецензируемых международных и российских научных изданиях, входящих в список ВАК, Web of Science и Scopus:

1. Fox-Rabinovitch G., Dosbaeva G., Yamamoto K., Paiva J., Kovalev A., **Konovalev E.** et al. «Enhancement of Multi-Scale Self-Organization Processes during Inconel DA 718 Machining through the Optimization of $\text{TiAlCrSiN}/(\text{TiAlCr})\text{N}$ Bi-Nano-Multilayer Coating Characteristics» // Materials. – 2022. – Т. 15. – № 4. – Р. 1329–1344. (1.88 п.л./0.26 п.л.).

2. Kovalev A.I., Vakhrushev V.O., **Konovalev E.P.** et al. «Damage accumulation phenomena in multilayer (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N, monolayer (TiAlCrSiY)N coatings and silicon upon deformation by cyclic nanoindentation» // Nanomaterials. – 2022. – Т. 12. – № 8. – Р. 1312–1320. (1 п.л./0.19 п.л.).

3. Ковалев А.И., Вахрушев В.О., Вайнштейн Д.Л., **Коновалов Е.П.** и др. «Новый уровень развития масс-спектропии вторичных ионов для материаловедения» // Металлург. – 2022. – № 11. – С. 66–78. (1.5 п.л./0.25 п.л.). (Переводная версия: Kovalev A.I., Vakhrushev V.O., Wainstein D.L., **Konovalev E.P.** et al. «New Level of Development of Secondary Ion Mass Spectroscopy for Materials Science» // Metallurgist. – 2023. – Т. 66. – № 11. – Р. 1412–1429. (2.12 п.л./0.35 п.л.).

4. Kovalev A.I., Vakhrushev V.O., **Konovalev E.P.**, Fox-Rabinovich G.S., Wainstein D.L., Dmitrievskii S.A., Mukhsinova A.D. «Features of the Oxidation of Multilayer (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N Nanolaminated PVD Coating during Temperature Annealing» // Coatings. – 2023. – Т. 13. – № 2. – Р. 287–295. (1 п.л./0.22 п.л.).

5. Kovalev A., Wainstein D., **Konovalev E.**, Vakhrushev V., Fox-Rabinovich G., Fox-Rabinovich M., Tomchuk A. et al. «Features of Tribooxidation of the High-Entropy Coating (Al-CrZrTiTa)N during Dry High-Speed Cutting» // Coatings. – 2023. – Т. 13. – № 9. – Р. 1508–1516. (1 п.л./0.23 п.л.).

6. Ковалев А.И., Вайнштейн Д.Л., **Коновалов Е.П.** и др. «Термобарьерные и антифрикционные свойства трибокерамик на поверхности режущего инструмента с (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N покрытием при высокоскоростном сухом резании» // Металлург. – 2024. – № 7. – С. 53–60. (0.88 п.л./0.19 п.л.). (Переводная версия: Kovalev A.I., Wainstein D.L., **Konovalev E.P.**, Vakhrushev V.O., Dmitrievskii S.A., Tomchuk A.A.

«Thermobarrier and antifriction properties of triboceramics on the surface of a cutting tool with (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N coating during high-speed dry cutting» // Metallurgist. – 2024. – № 7. – С. 53–60. (0.88 п.л./0.19 п.л.).

7. Kovalev A.I., Wainstein D.L, **Konovalev E.P.** et al. «The role of interatomic interactions in the tribooxidation and wear of the multilayer Ti_{0.2}Al_{0.55}Cr_{0.2}Si_{0.03}Y_{0.02}N/Ti_{0.25}Al_{0.65}Cr_{0.1}N coating at severe cutting conditions» // Metallurgist. – 2024. – Т. 68. – № 3. – С. 477–484. (0.88 п.л./0.21 п.л.).

8. Kovalev A.I., Wainstein D.L, **Konovalev E.P.** et al. «Damage Accumulation Phenomena in Multilayer (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N, Monolayer (TiAlCrSiY)N Coatings and Silicon upon Deformation by Cyclic Nanoindentation» // Nanotechnologies and Nanomaterials: Selected Papers from CCMR—Volume II. – 2024. – С. 28–36. (1 п.л./0.24 п.л.).

9. Ковалев А.И., **Коновалов Е.П.**, Вахрушев В.О., Вайнштейн Д.Л., Дмитриевский С.А. «Износ высокоэнтропийного (НЕС) ионно-плазменного (AlCrZrTiTa)N покрытия при высокоскоростном сухом резании» // Станкоинструмент. – 2025. – Т. 1. – С. 62–68. DOI: 10.22184/2499-9407.2025.38.1.62.68. (0.75 п.л./0.2 п.л.).

Прочие публикации:

1. Ковалёв А.И., Вайнштейн Д.Л., Вахрушев В.О., **Коновалов Е.П.**, Беаке Б.Д., Дмитриевский С.А. «Особенности накопления повреждений в многослойном (TiAlCrSiY)N / (TiAlCr)N и однослойном (TiAlCrSiY)N покрытиях и кремнии во время деформации методом циклического наноиндентирования» //Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2022)». Сборник научных трудов. – 2022. – С. 186–193. (0.88 п.л./0.22 п.л.)

2. Ковалев А.И., Вайнштейн Д.Л., **Коновалов Е.П.**, Вахрушев В.О., Дмитриевский С.А., Ражковский А.Ю. и др. «Особенности трибоокисления высокоэнтропийного покрытия (AlCrZrTiTa)N во время высокоскоростного сухого резания» //Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2023)». Сборник научных трудов. – 2023. – С. 158–167. (1.12 п.л./0.31 п.л.)

3. Ковалев А.И., Вайнштейн Д.Л., Вахрушев В.О., **Коновалов Е.П.**, Атаманов С.М., Томчук А.А. «Трибоокисление как основной механизм самоорганизации многослойных наноламинатных покрытий на режущем инструменте для высокоскоростного сухого резания» // Международная научно-техническая конференция «Технологическое обеспечение машиностроительных производств». Сборник научных трудов. – 2024. – С. 101–108. (0.88 п.л./0.2 п.л.)

4. Ковалев А.И., Вайнштейн Д.Л., **Коновалов Е.П.** «Статистический и фрактальный анализы накопления повреждений и разрушения гетерофазных сталей и покрытий» // XVII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». Сборник трудов. – 2025. – С. 24–42. (2.25 п.л./0.8 п.л.)