

На правах рукописи



Баранова Наталья Сергеевна

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ
ПЕРИОДА МОДУЛЯЦИИ НАНОСЛОЕВ

Специальность
2.5.5 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

- Научный руководитель:** **Верещака Алексей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
- Официальные оппоненты:** **Каменева Анна Львовна**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;
- Попов Андрей Юрьевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Защита состоится 24 декабря 2024 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: https://stankin.ru/pages/id_115/page_1492.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.01, к.т.н.

Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие современных технологий предопределяет необходимость дальнейшего повышения производительности обработки материалов. Несмотря на развитие аддитивных технологий обработка резанием остается ключевой технологической операцией обработки металлов. При том, что титановые сплавы обладают рядом полезных свойств и широко применяются для изготовления ответственных деталей в различных областях промышленности, их обработка сопряжена с рядом проблем, что сдерживает более широкое применение данного материала. Такие свойства титана и его сплавов, как низкая плотность в сочетании с низкой теплопроводностью, оказывают существенное влияние на процесс обработки этих материалов, затрудняя процесс резания. Указанные особенности ведут к повышенному износу режущего инструмента, вынуждая использовать низкие скорости резания, что снижает общую производительность процесса резания и эффективность производства в целом. Применение износостойких покрытий является одним из важных ресурсов повышения режущих свойств инструмента. В свою очередь, сами покрытия находятся в процессе непрерывного развития, основными направлениями которого являются оптимизация элементного состава и управление архитектурой. В ряде работ было показано, что покрытия с идентичным элементным составом, но разными параметрами архитектуры демонстрируют существенно отличающиеся свойства. В частности, покрытия с нанослойной структурой обладают лучшими барьерными свойствами по отношению к окислительным и диффузионным процессам, большей твердостью и трещиностойкостью по сравнению с монокристаллическими покрытиями аналогичного состава. Одним из ключевых параметров архитектуры покрытий является величина периода модуляции λ и обусловленные ей толщины нанослоев. Рационально подобранные значения данных параметров позволяют обеспечить дополнительное повышение свойств инструмента с покрытием. Величина λ оказывает существенное влияние на износостойкость и трибологические свойства, величину остаточных напряжений и стойкость к окислению и, в итоге, на процесс изнашивания инструмента: при меньших значениях λ доминируют адгезионно-усталостные процессы, а при больших – окислительные процессы. При малых значениях λ наблюдаются свойственные для наноструктур изменения в механизме пластической деформации покрытий.

Степень разработанности. Весомый вклад в разработку вопросов теории и практического применения режущего инструмента с покрытием и создание теории его проектирования внесли такие исследователи, как Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П., Верещака А.А., Vetter J., Кабалдин Ю.Г., Klocke F., Fox-Rabinovich G.S., Voxman R., Goldsmith S., Kumar C.S., Bouzakis K.-D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Beake B.D., Veprek S. и другие. В работах данных исследователей изучены и систематизированы вопросы применения инструмента с покрытиями для различных условий обработки. В результате анализа работ по данной тематике можно сделать вывод о том, что вопросы дальнейшего повышения свойств режущего инструмента за счет использования износостойких покрытий с рациональной структурой и элементным составом является актуальными и

значимыми для современной науки и практики. При том, что данный вопрос был всесторонне исследован ведущими специалистами и международными научными центрами, появление нового оборудования и методов исследования, а также новых вызовов в области резания металлов ставит задачи, которые пока не имеют эффективного решения. В частности, влияние параметров и характеристик нанослойной структуры на режущие свойства инструментов исследовано лишь на начальной стадии, практически отсутствуют работы, рассматривающие свойства покрытий с изменяющейся величиной периода модуляции.

Целью настоящей работы является повышение производительности обработки точением деталей из титанового сплава путем разработки и применения износостойких покрытий с переменной величиной периода модуляции нанослоев.

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

1. Установить функциональные связи между скоростью вращения поворотного стола в процессе осаждения и параметрами наноструктуры покрытий различного состава.

2. Исследовать зависимость эксплуатационных свойств покрытия (прочность адгезионной связи с субстратом, микротвердость, модуль упругости и др.) от параметров его нанослойной структуры, определить характер изменения периода модуляции, обеспечивающий наилучшие эксплуатационные свойства покрытия.

3. С целью предварительного изучения работоспособности покрытий с изменяющейся величиной периода модуляции исследовать влияние характера изменения нанослойной структуры (периода модуляции) покрытия на режущие свойства, характер изнашивания инструмента и механизм разрушения покрытий при точении стали 45.

4. Исследовать влияние характера изменения нанослойной структуры (периода модуляции) покрытия на режущие свойства и характер изнашивания инструмента при точении титанового сплава с различными скоростями резания.

5. На основе установленных закономерностей разработать покрытие с рационально подобранным характером изменения параметров наноструктуры (периода модуляции), обеспечивающее повышение скорости резания при сохранении периода стойкости режущего инструмента и, таким образом, позволяющее повысить производительность токарной обработки титанового сплава.

Объектом исследований являются многослойные наноструктурированные износостойкие покрытия с изменяющейся величиной периода модуляции, применяемые для повышения износостойкости твердосплавного режущего инструмента

Предметом исследования являются процессы формирования нанослойной структуры покрытия, закономерности взаимосвязи характера изменения периода модуляции нанослойной структуры с эксплуатационными свойствами покрытий и износостойкостью твердосплавных режущих инструментов при точении заготовок из титановых сплавов.

Научная новизна работы заключается в:

- предложены и обоснованы параметры наноструктуры покрытия (величина периода модуляции и характер его изменения), позволяющие повысить производительность процесса резания за счет повышения скорости резания при точении титановых сплавов при сохранении периода стойкости режущего инструмента;
- установлены функциональные связи между скоростью вращения поворотного стола вакуумно-дуговой установки при нанесении покрытия и величиной периода модуляции (параметром наноструктуры) покрытий различного состава;
- выявлены закономерности влияния характера изменения периода модуляции наноструктурированных покрытий на механизм разрушения (изнашивания) этих покрытий.

Теоретическая значимость работы. На основе проведенных исследований установлены функциональные связи между скоростью вращения поворотного стола вакуумно-дуговой установки при нанесении покрытия и величиной периода модуляции (параметром наноструктуры) покрытий различного состава, описан механизм разрушения (изнашивания) наноструктурированных покрытий с различным характером изменения периода модуляции наноструктуры покрытий.

Практическую значимость имеют следующие разработки:

1. Разработанная архитектура износостойких покрытий с переменной величиной периода модуляции нанослоев, способ и режимы получения данной архитектуры.
2. Рекомендации для выбора параметров наноструктуры покрытий, обеспечивающие повышение износостойкости твердосплавного инструмента и производительности процесса точения титановых сплавов.

Опытно-промышленные испытания, проведенные в производственных условиях, подтвердили высокую работоспособность твердосплавных инструментов с разработанными покрытиями. Результаты исследований приняты к внедрению в ООО «Нацпромальянс» и ООО «Промобработка».

Методы исследования. Работа выполнена на основе использования положений теории резания материалов, материаловедения и методов статистического анализа результатов экспериментальных исследований. Изучение механизмов влияния характера изменения величины периода модуляции нанослоев покрытий на свойства системы «инструментальный материал – покрытие – обрабатываемый материал» выполняли на основе современных методов металлографического и металлофизического анализов с использованием методик вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), энерго-дисперсионной спектрометрии (ЭДС), электронно-сканирующей (СЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) микроскопии, включая построение электронограмм и исследование элементного состава слоев покрытий.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Рационально подобранные параметры наноструктуры покрытия (величина периода модуляции и характер его изменения), позволяющие повысить производительность процесса резания за счет повышения скорости резания при

точении титановых сплавов при сохранении периода стойкости режущего инструмента.

2. Установленные функциональные связи между скоростью вращения поворотного стола вакуумно-дуговой установки при нанесении покрытия и величиной периода модуляции (параметром наноструктуры) покрытий различного состава.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность выводов и положений диссертационной работы подтверждается достаточным количеством непротиворечивых и повторяемых результатов экспериментальных исследований, полученных с использованием современного оборудования и аттестованных методик, а также применением статистических методов обработки полученных данных.

Апробация результатов работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение научных исследований в рамках государственного задания (проект № FSFS-2023-0003). Основные положения диссертационной работы были доложены на Международной научно-практической заочной конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия, 2024 год), Школе молодых ученых «Адаптивные материалы и покрытия для высокотехнологичных отраслей промышленности» (МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия, 2023 год), на кафедре цифровых и аддитивных технологий РТУ МИРЭА и кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» МГТУ «СТАНКИН».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа представляет собой научное обоснование новых технических решений, совершенствующих средства реализации процессов формообразования тел на этапе изготовления, за счет изучения связей физико-технических процессов, протекающих при удалении части объема материала и повышающих надежность и работоспособность средств реализации. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части п. 2 и п. 3 раздела «Области исследований» её паспорта.

Личный вклад автора. Диссертация является научно-исследовательской работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Автору работы принадлежит основная роль в постановке задачи исследования, получении и обработке экспериментальных данных, их анализе и обобщении всех полученных результатов. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы и обоснованы лично автором.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 5 статей в изданиях из перечня ВАК, 4 статьи в изданиях из базы цитирований Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы: основной текст

содержит 181 страниц, включая 63 рисунка и 7 таблиц; список литературы включает 216 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой научно-технической задачи, обозначена цель исследований, указаны методические и теоретические положения работы, изложена научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ и дано сравнение методов нанесения покрытий на режущие инструменты, показаны основные особенности и тенденции развития химико-термических (CVD) и физических (PVD) процессов осаждения покрытий, изложены тенденции совершенствования вакуумно-дуговых процессов (КИБ-МеVVA) осаждения покрытий на режущие инструменты. Большое внимание уделено исследованиям по повышению режущих свойств инструментов путем осаждения на их рабочие поверхности износостойких покрытий. Проведенный литературный анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Величина периода модуляции оказывает заметное влияние на свойства покрытия и режущие свойства инструмента.

2. Влияние периода модуляции на свойства покрытия нелинейно и имеет экстремальный характер.

3. В зависимости от условий резания (в первую очередь – от скорости резания, определяющей температуру в зоне резания, и марки обрабатываемого материала) наилучшие свойства демонстрируют покрытия с различной величиной периода модуляции. Не существует универсальной величины периода модуляции, обеспечивающей наилучшие режущие свойства инструмента при любых условиях резания.

4. При различных условиях резания наилучшие режущие свойства инструмента могут обеспечивать покрытия как с относительно большой (более 100 нм), так и с весьма малой (10 нм и менее) величиной периода модуляции.

5. Различия в величине периода модуляции покрытия, обеспечивающей наилучшие режущие свойства инструмента, связаны с доминирующими при конкретных условиях резания механизмами изнашивания инструмента (адгезионно-усталостный, абразивный, диффузионный и окислительный).

6. Величина периода модуляции покрытия, обеспечивающая наилучшие режущие свойства инструмента, связана также с составом покрытия.

В результате анализа литературных источников были сформулированы цели и задачи исследований, предусмотренные настоящей работой, дано теоретическое обоснование научных гипотез, в полном объеме сформулированных во второй главе.

Во второй главе на основе обобщения результатов литературного анализа были сформулированы рабочие гипотезы и определена методика проведения исследований, разработан алгоритм проведения экспериментов.

Для проведения исследований были выбраны покрытия с трехслойной архитектурой, включающей адгезионный, промежуточный и износостойкий слой, при этом износостойкий слой имел нанослойную структуру с изменяющейся величиной периода модуляции.

С целью разностороннего сопоставления свойств разработанных покрытий был составлен план проведения экспериментов, включающий измерение и исследование следующих параметров и свойств:

- микротвердость,
- значение величины критической нагрузки разрушения при скретч-тестировании и характер такого разрушения,
- коэффициент трения,
- период стойкости режущего инструмента,
- характер изнашивания режущего инструмента,
- характер трещинообразования в покрытиях, механика разрушения покрытий при резании,
- диффузионные и окислительные процессы в покрытиях при резании.

Исследуемые покрытия осаждались с использованием специально модернизированной установки ВИТ-2. Данная установка имеет три катодные системы, расположенные в горизонтальной плоскости, под углом 90° друг у другу. В средней позиции располагается испаритель системы filtered cathodic vacuum arc deposition (FCVAD), обеспечивающий максимальную (до 98 %) фильтрацию микрочастиц, а также высокую фокусировку плазменного потока, что обеспечивает формирование четко выраженной нанослойной структуры. На данную систему устанавливался катод Al (99,8 %). На два других испарителя системы Controlled Accelerated Arc (CAA-PVD) были установлены катоды Zr (99,9 %) или Ti (99,8 %) (в зависимости от состава покрытия) и Cr (99,8 %). Осаждение покрытий для проведения предварительных экспериментов по точению заготовок из стали 45 проводилось по следующей схеме. Для покрытий V1-1 и V1-2 в процессе осаждения износостойкого слоя через каждые 5 минут осаждения изменялась скорость вращения поворотного стола. Для покрытия V1-1 скорость вращения уменьшалась, а для покрытия V1-2 – увеличивалась (табл. 1).

Таблица 1. Условия формирования нанослойной структуры покрытий для образцов серии V1 и V2.

Образец	Интервал, минуты						
	0...5	5...10	10...15	15...20	20...25	25...30	30...35
	Скорость вращения поворотного стола						
V1-1	4,00	3,00	2,00	1,50	1,00	0,50	0,25
V1-2	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00	4,00
V1-3	1,5 (постоянная)						
V2-1	4,00	3,00	2,00	1,50	1,00	0,50	0,25
V2-2	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00	4,00
V2-3	4,00	2,00	0,50	0,25	0,50	2,00	4,00
V2-4	0,25	0,50	1,00	2,00	1,00	0,50	0,25
V2-5	1,50 (постоянная)						

Референтное покрытие V1-3 осаждалось при постоянной скорости вращения стола 1,5 об/мин. Для проведения экспериментов по точению заготовок из титанового сплава ВТ6 были изготовлены образцы серии V2 (см. табл. 1). Кроме аналогичных серии V1 образцов с увеличивающимся и уменьшающимся периодом

модуляции, были изготовлены образцы V2-3 и V2-4 с периодом модуляции, изменяющимся от наибольшего к минимальному и затем опять к наибольшему и в обратной последовательности, соответственно.

В качестве субстрата использовались твердосплавные пластины производства КЗТС (Россия). Использовались две марки твердого сплава, в соответствии с рекомендациями производителя: A10 (для титановых сплавов – группа S) (аналог ВК60М), H10 (для стали – группа P) (аналог Т15К6).

На основе литературного анализа и имеющегося опыта осаждения покрытий были выбраны параметры процесса. Предложены режимы осаждения, характеризующиеся рациональным сочетанием тока дуги I , величины потенциала смещения U_b на субстрате, давлением реакционного газа P и периодически изменяющейся частотой вращения поворотного стола n .

Твердость и модуль упругости покрытий измерялись на механическом автоматизированном тестере СВ-500 (Nanovea, США) с наномодулем. Применялся индентор Берковича, максимальная нагрузка составляла 200 мН, а скорость нагружения 400 мН/мин. Для каждого образца проводилось 10 измерений, после чего определялось среднее значение параметров.

Измерение прочности адгезионной связи с субстратом измерялась в соответствии с методикой ASTM C1624-05.

Для исследования нано- и микроструктуры покрытий использовались как сканирующий (СЭМ), так и просвечивающий (ПЭМ) микроскопы:

СЭМ Carl Zeiss EVO 50, с EDX системой X-Max – 80 мм² (OXFORD Instruments, Великобритания). Съемка проводилась обратно рассеянными электронами (20 кВ, 750 пА).

ПЭМ JEM 2100 (JEOL, Япония) использовался для наноструктурных исследований при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Элементный состав изучался с помощью ПЭМ с EDX системой INCA Energy (OXFORD Instruments, Великобритания). Изготовление образцов для ПЭМ осуществлялось сфокусированным ионным пучком (FIB) на оборудовании Strata 205 (FEI, США).

Механические свойства, морфология поверхности и структура покрытий.

Покрытия V1-1 и V1-2 имеют весьма близкие (с учетом погрешности измерений) значения твердости, однако твердость покрытия V1-3 несколько выше (табл. 2). Среди покрытий серии V2 максимальной твердостью обладает покрытием V2-3. Покрытия серии V1 в целом имеют несколько более высокую твердость по сравнению с покрытиями серии V2 с аналогичными параметрами структуры. Величины модуля упругости y всех покрытий практически идентична. Проведенные исследования прочности покрытий к разрушению при скретч-тесте показали достаточную для использования в качестве износостойких покрытий для металлорежущего инструмента величину параметров L_{c1} (начало разрушения покрытия) и L_{c2} (полное разрушения покрытия). Величина L_{c2} – не менее 35 Н для всех исследуемых покрытий.

Морфология поверхности исследуемых покрытий практически идентична. На поверхности присутствует относительно большое количество микрочастиц, сформировавшихся на завершающем этапе осаждения.

Таблица 2. Механические свойства исследуемых покрытий.

Обозначение покрытия	Твердость (HV)	Модуль упругости (ГПа)
V1-1	2676 ± 212	296 ± 43
V1-2	2599 ± 124	317 ± 61
V1-3	3121 ± 243	327 ± 21
V2-1	2556 ± 197	275 ± 34
V2-2	2418 ± 217	292 ± 57
V2-3	2914 ± 317	310 ± 45
V2-4	2834 ± 210	255 ± 28
V2-5	2768 ± 191	272 ± 38

Структура исследуемых покрытий серии V1 на поперечном разрезе представлена на рис. 1. Рассматриваемые покрытия имеют очевидное нанослойное строение, у покрытий V1-1 и V1-2 можно видеть изменение (соответственно, увеличение и уменьшение) периода модуляции λ , у покрытия V1-3 данная величина остается неизменной. На рис. 2 представлены результаты исследования нанослойной структуры покрытий серии V2. При идентичных условиях осаждения с точки зрения параметров процесса имеется некоторое различие в величинах периода модуляции, что может быть обусловлено различным элементным составом покрытий. В результате обработки полученных данных были установлены закономерности влияния параметра процесса осаждения (частота вращения поворотного стола) на параметры наноструктуры покрытия (величина периода модуляции). Данные закономерности в виде графиков представлены на рис. 3.

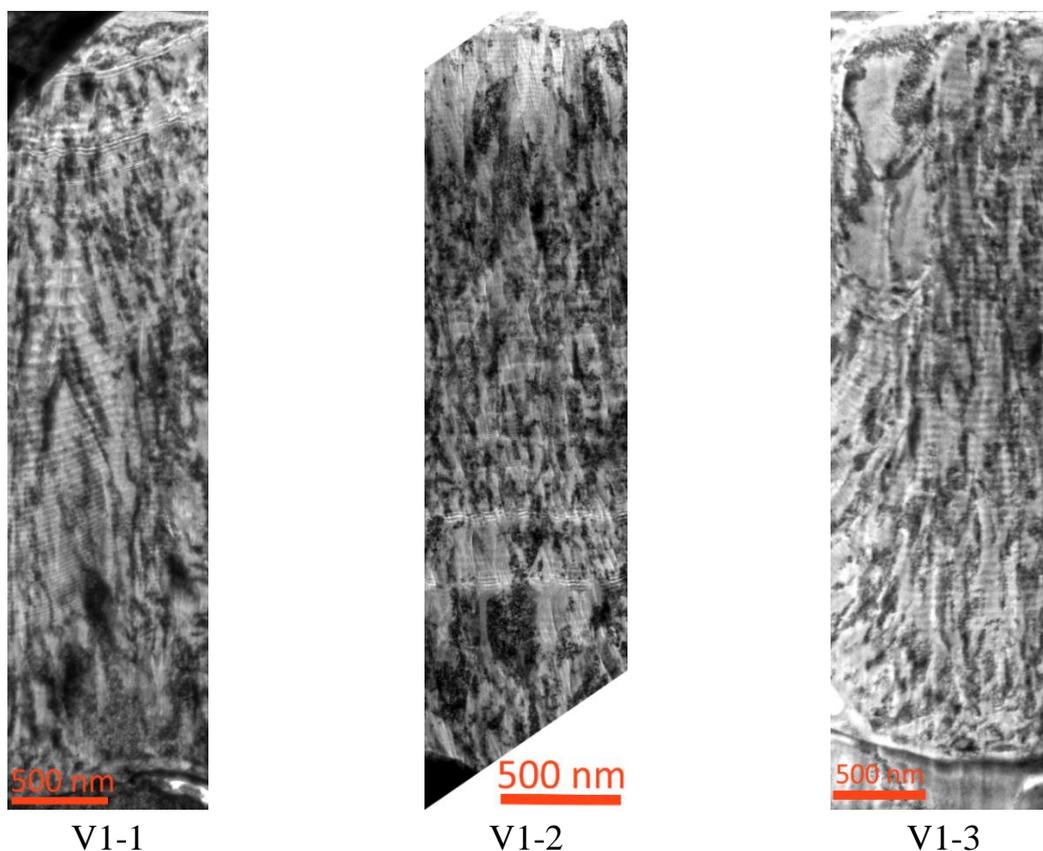


Рис. 1. Структура исследуемых покрытий серии V1 на поперечном разрезе

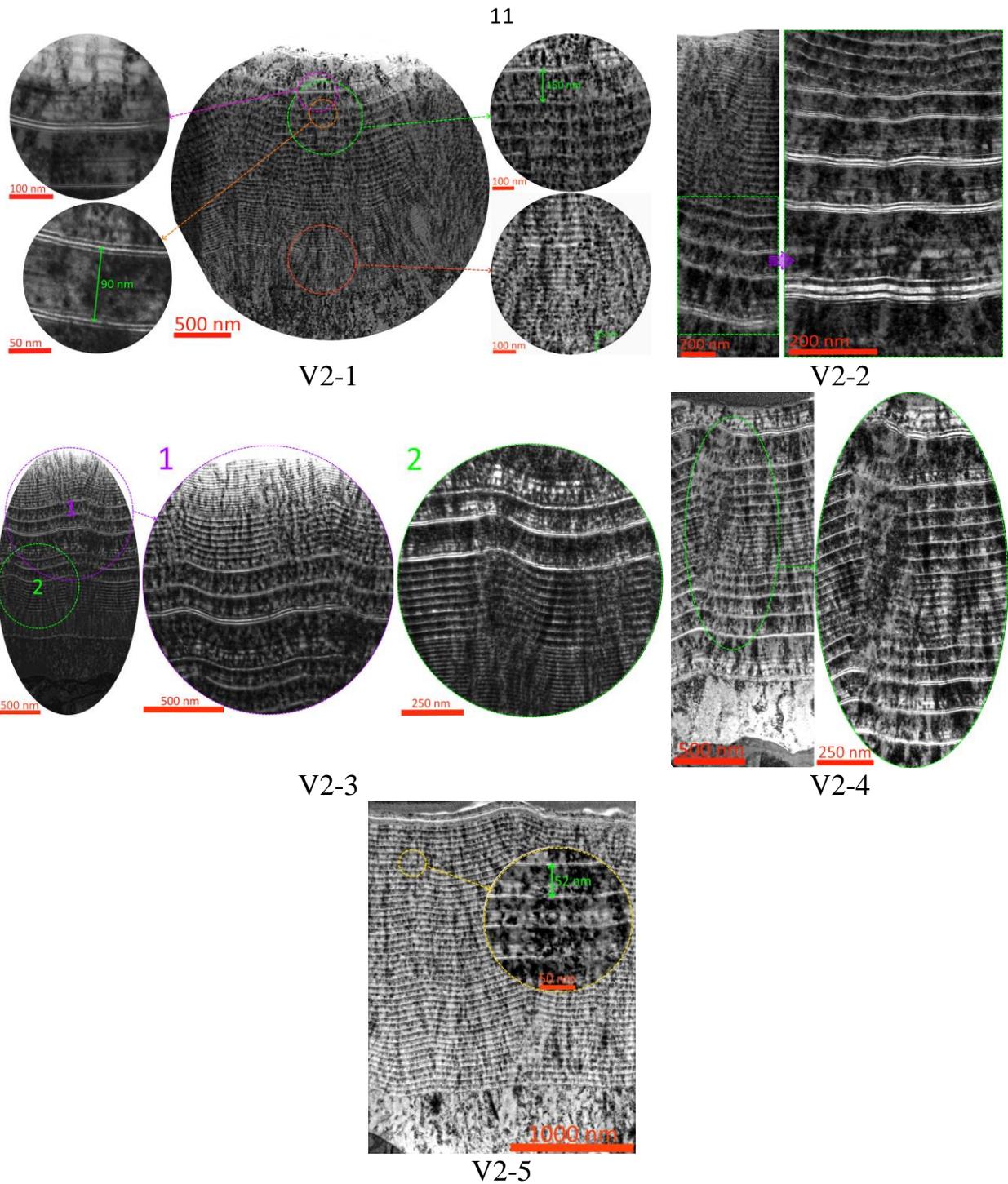


Рис. 2. Структура исследуемых покрытий серии V2 на поперечном разрезе (ПЭМ)

Зависимость величины периода модуляции от частоты вращения поворотного стола наиболее точно описывается степенной зависимостью вида

$$y = K_1 \cdot x^{K_2}$$

где x – Частота вращения стола, об/мин, y – Величина периода модуляции λ , nm, K_1 и K_2 – коэффициенты, зависящие от состава покрытия и параметров процесса. Для различных составов покрытий коэффициенты K_1 и K_2 будут отличаться в связи с различием процессов осаждения покрытий с различным элементным составом.

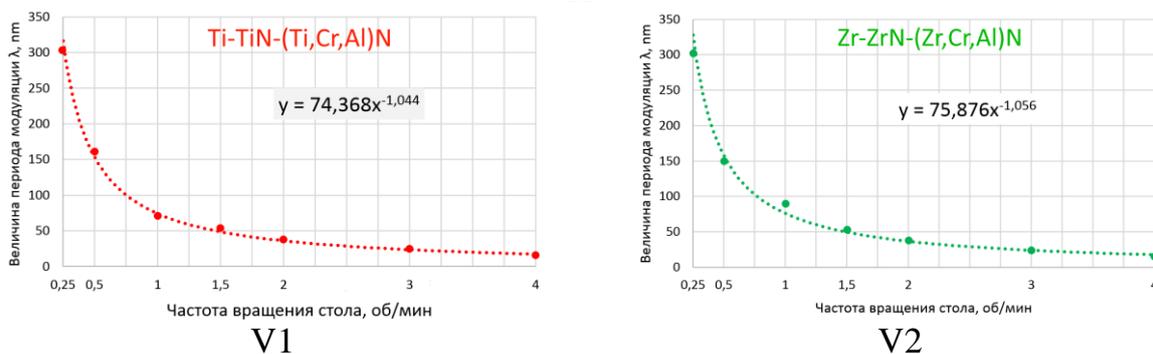


Рис. 3. Зависимость величины периода модуляции износостойкого слоя исследуемых покрытий от частоты вращения поворотного стола установки в процессе их осаждения

Исследование функциональных свойств покрытий с переменной величиной периода модуляции и режущих свойств инструментов с такими покрытиями при точении заготовок из стали 45.

Износостойкость образцов с покрытиями исследовалась при продольном точении заготовок из стали 45 на токарном станке на ACU 500 MRDlathe (Sliven) в условиях сухого резания при режимах резания: подача 0,1 об/мин, глубина резания 0,5 мм, скорость резания 400 м/мин.

Для каждого типа покрытия и каждой скорости резания проводилось 5 экспериментов, результаты которых подвергались статистической обработке.

Инструменты с покрытиями V1-2 и V1-3 показали очень близкую износостойкость, у инструмента с покрытием V1-1 этот показатель заметно лучше (рис. 4).

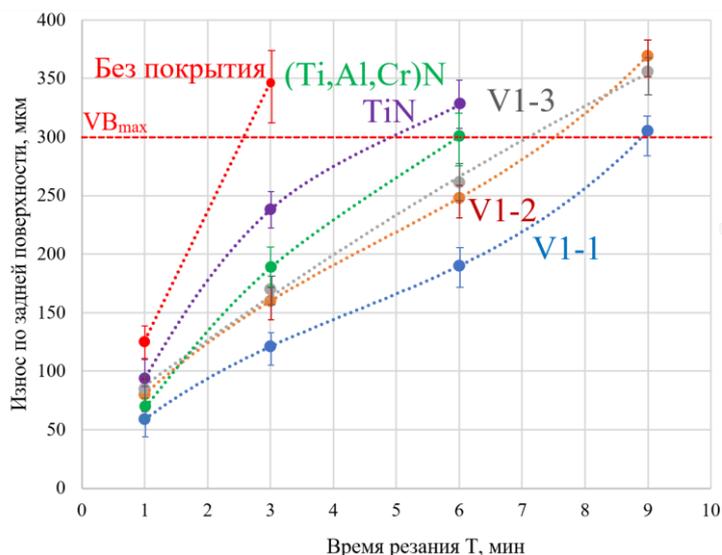


Рис. 4. Сравнение интенсивности износа по задней поверхности при точении стали 45 твердосплавным инструментом с покрытиями

Анализ границы разрушения покрытий в области лунки износа на передней поверхности (рис. 5) показывает достаточно близкий характер формирования данной области для покрытий V1-1 и V1-2 (рис. 5, а и б). В покрытии V1-2

наблюдаются наклонные трещины, отсутствующие в покрытии V1-1. Данные трещины не являются сквозными и присутствуют только во внешней части покрытия с меньшей величиной периода модуляции. Аналогичная область разрушения покрытия V1-3 имеет заметные отличия (рис. 5, в). В частности, здесь наблюдается большое число трещин, распространяющихся по всей толщине покрытия.

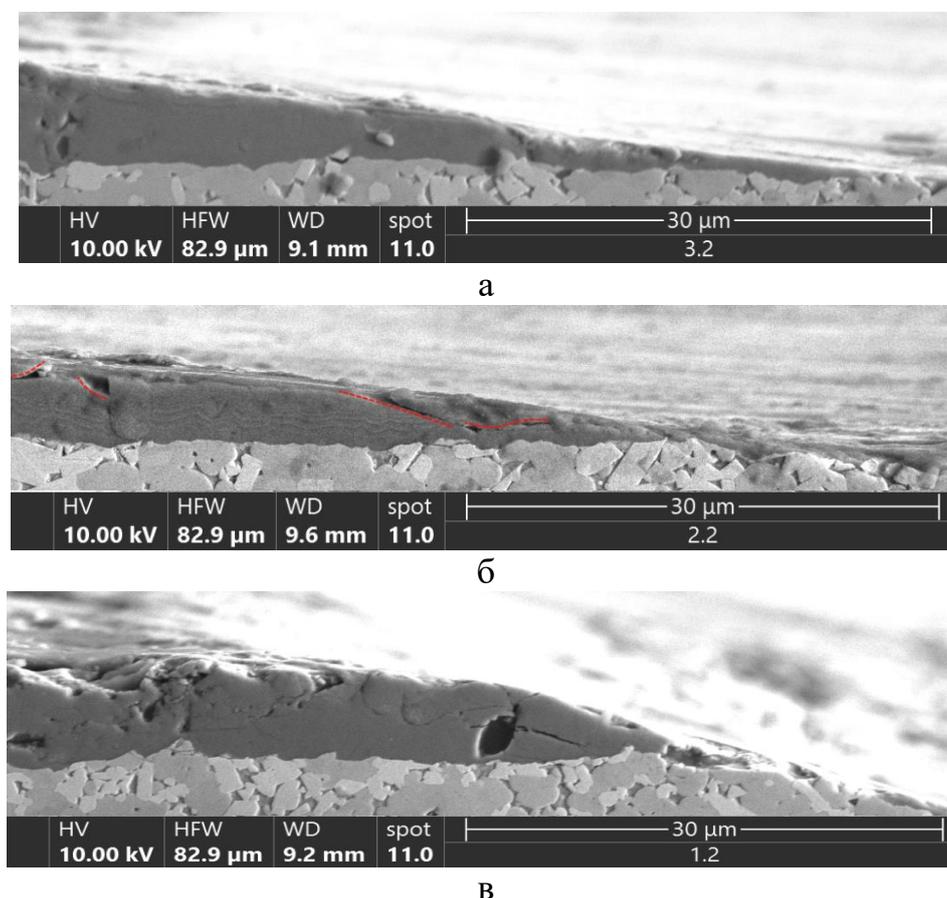


Рис. 5. Граница разрушения покрытия в области кратера износа на передней поверхности для покрытий (а) V1-1, (б) V1-2 и (в) V1-3

Исследование различных областей разрушения покрытия V1-1 (рис. 6) позволяет выявить характерную для данного покрытия особенность. Она заключается в том, что трещинообразование более активно во внутренних слоях (с меньшими величинами λ), в наружных слоях с большими значениями λ трещинообразование менее активное, наблюдается торможение развития трещин.

Характер разрушения покрытия V1-2 (рис. 7) достаточно сильно отличается от того, что наблюдается в покрытии V1-1. Главное различие состоит в том, что трещины в покрытии V1-2 формируются преимущественно во внешних слоях, имеющих меньшее значение периода модуляции λ . Во внутренних слоях, величина периода модуляции λ которых существенно выше, трещинообразование намного менее активное, наблюдается затухание трещин при переходе из области с меньшими в область с большими значениями λ . Аналогичная (более интенсивная для слоев с меньшим λ) особенность трещинообразования характерна и для покрытия V1-1. Однако, так как слои с большим периодом модуляции в покрытии

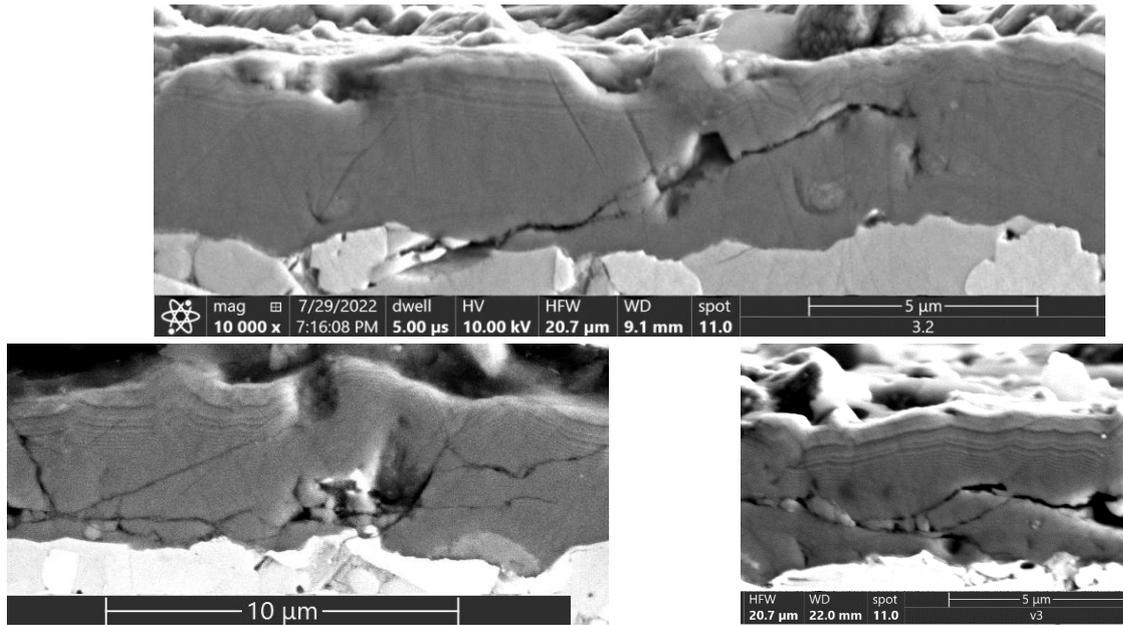


Рис. 6. Характер трещинообразования в покрытии V1-1

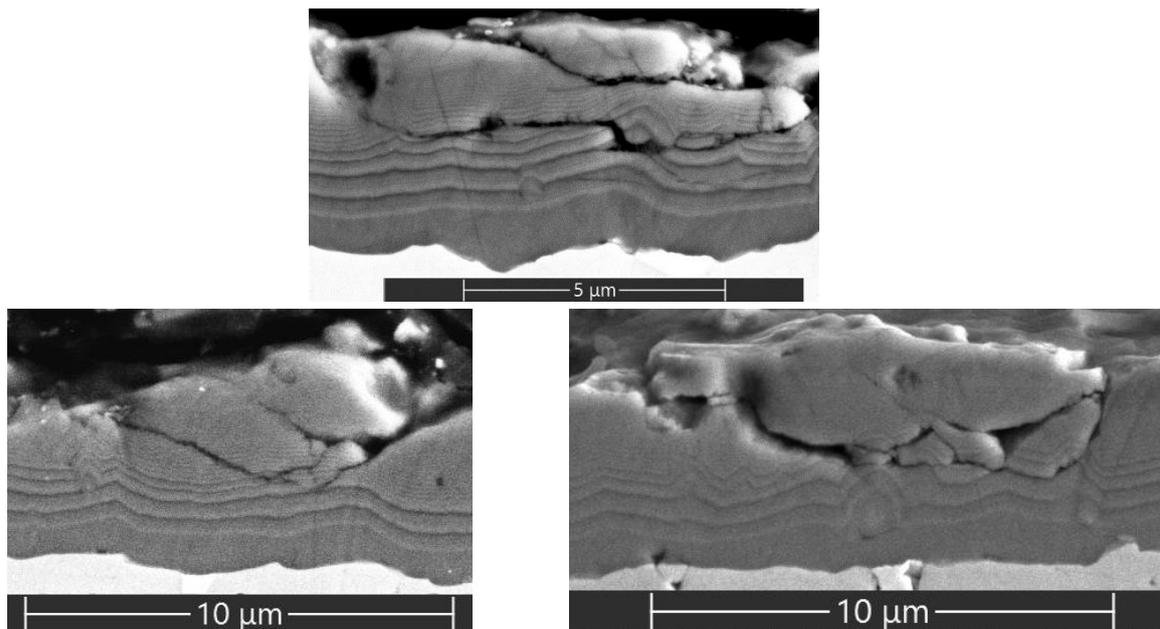


Рис. 7. Характер трещинообразования в покрытии V1-2

V1-1 находятся во внешней части покрытия, общее разрушение покрытия происходит менее активно по сравнению с покрытием V1-2, в котором слои с большим периодом модуляции расположены во внутренней области. Если у покрытия V1-1 внешние слои с большим периодом модуляции выполняют роль своеобразного щита, замедляющего общее разрушение покрытия, то для покрытия V1-2 расположенные во внутренней части толстые слои такой функции выполнять не могут. В силу данных обстоятельств покрытие V1-2 начинает разрушаться за счет трещинообразования и этот процесс происходит активнее, чем у покрытия V1-1. Таким образом, можно предположить, что архитектура покрытия с большим значением λ во внешних слоях и меньшим значением во внутренних слоях

(покрытие V1-1) с точки зрения трещинообразования и стойкости к хрупкому разрушению предпочтительнее обратной последовательности изменения λ (покрытие V1-2).

В покрытии V3, имеющем постоянную величину λ , характер разрушения ближе к покрытию V1-2, чем к V1-1. Наблюдается достаточно активное трещинообразование во внешних и центральных областях покрытия, при этом во внутренних слоях количество трещин заметно ниже (рис. 8). Такой характер трещинообразования является обычным для покрытий с нанослойной структурой. Так как силовые и температурные факторы воздействуют на покрытие именно со внешней стороны, то очевидно, что с этой стороны стоит ожидать наиболее активное трещинообразование. С этой точки зрения характер трещинообразования в покрытии V1-1 можно назвать в некоторой степени аномальным. В целом стоит отметить, что характер разрушения всех трех покрытий указывает на то, что их материал является достаточно хрупким, трещинообразование достаточно активное. В то же время, даже для достаточно хрупких покрытий существуют способы, позволяющие несколько снизить интенсивность хрупкого разрушения. Возможно, одним из таких способов является структуры с переменной величиной периода модуляции.

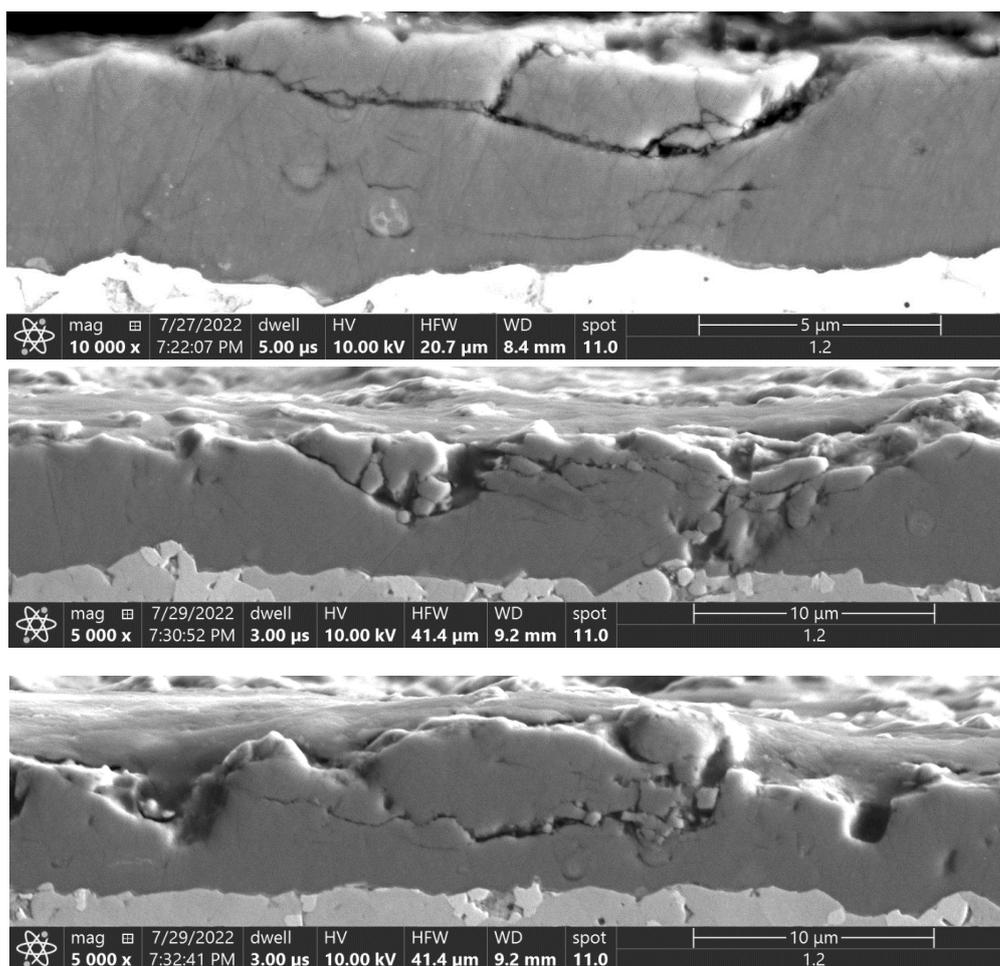


Рис. 8. Характер трещинообразования в покрытии V1-3

В третьей главе рассматриваются результаты свойств покрытий при точении заготовок из титанового сплава ВТ6 на токарном станке на АСУ 500

MRDlathe (Sliven) в условиях сухого резания на следующих режимах: подача 0,1 об/мин, глубина резания 0,5 мм, скорость резания 50, 75 и 100 м/мин.

Выбор покрытия Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N для точения титанового сплава ВТ6 обусловлен следующими факторами, определенными на основе проведенного литературного обзора:

1. Система (Zr,Cr,Al)N обладает высокой твердостью и теплостойкостью, что позволяет использовать ее в качестве покрытия для условий резания труднообрабатываемых материалов.

2. В отличие от систем на основе TiN система на основе ZrN не имеет химического сродства с обрабатываемым материалом (титановым сплавом).

Применение инструмента со всеми покрытиями Zr-ZrN-(Zr,Al,Cr)N обеспечивает период стойкости при скорости резания 75 м/мин, аналогичный периоду стойкости инструмента с покрытием ZrN при скорости резания 50 м/мин.

Исследования режущих свойств инструментов с разработанными покрытиями при точении заготовок из титанового сплава ВТ6 при скоростях резания 50, 75 и 100 м/мин показали, что все покрытия Zr-ZrN-(Zr,Al,Cr)N серии V2 обеспечивают заметное повышение износостойкости как по сравнению с инструментом без покрытия, так и с покрытием ZrN (рис. 9).

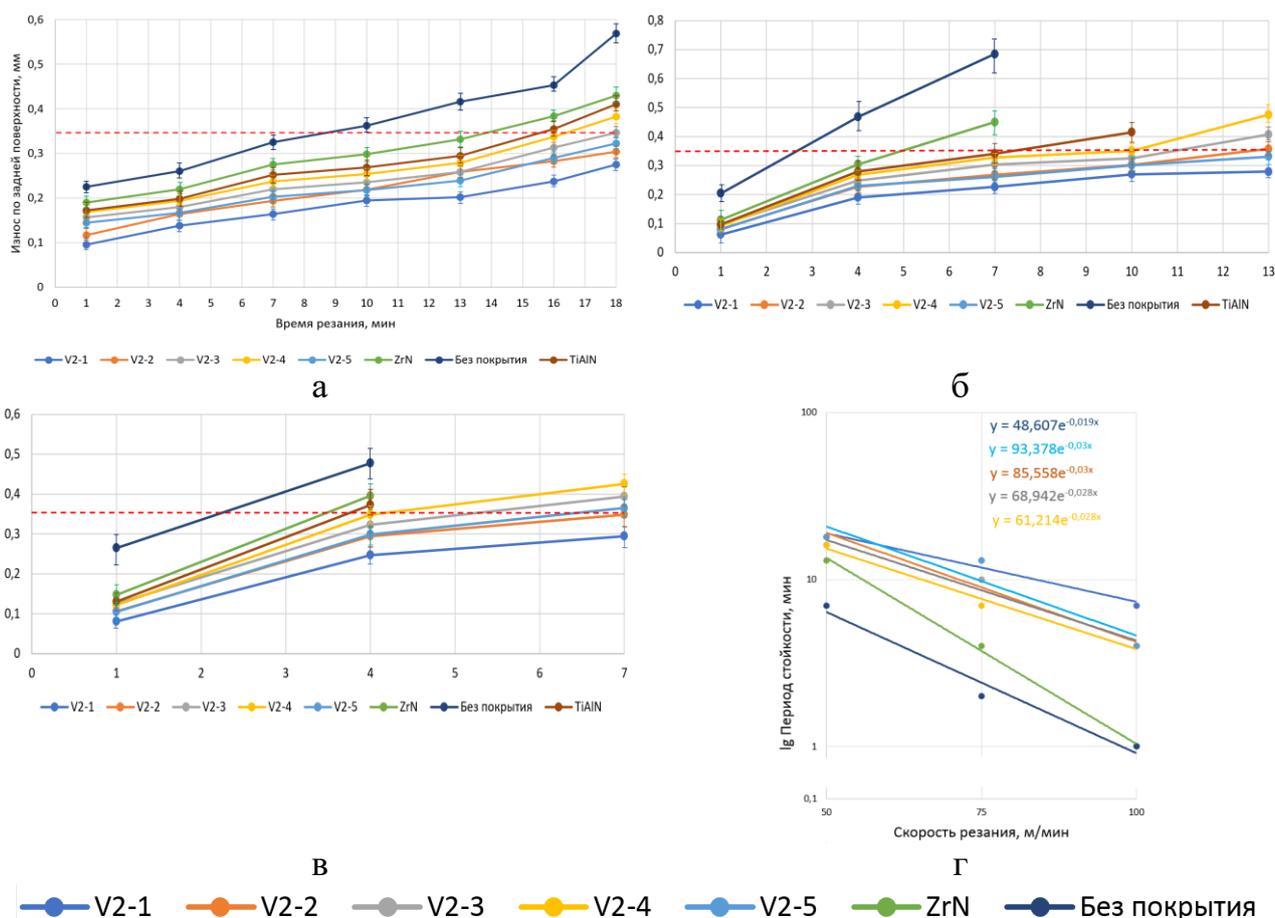


Рис. 9. Результаты исследования износостойкости инструмента с покрытиями серии V2 в сравнении с инструментом с покрытием ZrN и без покрытия при точении заготовок из титанового сплава ВТ6 при скоростях резания $v_c = 50$ (а), 75 (б) и 100 (в) м/мин, зависимость периода стойкости от скорости резания (г)

Применение инструмента с покрытием $Zr-ZrN-(Zr,Al,Cr)N$ с переменной величиной периода модуляции V2-1 обеспечивает период стойкости при скорости резания 100 м/мин аналогичный периоду стойкости инструмента с коммерческим покрытием ZrN при скорости резания 50 м/мин.

Отношение скорости резания к периоду стойкости описывается экспоненциальными уравнениями вида

$$y = K_1 e^{K_2 \cdot x}$$

где y – Период стойкости, мин

x – Скорость резания, м/мин

K_1 и K_2 – коэффициенты, зависящие от состава и архитектуры покрытия.

Таким образом, применение покрытия с рационально подобранным составом и переменной величиной периода модуляции позволяет повысить скорость резания с 50 до 100 м/мин при сохранении периода стойкости инструмента.

Исследование характера разрушения покрытий серии V2 при точении титанового сплава ВТ6 (скорость резания 100 м/мин), проведенное с использованием методов ПЭМ показало следующее (рис. 10):

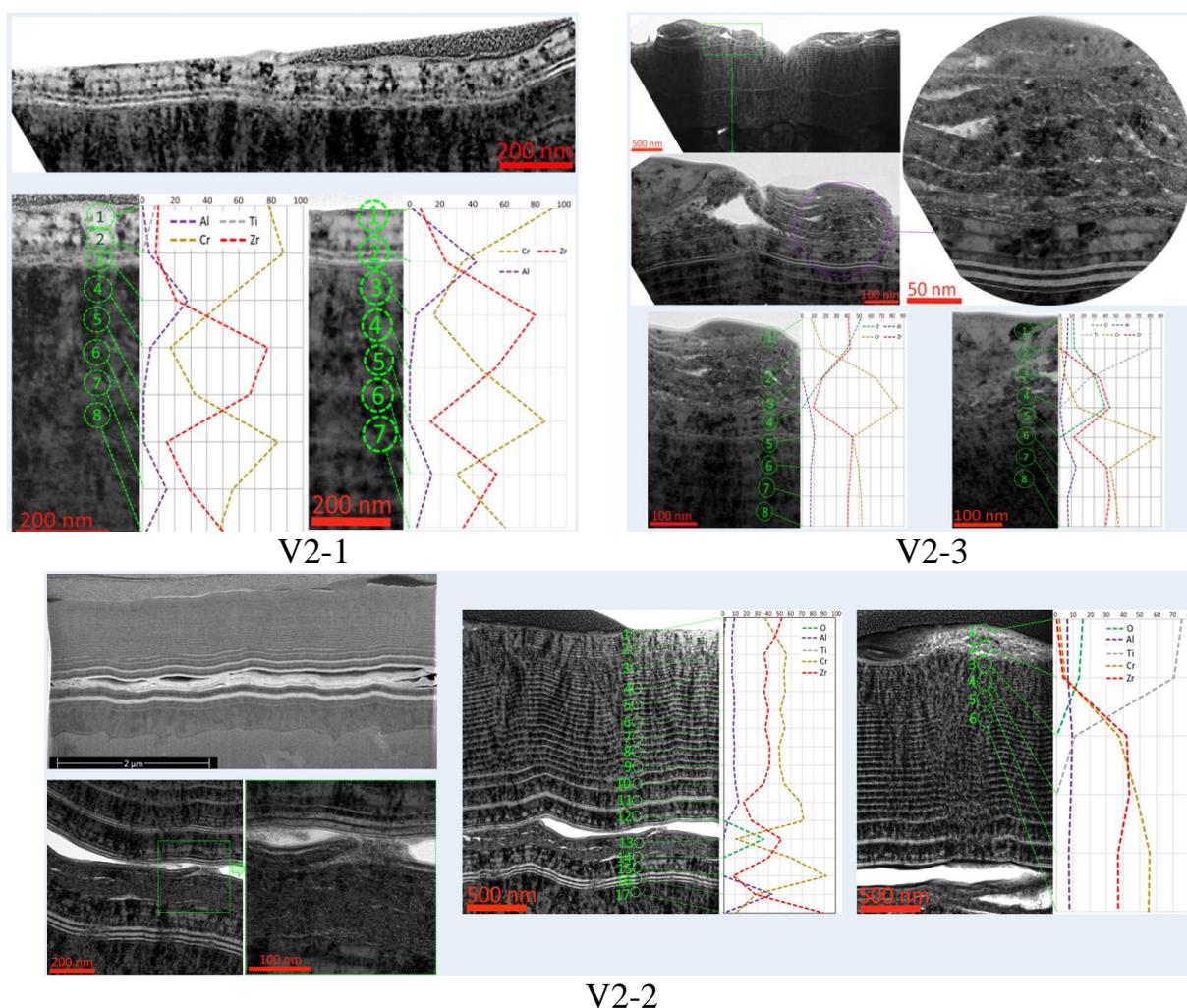


Рис. 10. Характер разрушения покрытий серии V2 при точении титанового сплава ВТ6 (скорость резания 100 м/мин) (ПЭМ)

- у покрытия V2-1 окислительного изнашивания не наблюдается, во внешних слоях присутствует повышенное содержание хрома, имеется диффузия титана из обрабатываемого материала;
 - у покрытия V2-2 наблюдается активное окислительное изнашивание, формирование обширных расслоений в области слоев с большой величиной периода модуляции во внутренних областях покрытия, при этом в местах расслоения также наблюдаются очаги окисления. На поверхности покрытия наблюдается налип титанового сплава с признаками окисления;
 - у покрытия V2-3 наблюдается активное окислительное изнашивание (с формированием оксидов циркония и хрома);
 - у покрытия V2-4 заметного окислительного изнашивания не наблюдается, но наблюдается расслоение в области слоев с большой величиной периода модуляции;
 - у покрытия V2-4 также наблюдается активное трещинообразование
- Нанослойная структура покрытий оказывает существенное влияние на характер формирования и развития трещин. В частности, изучался характер трещинообразования в покрытии V2-4 при точении титанового сплава ВТ6 при скорости резания 100 м/мин (рис. 11). Установлено, что при прохождении границ нанослоев наблюдается отклонение развития трещины, что может приводить к ее затуханию. Таким образом, нанослойная структура покрытия, в которой чередуются нанослои с различными механическими свойствами (в частности, более твердые и более пластичные) позволяет тормозить развитие трещин в материале и, таким образом, повышать прочность и трещиностойкость покрытий.

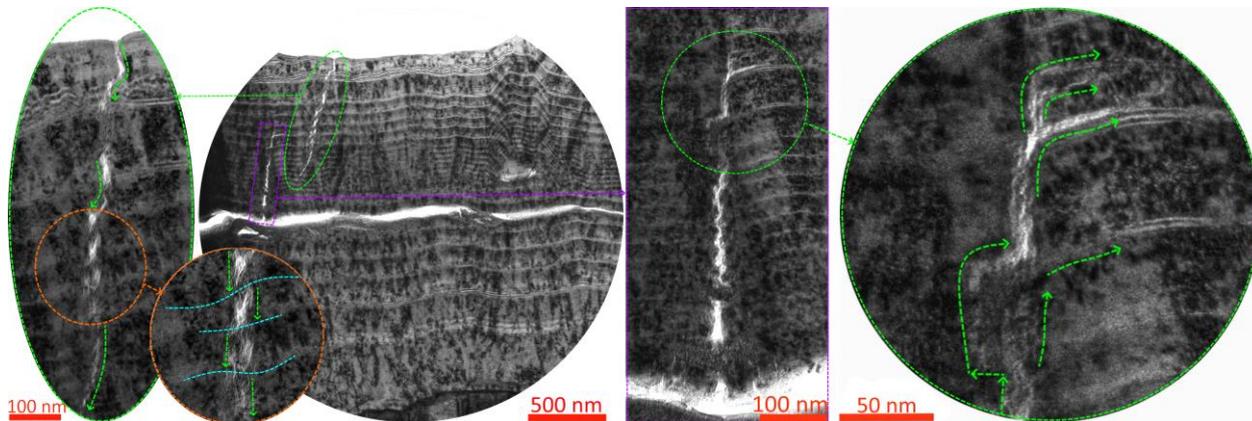


Рис. 11. Характер трещинообразования в покрытии V2-4 при точении титанового сплава ВТ6 (скорость резания 100 м/мин) (ПЭМ)

В результате исследования окислительных процессов в покрытиях серии V2 при точении титанового сплава ВТ6 при скорости резания 100 м/мин было установлено, что в прилегающих к зоне резания слоях покрытия V2-3 формируется зона активного окисления.

Наблюдается формирование оксидов циркония ZrO_2 и хрома CrO_2 , при этом кубическая фаза $(Zr,Cr,Al)N$ практически полностью распадается, но сохраняется кубическая фаза $(Cr,Zr,Al)N$ (рис. 12, а). Также можно видеть, что распространение зоны окисления ограничивается границами нанослоев, таким образом нанослойная

структура покрытия может сдерживать развитие окислительного изнашивания в процессе резания (рис. 12, б).

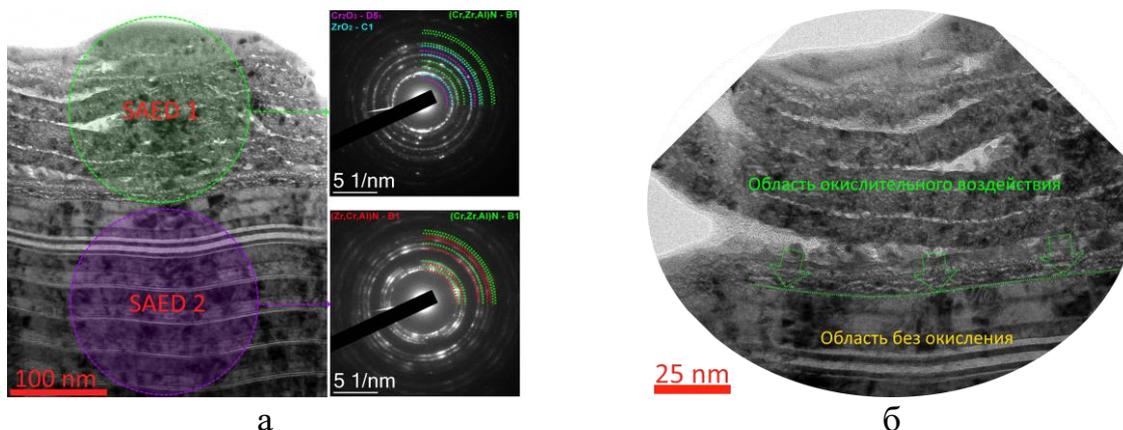


Рис. 12. Формирование зоны активного окисления в прилегающих к зоне резания нанослоях покрытия V2-3 в процессе точения сплава ВТ6 (скорость резания 100 м/мин)

Рассматриваются примеры практического применения покрытий с разработанным составом и архитектурой для повышения производительности процесса резания при обработке точением поверхностей деталей из титанового сплава ВТ-14 номенклатуры ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия» имени С.П.Королева. 3-D модель рассматриваемой детали представлена на рис. 13.

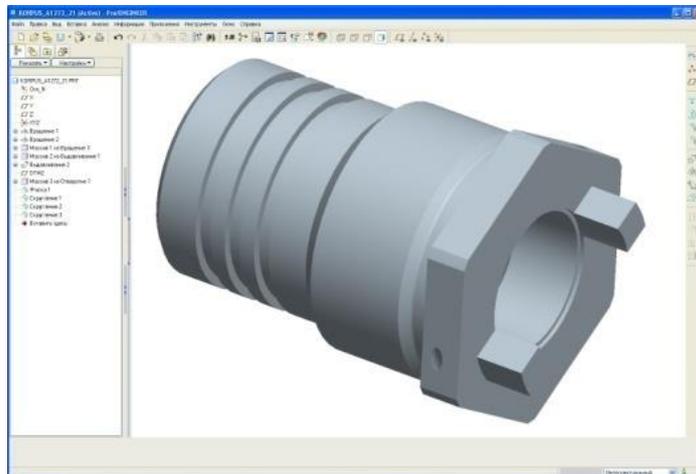


Рис. 13. 3-D модель обрабатываемой детали номенклатуры ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия» имени С.П. Королева

В качестве субстрата использовались сменные пластины WNMG-080408 M3 материал субстрата ВР20АМ (производство КЗТС) с коммерческим покрытием PVD толщиной 1–4 мкм, рекомендованным производителем для точения титановых сплавов и разработанным покрытием V2-1. Было установлено, что применение сменных пластин с разработанным наноструктурированным покрытием взамен пластин со стандартным PVD покрытием позволяет увеличить скорость резания в 1,5 раза и, соответственно, уменьшить время обработки. Таким образом, применение режущих пластин с покрытием $Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N$ с рационально

подобранной наноструктурой (V2-1) позволяет увеличить производительность обработки с 7 до 10 деталей в час (с 56 до 80 деталей в смену), без учета времени на установку и снятие деталей на станок, которое, очевидно, идентично для сравниваемых пластин. Данный результат является существенным с точки зрения производства большего количества и деталей при имеющемся количестве производственного оборудования, без снижения качества обработки и увеличения расхода режущего инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные теоретические и технологические решения, имеющие важное значение для машиностроения, обеспечивающие повышение производительности обработки точением деталей из титанового сплава путем разработки и применения износостойких покрытий с переменной величиной периода модуляции нанослоев.

2. Установлена функциональная связь между скоростью вращения поворотного стола в процессе осаждения и параметрами формируемой наноструктуры (величиной периода модуляции) износостойких покрытий различного состава. Зависимость величины периода модуляции y от частоты вращения поворотного стола x описывается степенной зависимостью вида

$$y = K_1 \cdot x^{K_2}$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты, зависящие от состава покрытия и параметров процесса.

3. Экспериментально установлена зависимость эксплуатационных свойств покрытия (прочность адгезионной связи с субстратом, микротвердость, модуль упругости и др.) от характера изменения периода модуляции. Определен характер изменения периода модуляции (увеличение по мере осаждения покрытия), обеспечивающий наилучшие эксплуатационные свойства покрытия.

4. Исследования влияния параметров нанослойной структуры покрытия на режущие свойства и характер изнашивания инструмента при точении стали 45 показали, что с точки зрения механики разрушения покрытие с увеличивающимся периодом модуляции имеет преимущества по сравнению с покрытием с уменьшающимся периодом модуляции. В первом случае активное трещинообразование наблюдается во внутренних слоях, а внешние слои меньше подвержены хрупкому разрушению и покрытие сохраняет работоспособность. Во втором случае более активно разрушаются внешние слои и снижается работоспособность покрытия.

5. Исследования режущих свойств инструментов с разработанными покрытиями при точении заготовок из титанового сплава ВТ6 при скоростях резания 50, 75 и 100 м/мин показали, что все покрытия Zr-ZrN-(Zr,Al,Cr)N обеспечивают существенное повышение износостойкости по сравнению с инструментом без покрытия и с коммерческим покрытием ZrN.

6. Установлено, что покрытия с увеличивающимся периодом модуляции лучше сопротивляются окислительному изнашиванию. В поверхностных слоях покрытия с постоянным или уменьшающимся периодом модуляции при точении

титанового сплава на увеличенной скорости резания (100 м/мин) наблюдается активное окислительное изнашивание, а у покрытия с увеличивающимся периодом модуляции признаки такого изнашивания не наблюдаются. Границы между нанослоями покрытия могут тормозить развитие области окисления и, таким образом, повышать стойкость покрытия к окислению.

7. У покрытий, включающих внутренние (прилегающие к субстрату) слои с большим периодом модуляции, при резании титанового сплава на скорости 100 м/мин наблюдаются расслоения между данными нанослоями, а у покрытий, включающих внутренние слои с малым периодом модуляции, подобных расслоений не наблюдается.

8. При точении титанового сплава ВТ6 со скоростью резания 50 м/мин доминируют адгезионно-усталостные механизмы изнашивания, а при скорости резания 100 м/мин ключевыми становятся механизмы окислительного изнашивания.

9. На основе установленных закономерностей разработано покрытие с рационально подобранным характером изменения параметров наноструктуры (периодом модуляции), обеспечивающее повышение скорости резания при сохранении периода стойкости и, таким образом, позволяющее повысить производительность процесса резания. Применение разработанных покрытий при токарной обработке деталей из титанового сплава в условиях реального производства позволяет увеличить производительность процесса с 7 до 10 деталей в час за счет увеличения скорости резания в 1,5 раза и, соответственно, уменьшения времени токарной обработки.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Верещака, А.А. Исследование свойств наноструктурированного покрытия Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N с изменяющейся величиной периода модуляции в износостойком слое / А.А. Верещака, **Н.С. Баранова**, Е.С. Сотова, А.Е. Селезнев, К.М. Макаревич // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 1 (68). – С.8–19.
2. Верещака, А.А. Характер изнашивания и разрушения наноструктурированных покрытий Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N с изменяющейся величиной периода модуляции в износостойком слое / А.А. Верещака, **Н.С. Баранова** // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 1 (68). – С. 44–53.
3. Верещака, А.А. Исследование структуры и фазового состава микрочастиц сферической формы, формирующихся в процессе осаждения PVD покрытий / А.А. Верещака, **Н.С. Баранова**, И.М. Шмаков, Е.С. Сотова // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 2 (69). – С. 31–43.
4. Верещака, А.А. Исследование структуры и фазового состава микрочастиц, формирующихся в процессе осаждения PVD покрытий, и их влияния на условия резания / А.А. Верещака, **Н.С. Баранова**, И.М. Шмаков // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 3 (70). – С. 8–14.

5. Верещака, А.А. Исследование диффузионных процессов и структурных изменений в наноструктуре многослойных покрытий / А.А. Верещака, В.П. Табаков, А.Е. Селезнев, **Н.С. Баранова**, К.М. Макаревич // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2024. – № 8. – С. 379–383.

Публикации в журналах, цитируемых Scopus и Web of Science

6. Vereschaka, A. Influence of the Ti-TiN-(Y,Ti,Al)N Nanolayer Coating Deposition Process Parameters on Cutting Tool Oxidative Wear during Steel Turning / Alexey Vereschaka, Catherine Sotova, Filipp Milovich, Anton Seleznev, Nikolay Sitnikov, Semen Shekhtman, Vladimir Pirogov, **Natalia Baranova** // Nanomaterials. 2023. V. 13. Art. No 3039 (Web of Science, SCOPUS).

7. Vereschaka, A. Development of Multicomponent Nanostructured Nitride Coatings to Protect against Corrosion Products from Titanium Alloy / Alexey Vereschaka, Nikolai Cherenda, Catherine Sotova, Vladimir Uglov, Olga Reva, Anna Basalai, Alexander Isobello, **Natalia Baranova** // Coatings. 2023. V. 13. Art. No 2028 (Web of Science, SCOPUS).

8. Vereschaka, A. Investigation of Zr-ZrN, Zr,Hf-(Zr,Hf)N and Zr,Nb-(Zr,Nb)N coatings deposited on a titanium alloy substrate / Alexey Vereschaka, Catherine Sotova, Filipp Milovich, Jury Bublikov, Valery Zhylinski, Kirill Makarevich, **Natalia Baranova** // High Temperature Material Processes. 2024. V. 28(2). P. 65–80 (SCOPUS).

9. Vereschaka, A. Increasing the wear resistance of titanium alloys by deposition of a modifying coating (Zr,Nb)N / Alexey Vereschaka, Catherine Sotova, Kirill Makarevich, **Natalia Baranova** // High Temperature Material Processes. 2024. V. 28(3). P. 77–86 (SCOPUS).

Другие публикации

10. Верещака, А.А. Повышение износостойкости титановых сплавов путем осаждения модифицирующего покрытия (Zr,Nb)N / А.А. Верещака, **Н.С. Баранова**, К.М. Макаревич // Адаптивные материалы и покрытия для высокотехнологичных отраслей промышленности: коллективная монография / Под ред. д.т.н., проф. С.Н. Григорьева. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2023. – С. 92–106.

11. Верещака, А.А. Исследование диффузионных процессов при резании твердосплавным инструментом с износостойкими покрытиями / А.А. Верещака, В.П. Табаков, **Н.С. Баранова**, К.М. Макаревич // Сборник научных трудов конференции «Инновационные технологии в машиностроении». – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2024.

Научное издание

Баранова Наталья Сергеевна

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ПЕРИОДА
МОДУЛЯЦИИ НАНОСЛОЕВ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук