

УДК 621.891.001.57+06

Сравнительный анализ трибологических характеристик многослойных металлонитридных систем CrAlSiN/Cr и CrAlSiN/Ti*

И.В. Колесников, П.Г. Иваночкин, Е.Д. Аникина,
Д.С. Мантуров, А.В. Сидашов, А.И. Азоян

Ростовский государственный университет путей сообщения

Comparative analysis of tribological characteristics of multilayer metal nitride systems CrAlSiN/Cr and CrAlSiN/Ti

I.V. Kolesnikov, P.G. Ivanochkin, E.D. Anikina,
D.S. Manturov, A.V. Sidashov, A.I. Azoyan

Rostov State Transport University

Рассмотрены многослойные покрытия структуры CrAlSiN/Cr и CrAlSiN/Ti. Отличительной особенностью этих покрытий является технология нанесения: дуговое трехкатодное распыление для системы CrAlSiN/Cr и гибридная технология катодно-дугового испарения CrAlSiN и магнетронного распыления Ti. Образцы имели различную архитектуру покрытия, толщину и морфологическую структуру. Проведены трибологические испытания этих покрытий, которые продемонстрировали высокую износостойкость образцов покрытия CrAlSiN/Cr с коэффициентом трения примерно 0,30...0,50. Покрытия системы CrAlSiN/Ti имели малый коэффициент трения (~0,15) и сравнительно высокий износ. Для оценки износостойкости и анализа механизма изнашивания проведено морфологическое исследование поверхности дорожек трения. У покрытия CrAlSiN/Cr преобладающим оказалось усталостное изнашивание, характеризующееся появлением микротрещин в дорожке трения, у покрытия CrAlSiN/Ti — абразивное изнашивание со следами смятия и микрорезания. По результатам исследования многослойных композиционных металлонитридных ионно-плазменных покрытий при сухом трении установлено, что более износостойким является покрытие CrAlSiN/Cr, слои которого имеют более высокие упругие свойства.

EDN: XWLGBA, <https://elibrary/xwlgba>

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, CrAlSiN, трибологические испытания, коэффициент трения, усталостное изнашивание, абразивно-механическое изнашивание

The article considers multilayer coatings of the CrAlSiN/Cr and CrAlSiN/Ti structures. A distinctive feature of the coatings is the technological mode of their application: three-cathode arc for the CrAlSiN/Cr system and the hybrid technology of CrAlSiN cathode-arc evaporation and Ti magnetron sputtering. The samples have different coating architecture, thickness and morphology, these features are determined by the experimental objectives of the study. Tribological tests of these coatings were carried out, which demonstrated high

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-30007-П, <https://rscf.ru/project/21-79-30007/>.

wear resistance of CrAlSiN/Cr coating samples with a coefficient of friction in the range of ~ 0.30 - 0.50 . In contrast, the CrAlSiN/Ti system coatings had a low coefficient of friction of ~ 0.15 and relatively high wear. To assess the wear resistance and analyze the wear mechanism, studies of the surface morphology of friction tracks were carried out. For the CrAlSiN/Cr coating, the fatigue type of wear is predominant, characterized by the appearance of microcracks in the friction track, the CrAlSiN/Ti coating, in turn, has abrasive wear, traces of crumpling and micro-cutting are observed. When studying multilayer composite metallonitride ion-plasma coatings under dry friction, the CrAlSiN/Cr coating turned out to be more wear-resistant, the layers of which have higher elastic properties.

EDN: XWLGBA, <https://elibrary/xwlgba>

Keywords: ion-plasma coatings, CrAlSiN, tribological tests, friction coefficient, fatigue wear, abrasive-mechanical wear

Нанокompозитные покрытия активно изучаются в последнее время из-за возможности широкого применения в различных областях. Так, в работе [1] рассмотрено развитие сверхтвердых материалов и отмечено, что нанокристаллические нитриды, внедренные в матрицу аморфного нитрида кремния, являются наиболее перспективными нанокристаллическими композициями для удовлетворения всего комплекса требований технического применения. Проанализирована основа прочности и твердости нанокompозитных покрытий. Описано, как микроструктура покрытия (в керамических материалах) влияет на рост и распространение микротрещин, что приводит к существенному отличию теоретических значений прочности от реальных. Что касается потенциала, описанного в работе [1], за последние несколько лет были разработаны инновационные покрытия с выдающимися свойствами, такие как четвертичный нитрид хрома-алюминия-кремния (CrAlSiN) и нитрид алюминия-кремния-титана (AlSiTiN) [2–4].

В работах [5–7] исследована связь структуры и архитектуры покрытия с его механическими и термическими свойствами. Авторы статьи [8] оценили характеристики покрытий AlSiTiN и AlSiCrN, полученных методом катодно-дугового испарения (Physical Vapour Deposition — PVD), с многослойной и градиентной микроструктурой и пришли к выводу, что нанокompозитные покрытия имеют более низкие значения износа инструмента при контурном фрезеровании стали AISI M2 благодаря высоким показателям твердости и износостойкости при высоких температурах.

Конструкция многослойных структур, состоящих из чередующихся слоев с различными свойствами (в том числе твердостью и модулем упругости), значительно улучшает свойства по-

крытия. Повышение твердости многослойных покрытий обусловлено замедлением движения дислокаций межфазными границами между слоями [9–11]. Более того, межфазные границы между двумя соседними слоями в многослойной структуре могут отклонять распространение трещин и замедлять скольжение по границам зерен, создавая твердое, но прочное покрытие [12]. Поэтому можно ожидать, что комбинированный эффект четвертичных покрытий и многослойных структур приведет к получению покрытий с наилучшими характеристиками.

Многослойные покрытия показывают более высокую твердость и прочность, чем однослойные. Последняя из этих характеристик очень важна, так как во многих областях применения растрескивание покрытия является недопустимым. Многослойные металлокерамические композиционные покрытия имеют более высокую прочность и сопротивление растрескиванию по сравнению с однослойными керамическими покрытиями. Это достигается снижением твердости и износостойкости [13].

Использование многослойных нанокompозитных покрытий обусловлено тем, что наряду с прочной адгезией между пленкой и подложкой обеспечивается получение износостойких пленок с низкими химической реактивностью и трением. Кроме того, слоистая структура, как уже было отмечено, препятствует распространению трещин через покрытия благодаря баллистическому эффекту (многослойная структура действует как ингибитор трещин), повышая сопротивление разрушению покрытия. Также установлено, что существенное уменьшение толщины отдельных слоев и размеров кристаллитов до нескольких нанометров может привести к значительному улучшению характеристик пленки [13, 14].

В статье [15] рассмотрены микроструктура, термическая стабильность, поведение при окислении, а также механические и трибологические свойства четверных покрытий $TiAlXN$ ($X = Si, Cr, V, Ta$ и B). Подробно описано влияние параметров осаждения, химического состава, высокотемпературного отжига и архитектуры покрытия на его свойства.

В работе [16] исследованы трибологические свойства многослойных и нанокомпозитных покрытий $AlSiTiN$ и $AlCrSiN$, нанесенных на образцы карбида вольфрама-кобальта ($WC-C$). Испытания на трение проведены как в сухих, так и в условиях смазки с использованием шарика из нержавеющей стали в качестве контртела. Оба покрытия продемонстрировали высокую твердость и хорошую адгезию к подложке. Что касается фрикционных свойств, то в условиях сухого трения свойства поверхности влияют на контакт скольжения на начальном этапе, а основная структура и образование трибослоя определяют основное поведение.

Цель работы — исследование трибологического поведения двух типов многослойных ионно-плазменных покрытий с различными механическими свойствами и механизмами трения.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись образцы с покрытиями многослойной структуры — $CrAlSiN/Cr$ (образец № 1) и $CrAlSiN/Ti$ (образец № 2). В качестве подложки выступали полированные (с параметрами шероховатости поверхности $Ra \leq 0,12$ мкм и $Rz \leq 0,6$ мкм по ГОСТ 2789–73) пластинчатые образцы размером $50 \times 30 \times 5$ мм из стали 40XH после закалки и высокого отпуска (структура сорбита).

Для нанесения покрытий применяли вакуумную установку BRV600, которая является многофункциональной ионно-плазменной PVD-системой, обеспечивающей нанесение металлических, нитридных, углеродоподобных (Diamond-Like Carbon — DLC) и многокомпонентных покрытий. Для исследования использовали два метода осаждения: катодно-дуговое испарение и магнетронное распыление, которые позволяют реализовывать гибридные многослойные архитектуры покрытий за один вакуумный цикл.

Для нанесения слоев образца № 1 применяли метод дугового трехкатодного испарения: катод № 1 — 88 % Al + 12 % Si (45 мин на слой

$CrAlSiN$), катод № 2 — 100 % Cr (1 ч на слой Cr) и катод № 3 — 100 % Cr (6 ч 16 мин).

Для образца № 2 использовали гибридную технологию катодно-дугового испарения $CrAlSiN$ и магнетронного распыления Ti (дуговое двухкатодное испарение: катод № 1 — 88 % Al + 12 % Si и катод № 2 — 100 % Cr (50 мин на слой $CrAlSiN$) + магнетронное Ti (10 мин на слой)).

Технологический принцип установки основан на генерации высокоионизированного потока частиц испаряемого материала в вакуумной камере, где рабочее давление составляло, Па: для первого образца — $1,5 \cdot 10^{-1}$ (подслой), $9,8 \cdot 10^{-2}$ (Cr), $8,0 \cdot 10^{-2}$ ($CrAlSiN$); для второго — $6,0 \cdot 10^{-1}$ (подслой), $6,1 \cdot 10^{-1}$ (Ti), $1,4 \cdot 10^{-2}$ ($CrAlSiN$),

В процессе нанесения слоев $CrAlSiN/Ti$ нагрев поддерживали на уровне 50 % мощности (дуговой нагреватель), а при нанесении слоев $CrAlSiN/Cr$ — на уровне 70 % мощности. Повышенный уровень нагрева образца № 1 обеспечивал более активную диффузию хрома на границе раздела слоев, улучшая когезионную прочность. В системе $CrAlSiN/Ti$ слой Ti наносили методом магнетронного распыления, что обусловило снижение температуры подложки ($157^\circ C$), в отличие от дуговой системы Cr, где температура достигала $193^\circ C$. Последнее связано с тем, что магнетронный метод формирует более мелкодисперсную структуру слоев Ti, что улучшает пластичность. Система магнитной сепарации, предусмотренная конструкцией вакуумной установки BRV600, подавляет капельную фазу в дуговом разряде, обеспечивая высокую плотность и однородность покрытия.

Полученные образцы имели разную архитектуру покрытий, отличительными особенностями которой являлись толщина и морфологическая структура, обусловленные экспериментальными целями исследования влияния этих характеристик на свойства покрытий.

Для анализа микроструктуры покрытий использовали сканирующий электронный микроскоп ZEISS EVO MA 18, оснащенный энергодисперсионным анализатором OXFORD X-Max 50, который позволяет исследовать поперечные сечения покрытий.

Экспериментальное изучение механических характеристик образцов на микроуровне проводили с помощью системы анализа механических свойств материалов NanoTest 600, где твердость и модуль упругости, измеряли мето-

дом непрерывного индентирования. В качестве индентора выбрали трехгранник Берковича.

Триботехнические испытания выполняли на установке TRB компании Anton Paar Trites по методикам стандартов DIN 50324 (1992), ASTM G 99–95a (2000)e1. Тип испытаний — трение скольжения по схеме шар-по-диску, где контртелом являлся корундовый (Al_2O_3) шарик диаметром 6 мм. Перемещение осуществлялось по круговой траектории радиусом $r = 2,2$ мм при нагрузке $F = 1, 5$ и 10 Н и скорости $v = 1$ мм/с. Путь трения L составлял 1,8 м (130 циклов). Для дополнительных сравнительных испытаний образцов число циклов увеличивали до 500, где путь трения $L \approx 7$ м при нагрузке $F = 10$ Н. В качестве экспериментальных трибологических характеристик выступали два параметра: L — длина пройденного штифтом пути; J — интенсивность объемного износа образца.

Трибоиспытания проводили при достаточно высоких контактных нагрузках в зоне трения: $F = 1$ Н эквивалентна контактному напряжению в зоне трения $\sigma_c \sim 800$ МПа, нагрузка трения $F = 10$ Н — $\sigma_c \approx 1380 \dots 1850$ МПа.

Для морфологического анализа поверхности после трибологических испытаний использовали профилометр NewView-600 (ZYGO). Обработку данных выполняли с помощью программного обеспечения MetroPro 9 и MountainsMap Imaging Topography 10.

Обе структуры покрытий CrAlSiN/Cr и CrAlSiN/Ti реализуют концепцию многослойного нанокompозита, где чередование твердого нитридного слоя и пластичного металлического слоя обеспечивает сочетание высокой твердости и трещиностойкости.

Образец № 1 — многослойная система CrAlSiN/Cr общей толщиной $\sim 3,6$ мкм: подслой Cr (адгезионный); шесть слоев Cr толщиной ~ 100 нм (суммарно 0,6 мкм); шесть слоев CrAlSiN толщиной ~ 500 нм (суммарно 3,0 мкм). В системе CrAlSiN/Cr все слои выполнены из хромосодержащих материалов, что обеспечивает химическую однородность системы и снижает вероятность взаимной диффузии элементов на межфазных границах.

Образец № 2 с достаточно толстым (4,6 мкм) многослойным композиционным покрытием системы CrAlSiN/Ti включал в себя двенадцать слоев: подслой Ti (0,6 мкм), далее к поверхности чередующиеся слои CrAlSiN и Ti, на поверхности — слой CrAlSiN (толщина слоев Ti примерно одинаковая (0,5 мкм). Толщина слоев CrAlSiN плавно уменьшалась от 0,3 мкм у подложки до 0,15 мкм на поверхности.

Результаты и обсуждение. Монослойное покрытие CrAlSiN достаточно подробно описано в предыдущих работах [17, 18]. Ионно-плазменные многокомпонентные покрытия в силу технологии синтеза неравновесные по составу и структуре. Неравновесный характер формирования покрытий выражен отсутствием в структуре покрытия CrAlSiN равновесной фазы Cr₂N (с гексагональной плотноупакованной решеткой). Фазовый состав меняется по толщине покрытия: по мере приближения от поверхности покрытия к поверхности подложки оксид алюминия постепенно исчезает, а хром переходит из химически связанного состояния (в виде CrN) в свободное и формирует вместе с азотом матричный твердый раствор покрытия.

Таблица 1

Характеристики исследуемых покрытий

Параметр	CrAlSiN/Cr	CrAlSiN/Ti
Технология нанесения покрытия	Дуговое распыление	Гибридная (катодно-дуговое испарение + магнетронное распыление)
Тип покрытия	Подслой Cr + многослойная система (6 + 6)	Подслой Ti + многослойная система (6 + 6)
Средняя толщина слоя $h_{\text{ср}}$, мкм	3,6	4,6
Твердость H , ГПа	$29,57 \pm 7,53$	$23,07 \pm 6,38$
Модуль упругости E , ГПа	$306,13 \pm 56,99$	$244,26 \pm 41,32$
H/E	0,0960	0,0945
H^3/E^2 , ГПа	0,289	0,206

Несмотря на использование системы магнитной сепарации, капельную фазу в рассматриваемых покрытиях полностью устранить не удалось. В остальном же можно констатировать, что полученные покрытия обладают однородностью состава и структуры, видимых макродефектов нет, прилегание слоев покрытия друг к другу плотное и бездефектное, как и прилегание покрытий к стальной подложке.

Сравнительные характеристики и механические свойства образцов приведены в табл. 1.

Отличительной особенностью выступает твердость покрытий H . Покрытие с прослойками Ti имеет твердость 23,07 ГПа, что значительно меньше, чем у образца с прослойками Cr (29,57 ГПа). Данный результат получен при проведении индентирования, где у образца № 1 глубина погружения индентора составляла 100 нм (при том, что толщина верхнего слоя 150 нм), а у образца № 2 — 300 нм, что нарушает методическое правило «Бюкле 1/10». Влияние на результаты индентирования нижележащего мягкого металлического слоя сказывается тем сильнее, чем тоньше слой керамики. Кроме того, среди основных нитридообразующих элементов (Cr и Al) слоя CrAlSiN концентрационное равновесие, обеспеченное в покрытии CrAlSiN/Cr, в покрытии CrAlSiN/Ti сдвинуто в пользу Al (в ~1,5 раза). Это также может вносить свой вклад в изменение микротвердости слоя.

При проведении трибологических испытаний непрерывно регистрировали значения коэффициента трения μ . Для каждой нагрузки определены средние значения на установившемся участке (табл. 2).

Зависимости коэффициента трения μ от пути L и морфологические структуры поверхности образцов при нагрузке $F = 1, 5$ и 10 Н показаны на рис. 1, а–в.

После трибологических исследований проведен анализ механизма изнашивания. Также выполнен морфологический анализ поверхно-

сти, выявивший наглядное различие поверхностей дорожки трения после каждого трибоиспытания. Образец № 1 продемонстрировал стабильный коэффициент трения ($\mu = 0,30 \dots 0,50$) с ростом нагрузки и усталостный механизм изнашивания, характерный для жестких нитридных покрытий. Образец № 2 показал аномально низкие значения коэффициента трения ($\mu = 0,12 \dots 0,18$), что связано с формированием трибослоя, характерного для абразивно-механического изнашивания мягких систем.

Результаты морфологического анализа дорожки трения после испытаний (см. рис. 1, а–в) подтвердили различия характера трения образцов: на дорожке трения образца № 1 видны трещины и фрагментация покрытия без полного ее отслоения, у образца № 2 — следы микро-резания и следы смятия.

Морфологический анализ дорожки трения образца № 1 при нагрузке $F = 1$ Н выявил, что поверхность покрытия сохраняет сплошность, следы износа минимальные, имеются единичные микротрещины, расположенные перпендикулярно направлению скольжения, что типично для ранних стадий усталостного изнашивания. Однако при увеличении нагрузки до 5 Н происходит рост плотности трещин и зарождение тангенциальных трещин вдоль границ столбчатых зерен покрытия, являющееся началом его фрагментации: образование отдельных чешуек размером 5...15 мкм, частично сохраняющих связь с подложкой. При нагрузке $F = 10$ Н наблюдаются развитая дорожка усталостных трещин и частичное отслоение фрагментов покрытия с появлением первичных материалов износа. Механизм изнашивания — усталостный с постепенной фрагментацией покрытия. Высокое значение H^3/E^2 (0,289 ГПа) обеспечивает сопротивление пластической деформации и предотвращает разрушение покрытия.

Структура дорожек трения образца № 2 кардинально отличается от таковой для образца № 1. При нагрузке $F = 1$ Н поверхность дорожки остается гладкой со следами пластического смятия, а при $F = 5$ Н появляются борозды микро-резания. При $F = 10$ Н дорожка приобретает вид, соответствующий абразивному изнашиванию с характерными глубокими бороздами. Механизм изнашивания — абразивно-механический с доминированием пластической деформации и микро-резания. Низкое значение H^3/E^2 (0,206 ГПа) не обеспе-

Таблица 2

Средние значения коэффициента трения при различных значениях нагрузки

Нагрузка F , Н	Коэффициент трения μ образца	
	№ 1	№ 2
1	0,18	0,30
5	0,12	0,45
10	0,15	0,50

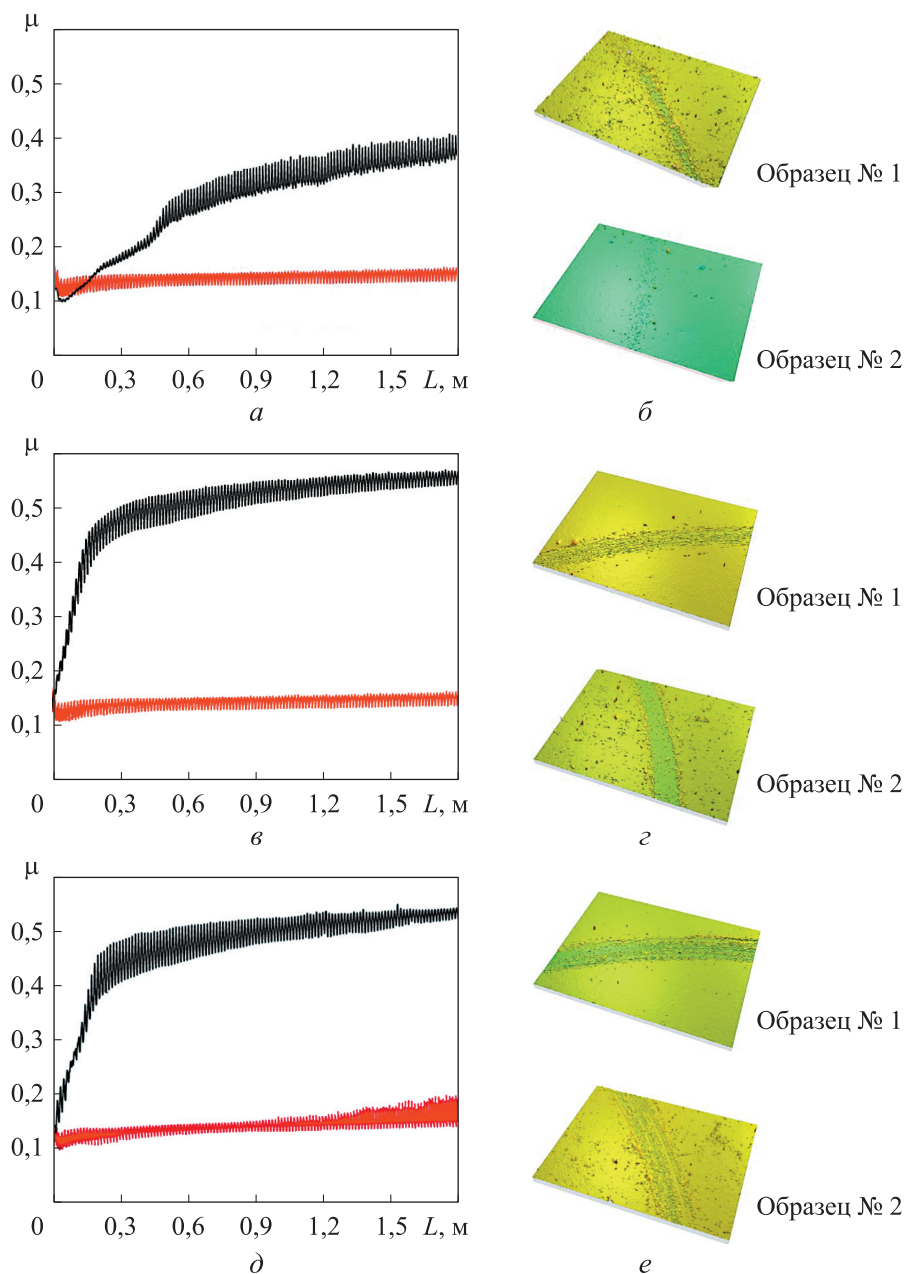


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения μ от пути L (а, в, д) и морфологические структуры поверхности (б, г, е) образцов № 1 (—) и № 2 (—) при нагрузке $F = 1$ (а, б), 5 (в, г) и 10 Н (д, е)

чивает сопротивления контактным нагрузкам, что приводит к смятию покрытия, и его ускоренному износу.

Полученные значения интенсивности объемного износа, ширины и глубины дорожки трения, площади следа трения покрытий образцов № 1 и № 2 приведены в табл. 3

Видно, что у образца с титановыми прослойками при нагрузке $F = 1$ Н интенсивность объемного износа ($36,86 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$) больше, чем у образца с прослойками хрома ($21,2 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$). В качестве объяснения может быть отмечена положительная роль

прослойки хрома в этом покрытии: высокий модуль упругости ($E \approx 300 \text{ ГПа}$) исключает прогиб прослойки CrAlSiN и эффективно демпфирует циклические нагрузки в процессе испытания.

Значительно более высокое значение модуля упругости хрома по сравнению с таковым для титана, наряду с другими факторами, указанными ранее (например, наличие капельной фазы), объясняет преимущество в износостойкости композита CrAlSiN/Cr перед CrAlSiN/Ti. По-видимому, гипотеза о повышении износостойкости композиционного покрытия вслед-

Таблица 3

Значения интенсивности объемного износа и параметров следа трения покрытий исследуемых образцов

Нагрузка F , Н	Интенсивность объемного износа $J \cdot 10^6$, мм ³ /(Н·м)	Ширина дорожки трения, мкм	Глубина дорожки трения, мкм	Площадь следа, трения $S \cdot 10^6$, мкм ²
1	21,2/36,86	93,8/120,3	0,07/0,21	2,76/5,72
5	11,9/21,76	126,2/157,5	0,15/0,27	7,74/16,57
10	12,1/11,24	132,7/158,5	0,44/0,51	15,8/17,7
Примечание. В числителе дроби указаны значения для образца № 1, в знаменателе — для образца № 2.				

ствие наличия пластичных слоев металла, способных тормозить продвижение трещин, в условиях проведенных трибологических испытаний не подтверждена.

По сравнению с титаном хром имеет ограниченную дислокационную подвижность, так как его модуль сдвига один из самых высоких среди металлов ($G_{Cr} = 110$ ГПа), а кристаллическая объемно-центрированная кубическая решетка содержит только одно направление скольжения ($\langle 111 \rangle$). Тогда как модуль сдвига титана более чем в 2 раза меньше ($G_{Ti} = 41,5$ ГПа), а его гексагональная плотноупакованная решетка содержит три направления скольжения: (в базисной плоскости (0001)). Эти фундаментальные свойства определяют разницу в пластичности: относительное удлинение хрома при одноосном растяжении составляет 2 %, а титана — 30...70 % (в зависимости от чистоты) [19].

При увеличении нагрузки до 5 Н ширина дорожки трения у образца с титановыми ламелями стала больше, чем при $F = 1$ Н, при этом она незначительно отличается от ширины дорожки трения при $F = 10$ Н. Эту закономерность подтверждает и график коэффициента трения, который имеет одинаковую амплитуду для $F = 5$ и 10 Н.

У покрытия с ламелями хрома наблюдается плавное увеличение ширины дорожки трения при повышении нагрузки с 1 до 10 Н.

При нагрузке $F = 1$ и 5 Н дорожка остается узкой и равномерной, без выраженных провалов до уровня подслоя, что можно интерпретировать как равномерное распределение контактных напряжений по толщине покрытия и эффективная релаксация усталостных повреждений на межслойных границах. При возрастании нагрузки до 10 Н происходит частичное разрушение верхних слоев CrAlSiN с сохранением значительной части толщины многослойной системы, что отражается в меньшей глубине дорожки трения (0,44 мкм).

Для полноты исследования проведена серия трибологических испытаний при 500 циклах и нагрузке $F = 10$ Н. Зависимости коэффициента трения μ от числа циклов N и морфологические структуры поверхности образцов показаны на рис. 2.

На образце № 1 наблюдается приработка, затем происходит постепенный сруб каплей (на сформированной поверхности имеются дефекты каплевой фазы) и выход на стационарный режим трения, который сопровождается стабильным коэффициентом трения без выраженной амплитуды колебаний.

На образце № 2 с титановыми прослойками идет интенсивное изнашивание на начальной стадии в виде осциллирующей трибограммы. Затем наблюдается плавный рост коэффициента трения (до 0,5), что связано с влиянием частиц износа в зоне сопряжения. Далее происходит увеличение частоты колебаний силы трения, что вызвано образовавшимися участками с выкрошенными слоями покрытия.

Результаты морфологического исследования поверхности образцов после 500 циклов нагружения получены методом сканирующей электронной микроскопии. Дефекты многослойных

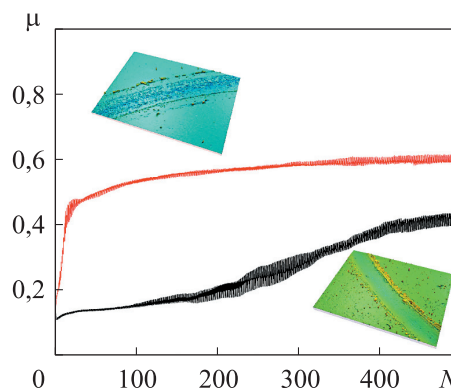


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения μ от числа циклов N и морфологические структуры поверхности образцов № 1 (—) и № 2 (—) при нагрузке $F = 10$ Н

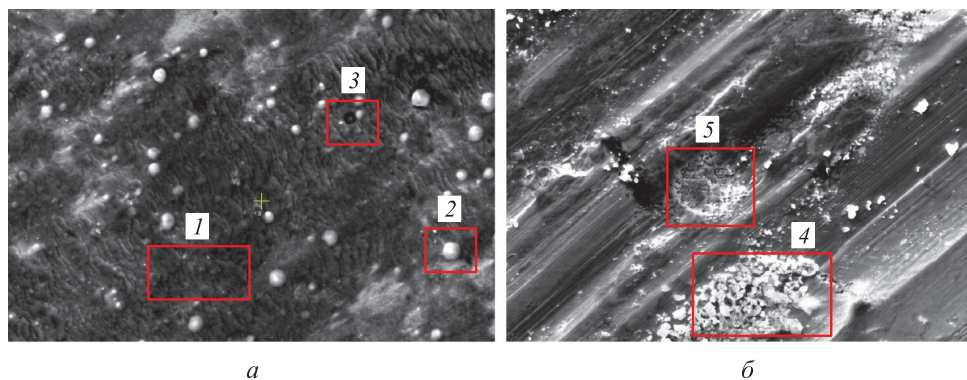


Рис. 3. Результаты морфологического исследования поверхности образцов № 1 (а) и № 2 (б) после 500 циклов нагружения

покрытий CrAlSiN/Ti и CrAlSiN/Cr после трибологических испытаний, присутствующие на поверхности покрытия показаны на рис. 3, где четко выражены возникшие шероховатости покрытия.

Видно, что у образца № 2 интенсивность объемного износа, равная $3,28 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, существенно больше, чем у образца № 1 ($2,86 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$). На поверхности дорожки трения видны следы зарождения усталостного изнашивания в виде сетки микротрещин 1 в поперечном сечении трека. Также на поверхности наблюдаются капельные фазы 2, возникшие при формировании покрытия, которые в результате воздействия индентора вырываются с поверхности, образуя микрократеры 3, показанные в виде темных областей (из-за рассеяния света, вызванного изменением топографии).

Дефекты, появившиеся в процессе нанесения покрытия, зависели от параметров осаждения (температуры, напряжения смещения и др.) и качества поверхности подложки. На рис. 3, б, который соответствует дорожке для покрытия CrAlSiN/Ti, наблюдаются характерные черты абразивного изнашивания с наличием частиц износа 4 на дорожке трения. Отдельные участки 5 имеют выкрашивание слоев покрытия, оголяя раздробленность нижних слоев вследствие циклического воздействия. В этом случае абразивное изнашивание обусловлено трехкомпонентным процессом взаимодействия, частицы износа твердых слоев покрытия выступают в качестве абразива, который создает борозды вдоль направления движения контртела.

Выводы

1. Сравнительный анализ структуры покрытий показал, что технология вакуумного ионно-

плазменного синтеза устойчиво формирует слоистую структуру композитных покрытий CrAlSiN/Cr и CrAlSiN/Ti с заданными геометрическими параметрами.

2. Установлено, что образец № 1 демонстрирует стабильный коэффициент трения (0,30...0,50) с ростом нагрузки и усталостный механизм изнашивания, характеризуемый зарождением трещин, фрагментацией покрытия без катастрофического отслоения.

3. У образца № 2 выявлены аномально низкие значения коэффициента трения (0,12...0,18), связанные с формированием трибослоя. Механизм изнашивания — абразивно-механический с микрорезанием и смятием покрытия.

4. Морфологическая структура поверхности после испытаний коррелирует с механическими параметрами: для образца № 1 характерны усталостные трещины и фрагментация, для образца № 2 — борозды микрорезания.

5. Среди исследованных многослойных металлонитридных ионно-плазменных покрытий более износостойким при сухом трении скольжения оказалось покрытие с металлическими слоями, имеющими более высокие упругие свойства, в частности модуль упругости. При этом пластичность металлических слоев покрытия CrAlSiN/Cr оказалась весьма низкой.

6. Показано, что многослойная структура покрытия CrAlSiN/Cr толщиной 3,6 мкм обеспечивает эффективную работу в условиях сухого трения по схеме шар-по-диск при увеличении числа циклов до 500.

7. Увеличение числа циклов подтвердило эффективность трибологического применения многослойной системы CrAlSiN/Cr, так как этот образец обладает меньшим износом и стабильным коэффициентом трения во всем исследованном диапазоне нагрузки.

Литература

- [1] Veprek S. The search for novel, superhard materials. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1999, vol. 17, no. 5, pp. 2401–2420, doi: <https://doi.org/10.1116/1.581977>
- [2] Zhang S., Wu W., Chen W. et al. Structural optimisation and synthesis of multilayers and nanocomposite AlCrTiSiN coatings for excellent machinability. *Surf. Coat. Technol.*, 2015, 277, pp. 23–29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.033>
- [3] Yu D., Wang C., Cheng X. et al. Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, no. 17, pp. 4950–4955, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.091>
- [4] Philippon D., Godinho V., Nagy P.M. et al. Endurance of TiAlSiN coatings: Effect of Si and bias on wear and adhesion. *Wear*, 2011, vol. 270, no. 7-8, pp. 541–549, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.009>
- [5] Lin C.-H., Tsai Y.-Z., Duh J.-G. Effect of grain size on mechanical properties in CrAlN/SiNx multilayer coatings. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, no. 24, pp. 7312–7315, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.04.100>
- [6] Soldán J., Neidhardt J., Sartory B. et al. Structure–property relations of arc-evaporated Al–Cr–Si–N coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, vol. 202, no. 15, pp. 3555–3562, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.12.041>
- [7] Ding X.-Z., Zeng X.T., Liu Y.C. Structure and properties of CrAlSiN Nanocomposite coatings deposited by lateral rotating cathod arc. *Thin Solid Films*, 2011, vol. 519, no. 6, pp. 1894–1900, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.10.022>
- [8] Settineri L., Faga M.G., Gautier G. et al. Evaluation of wear resistance of AlSiTiN and Al–SiCrN nanocomposite coatings for cutting tools. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57, pp. 575–578, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.103>
- [9] Kim S.K., Van Le V. Cathodic arc plasma deposited TiAlSiN thin films using an Al-15 at.% Si cathode. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, no. 24, pp. 7483–7486, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.029>
- [10] Miletic A., Panjan P., Skoric B. et al. Microstructure and mechanical properties of nanostructured Ti–Al–Si–N coatings deposited by magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2014, vol. 241, pp. 105–111, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.050>
- [11] Zhao F., Ge Y., Wang L. et al. Tribological and mechanical properties of hardness-modulated TiAlSiN multilayer coatings fabricated by plasma immersion ion implantation and deposition. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, vol. 402, art. 126475, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126475>
- [12] Li G., Sun J., Xu Y. et al. Microstructure, mechanical properties, and cutting performance of TiAlSiN multilayer coatings prepared by HiPIMS. *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 353, pp. 274–281, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.017>
- [13] Liu Y., Yu S., Shi Q. et al. Multilayer coatings for tribology: a mini review. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 9, art. 1388, doi: <https://doi.org/10.3390/nano12091388>
- [14] Stueber M., Holleck H., Leiste H. et al. Concepts for the design of advanced nanoscale PVD multilayer protective thin films. *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 483, no. 1-2, pp. 321–333, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.133>
- [15] Liew W.Y.H., Lim H.P., Melvin G.J.H. et al. Thermal stability, mechanical properties, and tribological performance of TiAlXN coatings: understanding the effects of alloying additions. *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, vol. 17, pp. 961–1012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.005>
- [16] Faga M.G., Gautier G., Cartasegna F. et al. AlSiTiN and AlSiCrN multilayer coatings: effects of structure and surface composition on tribological behavior under dry and lubricated conditions. *Appl. Surf. Sci.*, 2016, vol. 365, pp. 218–226, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.237>
- [17] Колесников В.И., Кудряков О.В., Варавка В.Н. и др. Особенности структурно-фазового состояния и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий системы Cr–Al–Si–N. *Физическая мезомеханика*, 2022, т. 25, № 6, с. 26–38, doi: https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_6_26

- [18] Кудряков О.В., Колесников В.И., Колесников И.В. и др. Особенности деградации нитридных ионно-плазменных покрытий при трении скольжения. *Физическая мезомеханика*, 2025, т. 28, № 3, с. 22–34, doi: https://doi.org/10.55652/1683-805X_2025_28_3_22-34
- [19] Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., ред. *Физические величины*. Москва, Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

References

- [1] Veprek S. The search for novel, superhard materials. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1999, vol. 17, no. 5, pp. 2401–2420, doi: <https://doi.org/10.1116/1.581977>
- [2] Zhang S., Wu W., Chen W. et al. Structural optimisation and synthesis of multilayers and nanocomposite AlCrTiSiN coatings for excellent machinability. *Surf. Coat. Technol.*, 2015, 277, pp. 23–29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.033>
- [3] Yu D., Wang C., Cheng X. et al. Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, no. 17, pp. 4950–4955, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.091>
- [4] Philippon D., Godinho V., Nagy P.M. et al. Endurance of TiAlSiN coatings: Effect of Si and bias on wear and adhesion. *Wear*, 2011, vol. 270, no. 7-8, pp. 541–549, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.009>
- [5] Lin C.-H., Tsai Y.-Z., Duh J.-G. Effect of grain size on mechanical properties in CrAlN/SiNx multilayer coatings. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, no. 24, pp. 7312–7315, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.04.100>
- [6] Soldán J., Neidhardt J., Sartory B. et al. Structure–property relations of arc-evaporated Al–Cr–Si–N coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, vol. 202, no. 15, pp. 3555–3562, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.12.041>
- [7] Ding X.-Z., Zeng X.T., Liu Y.C. Structure and properties of CrAlSiN Nanocomposite coatings deposited by lateral rotating cathod arc. *Thin Solid Films*, 2011, vol. 519, no. 6, pp. 1894–1900, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.10.022>
- [8] Settineri L., Faga M.G., Gautier G. et al. Evaluation of wear resistance of AlSiTiN and Al–SiCrN nanocomposite coatings for cutting tools. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57, pp. 575–578, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.103>
- [9] Kim S.K., Van Le V. Cathodic arc plasma deposited TiAlSiN thin films using an Al-15 at.% Si cathode. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, no. 24, pp. 7483–7486, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.029>
- [10] Miletic A., Panjan P., Skoric B. et al. Microstructure and mechanical properties of nanostructured Ti–Al–Si–N coatings deposited by magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2014, vol. 241, pp. 105–111, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.050>
- [11] Zhao F., Ge Y., Wang L. et al. Tribological and mechanical properties of hardness-modulated TiAlSiN multilayer coatings fabricated by plasma immersion ion implantation and deposition. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, vol. 402, art. 126475, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126475>
- [12] Li G., Sun J., Xu Y. et al. Microstructure, mechanical properties, and cutting performance of TiAlSiN multilayer coatings prepared by HiPIMS. *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 353, pp. 274–281, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.017>
- [13] Liu Y., Yu S., Shi Q. et al. Multilayer coatings for tribology: a mini review. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 9, art. 1388, doi: <https://doi.org/10.3390/nano12091388>
- [14] Stueber M., Holleck H., Leiste H. et al. Concepts for the design of advanced nanoscale PVD multilayer protective thin films. *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 483, no. 1-2, pp. 321–333, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.133>
- [15] Liew W.Y.H., Lim H.P., Melvin G.J.H. et al. Thermal stability, mechanical properties, and tribological performance of TiAlXN coatings: understanding the effects of alloying additions. *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, vol. 17, pp. 961–1012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.005>
- [16] Faga M.G., Gautier G., Cartasegna F. et al. AlSiTiN and AlSiCrN multilayer coatings: effects of structure and surface composition on tribological behavior under dry and lubricated

- conditions. *Appl. Surf. Sci.*, 2016, vol. 365, pp. 218–226, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.237>
- [17] Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Varavka V.N. et al. Structural-phase state and properties of Cr-Al-Si-N coatings obtained by vacuum arc plasma deposition. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2022, vol. 25, no. 6, pp. 26–38, doi: https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_6_26 (in Russ.). (Eng. version: *Phys. Mesomech.*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 126–136, doi: <https://doi.org/10.1134/S1029959923020029>)
- [18] Kudryakov O.V., Kolesnikov V.I., Kolesnikov I.V. et al. Degradation features of ion-plasma nitride coatings under sliding friction. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2025, vol. 28, no. 3, pp. 22–34, doi: https://doi.org/10.55652/1683-805X_2025_28_3_22-34 (in Russ.). (Eng. version: *Phys. Mesomech.*, 2025, vol. 28, no. 5, pp. 584–593, doi: <https://doi.org/10.1134/S1029959924601209>)
- [19] Grigoryev I.S., Meylikhov E.Z., ed. *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 003.06.2026

Информация об авторах

КОЛЕСНИКОВ Игорь Владимирович — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». Ростовский государственный университет путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, зд. 2, e-mail: ooooedt@rambler.ru).

ИВАНОЧКИН Павел Григорьевич — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». Ростовский государственный университет путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, зд. 2, e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru).

АНИКИНА Елена Дмитриевна — младший научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». Ростовский государственный университет путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, зд. 2, e-mail: al.anikina2002@mail.ru).

МАНТУРОВ Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». Ростовский государственный университет путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, зд. 2, e-mail: manturoff_dc@mail.ru).

Information about the authors

KOLESNIKOV Igor Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Bldg. 2, e-mail: ooooedt@rambler.ru).

IVANOCHKIN Pavel Grigorievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Leading Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Bldg. 2, e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru).

ANIKINA Elena Dmitrievna — Junior Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Bldg. 2, e-mail: al.anikina2002@mail.ru).

MANTUROV Dmitry Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Bldg. 2, e-mail: manturoff_dc@mail.ru).

СИДАШОВ Андрей Вячеславович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». Ростовский государственный университет путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, зд. 2, e-mail: sav_teor_meh@rgups.ru).

SIDASHOV Andrey Vyacheslav — Doctor of Science (Physics and Math), Leading Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Bldg. 2, e-mail: sav_teor_meh@rgups.ru).

АЗОЯН Анаид Иосиповна — кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». Ростовский государственный университет путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, зд. 2, e-mail: azojan.anaid@mail.ru).

AZOYAN Anaïd Iosipovna — Candidate of Science (Eng.), Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Bldg. 2, e-mail: azojan.anaid@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колесников И.В., Иваночкин П.Г., Аникина Е.Д., Мантуров Д.С., Сидашов А.В., Азоян А.И. Сравнительный анализ трибологических характеристик многослойных металлонитридных систем CrAlSiN/Cr и CrAlSiN/Ti. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 8, с. 20–31.

Please cite this article in English as:

Kolesnikov I.V., Ivanochkin P.G., Anikina E.D., Manturov D.S., Sidashov A.V., Azoyan A.I. Comparative analysis of tribological characteristics of multilayer metal nitride systems CrAlSiN/Cr and CrAlSiN/Ti. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 8, pp. 20–31.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Физические основы материаловедения.
Курс лекций»**

**Авторы: Ю.А. Курганова, Р.С. Фахуртдинов,
Л.П. Фомина**

Рассмотрены теоретические основы и прикладные аспекты материаловедения, предусмотренные образовательным стандартом, представлен широкий спектр конструкционных материалов. В конце каждого модуля приведены контрольные вопросы и задания для самоконтроля.

Учебное пособие разработано в соответствии с учебными планами и программой дисциплины «Физические основы материаловедения» МГТУ им. Н.Э. Баумана для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки: 16.03.01 «Техническая физика», а также может представлять интерес для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Материаловедение».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>