

И. В. Колесников, К. Н. Политыко, А. И. Азоян, М. М. Четверик

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ CrAlSiN/Cr *

Аннотация. Исследованы структурные особенности, механические и трибологические свойства многослойного металлокерамического покрытия CrAlSiN/Cr, нанесенного методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) на подложки из стали 40ХН. Архитектура покрытия сочетает адгезионный слой Cr, наноструктурный функциональный слой CrAlSiN, промежуточный слой Cr с чередованием до 12 слоев и завершающий слой CrAlSiN, предназначенные для повышения несущей способности и снижения распространения трещин при скользящем контакте. Методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии и наноиндентирования исследованы микроструктура, элементный состав, твердость, модуль упругости. Трибологические испытания проводились по схеме «шар – диск», где контертелом являлся шар из Al_2O_3 , которые позволили установить коэффициент трения и скорость износа при сухом трении.

Трибологические испытания подтвердили стабильность коэффициента трения и высокую износостойкость, что обусловлено многослойной архитектурой и оптимальными механическими свойствами материала. Чередование жестких керамических слоев CrAlSiN с пластичными прослойками Cr создает эффективную систему внутренних барьеров, препятствующих распространению трещин и локализирующих пластическую деформацию. Такое сочетание структурных особенностей и механических характеристик делает покрытие CrAlSiN/Cr эффективным решением для деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и ограниченного смазывания.

Ключевые слова: многослойные покрытия, PVD-технология, металлокерамические композиты, CrAlSiN/Cr, трибологические испытания, износостойкость, микротвердость, коэффициент трения, нанокompозитные структуры

Для цитирования: Структура, свойства и износостойкость многослойных металлокерамических покрытий CrAlSiN/Cr / И. В. Колесников, К. Н. Политыко, А. И. Азоян, М. М. Четверик // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 210–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_210.

Введение

Развитие современного машиностроения сопровождается ужесточением требований к ресурсу и надежности деталей трения, работающих при повышенных контактных напряжениях, скоростях скольжения и ограниченном объеме смазки [1, 2]. Традиционные нитридные покрытия типа TiN и CrN позволили существенно повысить износостойкость и коррозионную стойкость стальных деталей, однако многослойные системы часто ограничены по сочетанию твердости, трещиностойкости и сопротивления усталостному разрушению при циклическом нагружении, но с большим функциональным ресурсом, который необходимо реализовывать [3, 4].

Одним из наиболее эффективных подходов к повышению ресурса деталей машин является формирование многослойных и градиентных нитридных PVD-покрытий с контролируемой архитектурой слоя [5, 6]. Наноламинированная структура, чередование высокотвердых и более вязких слоев, а также изменение химического состава по толщине позволяют одновременно повышать твердость, вязкость, сопротивление трещинообразованию и критическую нагрузку разрушения. В работе [7] показано, что многослойные TiN/CrN, CrN/Cr₂N, CrTiN/CrCN и аналогичные системы демонстрируют сниженный коэффициент трения и меньший износ по сравнению с однослойными покрытиями за счет эффективного рассеяния энергии трещин и подавления локальной концентрации напряжений на интерфейсах.

Особый интерес для машиностроения представляют многослойные нитридные покрытия на основе систем MeN/Me, в которых введение Al и Si формирует нанокompозитную структуру и способствует образованию термостойких оксидных слоев в условиях трения [8, 9]. В работе [10] показано, что

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-30007-П. – URL: <https://rscf.ru/project/21-79-30007/> в Ростовском государственном университете путей сообщения.

комбинированные покрытия MeN/DLC (в частности, CrAlSiN/DLC) позволяют снизить коэффициент и адаптировать свойства слоя к различным режимам нагружения. Такие многослойные покрытия имеют перспективу использования в режущем инструменте благодаря устойчивости к окислительному и абразивному износу за счет сочетания высокой твердости и низкого коэффициента трения [11, 12]. В работе [13] показано, что оптимизация архитектурного слоя, например, градиентное распределение Al и Si, а также наличие слоев Cr или CrN позволяет расширить диапазон циклических нагрузок и снизить риск образования внутренних дефектов (межслойное отслаивание, образование трещин).

Из проведенного обзора литературных источников можно сделать вывод, что влияние структуры многослойных покрытий, полученных PVD-методом, на трибологические и механические свойства недостаточно изучено. Это особенно актуально для условий сухого скольжения, характерных для элементов подвижных соединений, направляющих и уплотняющих поверхностей, где переход к многослойным нитридным покрытиям способен обеспечить снижение износа и стабилизацию работы узлов при ограниченной смазке. В этой связи целью настоящей работы является комплексное исследование структуры, механических и трибологических свойств многослойного нитридного PVD-покрытия CrAlSiN/Cr, а также оценка влияния многослойной архитектуры на ресурс и надежность узлов трения машиностроения.

Методика исследований

Синтез металлокерамических композиционных покрытий CrAlSiN/Cr осуществлялся методом физического осаждения в вакуумной камере BRV600 [14]. Задача технологии нанесения этих покрытий может быть решена путем катодно-дугового испарения, когда используется согласованная работа катодов Cr и силумина Al-Si. У данных покрытий значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) соседних металлических и керамических слоев отличаются незначительно. При этом металлические слои Cr, в отличие от керамики CrAlSiN, обладают высокой пластичностью, что априори способствует релаксационным процессам. Эти свойства рассматриваемых покрытий обеспечивают их более высокую технологичность при вакуумном ионно-плазменном напылении на установке BRV600.

Архитектура покрытий CrAlSiN/Cr регулируется небольшим числом технологических параметров: временем напыления каждого слоя, которое определяет их толщину, и частотой перемещения (открытия-закрытия) заслонки, с помощью которой регулируются толщина и число слоев. Вольт-амперные характеристики режима напыления подбирались при оптимизации состава слоя CrAlSiN и в дальнейшем, в процессе формирования многослойного покрытия, как правило, оставались неизменными. Целевым направлением при получении многослойного покрытия было формирование заданного элементного состава слоев CrAlSiN в композиционном покрытии, которое ориентировалось на примерно эквивалентный состав Cr (~25 ат. %) и Al (~25 ат. %) и на содержание Si как аморфизирующего элемента в пределах 4–8 %. Концентрация N, как основного элемента при формировании нитридных фаз покрытия и определяющего его керамическую природу, должно быть в пределах (~45–50 ат. % N).

Реализация многослойной системы осуществлялась по схеме: Cr (подслой) + CrAlSiN + Cr + CrAlSiN + Cr... с общим количеством слоев 12 и завершающим слоем CrAlSiN на поверхности. Для увеличения адгезии между подложкой из стали 40XH и нитридным слоем катодно-дуговым методом осаждался подслей Cr в течение 1 ч. Нитридный слой CrAlSiN осаждался катодно-дуговым методом с двух катодов в среде N (% N – 11 %) и Ar (% Ar – 6 %) в течение 45 мин. Металлический слой Cr осаждался в течение 1 ч в среде Ar (% Ar – 7 %). Для исследования влияния толщины на механические свойства была проведена серия экспериментов, в которой время осаждения нитридного слоя CrAlSiN составляло 1,5 ч, а промежуточного слоя Cr – до 2 ч.

Определение толщины, структуры, состава покрытия осуществлялось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ, SEM) с использованием однолучевого микроскопа ZEISS EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным анализатором X-Max 50.

Исследование твердости H и модуля упругости E проводили на приборе NanoTest 600. Посредством изменения нагрузки в широких пределах платформа позволяет проводить измерения в нано- и микромасштабе по методу непрерывного индентирования [15]. Процедура состояла из 10 уколов в различных точках поверхности покрытия с установленным ограничением максимальной глубины проникновения индентора, с контролем максимальной глубины внедрения индентора не более 10 % от толщины покрытия. Были получены значения микротвердости H и приведенного модуля упругости E_r , а также подсчитаны значения H/E_r и H^3/E_r^2 . Эксперимент реализован при соблюдении ГОСТ 8.748–2011 и рекомендаций по статистической обработке данных, изложенных в ГОСТ Р 50779.25–2005 и ГОСТ Р ИСО 16269-4–2017.

Определение трибологических свойств покрытия было выполнено в соответствии с методиками DIN 50324 и ASTM G99 [16, 17] на трибометре TRB по схеме испытаний «шар – диск» (контртело Al_2O_3

диаметром 6 мм), профиль лунки износа определяли при помощи оптического профилометра Zygo NewView 600. Такой подход позволил определить коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца I. Параметры исследования: радиус 2,2 мм; линейная скорость 1 мм/с; вертикальная нагрузка 10 Н; длина пути 1,8 м; время испытания 1800 с. Расчет интенсивности износа производился по формуле

$$I = \frac{V}{N \cdot L}, \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м},$$

где V – объем изношенного материала; N – нормальная нагрузка, Н; L – общий путь трения, м.

Результаты исследований

На рис. 1 представлена кросс-секция, специально выполненная в зоне случайно образовавшегося скола покрытия.

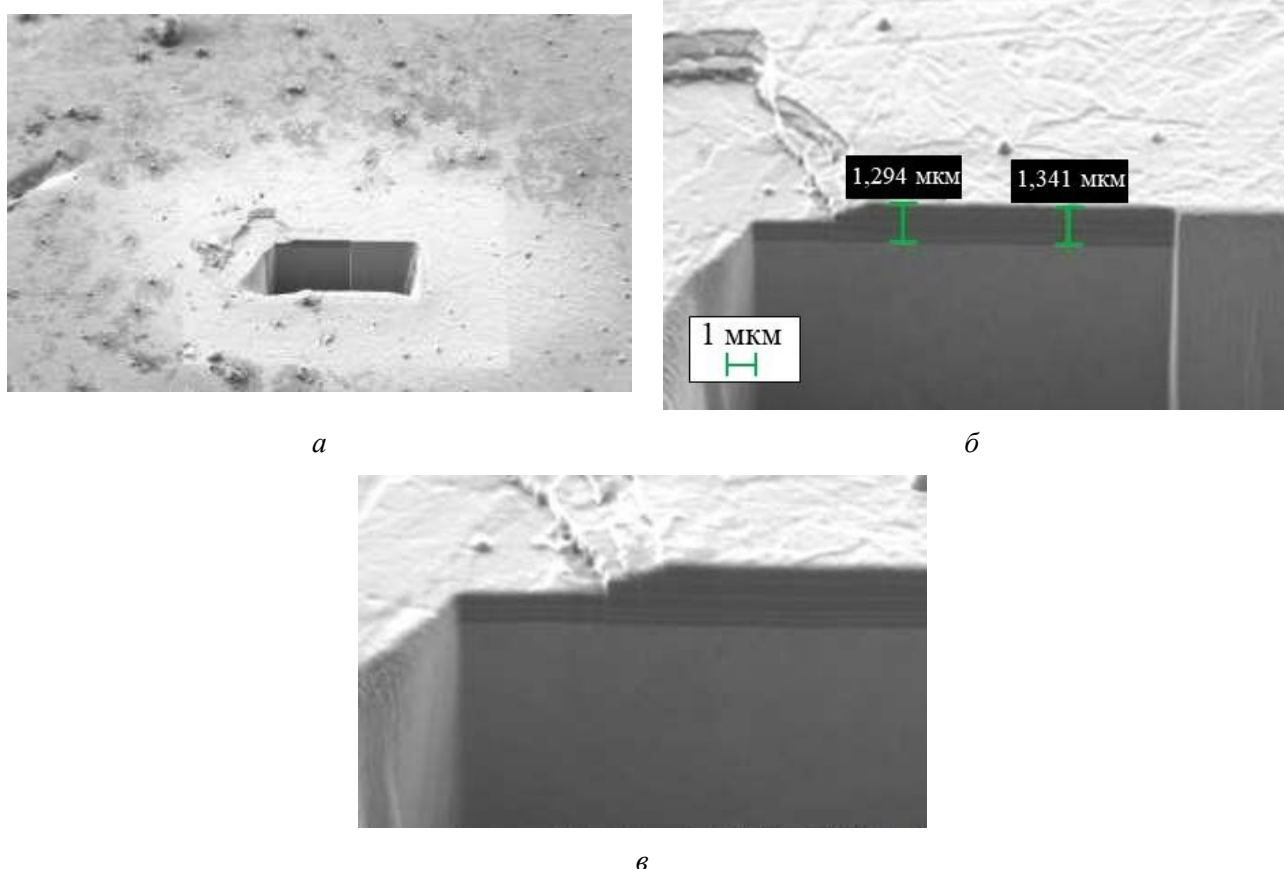


Рис. 1. Многослойное композиционное металлокерамическое покрытие CrAlSiN/Cr, кросс-секция СЭМ:

a – общий вид кросс-секции; b – поперечное сечение покрытия в зоне скола;
 c – микроструктура покрытия в поперечном сечении при максимальном увеличении микроскопа

На рис. 1, b хорошо видно, что разрушение покрытия происходит по границам тонких металлических слоев Cr путем обламывания отдельных слоев CrAlSiN. По-видимому, механизм деградации подобных металлокерамических покрытий начинается с пластической деформации металлического слоя (Cr), которая превысила критическое значение. Если это значение не превышено, то в пределах докритической деформации высокая пластичность металлических слоев покрытия должна обеспечивать процессы релаксации внутренних напряжений при эксплуатации покрытий в условиях трения и износа.

На рис. 2 приведены несколько типовых вариантов структуры исследуемых покрытий CrAlSiN/Cr: относительно тонкое покрытие с соизмеримыми по толщине металлокерамическими слоями (рис. 2, a, b); типичный вид поверхности покрытия системы CrAlSiN/Cr (рис. 2, c).

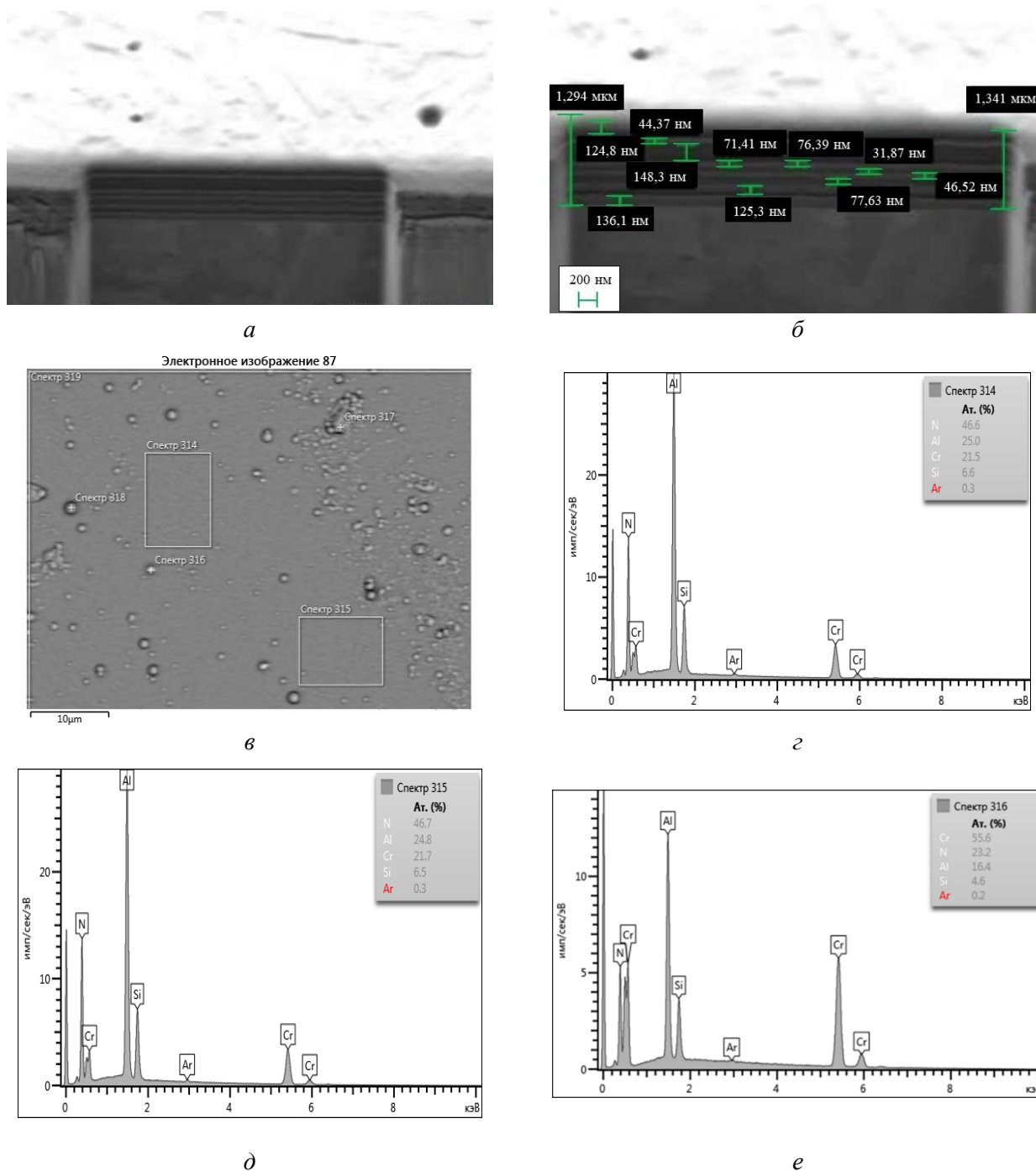


Рис. 2. Многослойные композиционные металлокерамические покрытия CrAlSiN/Cr, СЭМ:

а, б – поперечное сечение тонкого (1,13 мкм) покрытия, кросс-секция СЭМ;
в – электронное изображение с областями сканирования, кросс-секция СЭМ;
г – распределение элементов в зоне покрытия («Спектр 314»); *д* – распределение элементов в зоне покрытия («Спектр 315»); *е* – распределение элементов в зоне капельной фазы («Спектр 316»)

Представленные микроснимки показывают, что полученные покрытия имеют однородную структуру, плотное прилегание слоев друг к другу и к подложке. Внутренних дефектов, способных повлиять на свойства покрытий при механических или трибологических испытаниях, не обнаружено. На поверхности покрытий имеется капельная фаза Cr (рис. 2, *в*, *е*), однако размеры капель незначительны ($d_k \sim 1,5$ мкм, рис. 2, *е*), и распределены они на расстояниях, значительно превышающих их размеры (рис. 2, *в*).

Аналогичная поверхность часто наблюдается у вакуумных ионно-плазменных покрытий при отсутствии или недостаточной эффективности магнитной сепарации. Подобное распределение капельной

фазы не оказывает влияния на трибологические характеристики покрытий при испытаниях на трение скольжения. При механических испытаниях по методу непрерывного индентирования влияние капельной фазы сказывается только на некоторых статистических показателях и не влияет на усредненные значения твердости H и модуля упругости E покрытия.

Очевидно, что в многослойных покрытиях CrAlSiN/Cr механические свойства H и E , определенные методом непрерывного индентирования, будут зависеть от толщины и взаиморасположения металлических и керамических слоев в покрытии. Для исследования влияния толщины металлокерамических 2D-композиционных покрытий CrAlSiN/Cr на механические свойства нами получены покрытия с толщиной 1,3 мкм и 3,6 мкм. Механические характеристики покрытий CrAlSiN/Cr с разной толщиной представлены в таблице.

Механические характеристики композиционного покрытия CrAlSiN/Cr с различной толщиной

Покрытие	Толщина покрытий	Микротвердость H , ГПа	Приведенный модуль упругости E_r , ГПа	H/E_r	H^3/E_r^2
CrAlSiN/Cr	1,3 мкм	$31,56 \pm 5,55$	$310,84 \pm 19,99$	$0,101 \pm 0,015$	$0,341 \pm 0,119$
CrAlSiN/Cr	3,6 мкм	$29,57 \pm 7,53$	$306,13 \pm 56,99$	$0,096 \pm 0,012$	$0,289 \pm 0,149$

Результаты сравнения данных в таблице показали, что при увеличении толщины покрытия значение микротвердости снизилось на ~6 %, а значение приведенного модуля упругости практически не изменилось. Это, в свою очередь, привело к некоторому снижению значений H/E_r и H^3/E_r^2 . Следует отметить, что существенно возросла неоднородность характеристик покрытия. Отношение величины среднеквадратического отклонения к величине среднего значения для микротвердости выросло с 17,5 % у тонкого покрытия до 25 % у толстого покрытия, для приведенного модуля упругости – с 6 до 19 %. Кроме того, у металлокерамических покрытий CrAlSiN/Cr (см. таблицу) механические характеристики H и E в целом оказываются выше, чем у нитридуглеродных покрытий TiN/DLC [18]. В какой-то степени это может быть связано с наличием релаксационных прослоек Ti между нитридными (TiN) и углеродными (DLC) слоями покрытия TiN/DLC.

Таким образом, результаты индентирования не дают ясных корреляций со структурой покрытий CrAlSiN/Cr. Так, вопреки логике, увеличение толщины покрытия с уменьшением относительной толщины металлических слоев привело к снижению среднестатистических значений механических свойств покрытия.

В течение проведения всего цикла трибологических испытаний шла непрерывная запись изменения коэффициента трения в зависимости от пройденного пути. Интерпретация изменения коэффициента трения представлена на рис. 3.

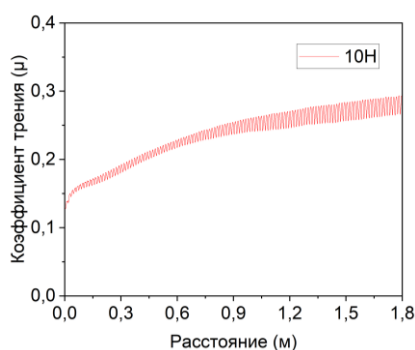


Рис. 3. Графики коэффициентов трения μ в зависимости от пройденного пути L образца при нагрузке 10 Н

После испытаний была исследована морфология поверхности на профилометре NewView 600s для оценки износа нанесенного слоя. Исследования поверхности показали отсутствие износа у образца после трибоиспытаний при вертикальной нагрузке 10 Н (рис. 4).

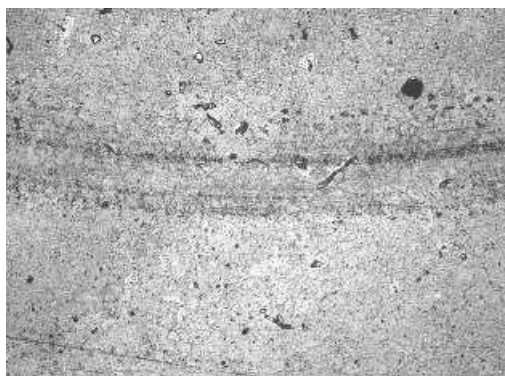


Рис. 4. Поверхность покрытия CrAlSiN/Cr после испытания при нагрузке 10 Н

Проведенное исследование трибологических свойств позволило установить, что многослойное покрытие CrAlSiN/Cr имеет низкий и стабильный коэффициент трения, монотонно увеличивающийся в течение всего пути трения от 0,14 до 0,25. Данное поведение коэффициента трения объясняется сочетанием высокой твердости и упругой деформации керамического слоя CrAlSiN (см. таблицу). Также данные факты подтверждаются снимком дорожки трения после испытания (см. рис. 4). Дорожка трения выглядит гладкой, без явных следов износа, поверхностных дефектов. Наблюдаются следы приработки контртела (Al_2O_3) без явно выраженного износа покрытия, реализуется мягкий режим трения без потери объема материала покрытия. Именно поэтому интенсивность износа для покрытия CrAlSiN/Cr при 10 Н не рассчитывается. Важным фактором, обеспечившим отсутствие износа при данных параметрах исследования, является наличие промежуточных слоев Cr и многослойной архитектуры поверхности. Чередование металлических слоев с керамическими формирует систему внутренних барьеров, локализуя деформацию и препятствующую трещинообразованию. Полученное значение коэффициента трения $\mu = 0,25$ типично для многослойных наноструктурированных нитридных покрытий с высокой твердостью и износостойкостью [5, 8, 12].

Анализ экспериментальных результатов (см. рис. 3, 4) позволяет предположить, что при данных условиях испытания (скорость 1 мм/с; вертикальная нагрузка 10 Н; длина пути 1,8 м) реализуется режим приработки контртела с поверхностью покрытия, поэтому для получения значения интенсивности износа требуется провести дополнительные исследования с увеличением параметров испытания.

Таким образом, при нагрузке 10 Н у многослойного покрытия CrAlSiN/Cr наблюдается практически нулевой износ покрытия, не фиксируемый профилометром. Вклад многослойной структуры состоит в том, что она сочетает высокую твердость керамического слоя CrAlSiN с повышенной трещиностойкостью промежуточного слоя Cr покрытия CrAlSiN/Cr.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что многослойное металлокерамическое покрытие CrAlSiN/Cr обладает высокими трибологическими характеристиками и формирует стабильную, плотную структуру с хорошей адгезией к подложке, без выраженных внутренних дефектов.

Механические испытания показали, что микротвердость покрытий составляет около 30 ГПа при приведенном модуле упругости порядка 300 ГПа, что превосходит показатели аналогичных TiN/DLC систем. При увеличении толщины покрытия наблюдается незначительное снижение твердости на 6 %.

Трибологические испытания позволили установить, что многослойное покрытие CrAlSiN/Cr обладает стабильным коэффициентом трения на уровне 0,25 с высокой износостойкостью. При данных условиях испытания наблюдается приработка контртела с покрытием при отсутствии износа.

Многослойная структура покрытия CrAlSiN/Cr сочетает высокую твердость керамического слоя CrAlSiN с повышенной трещиностойкостью промежуточного слоя Cr, которые эффективно препятствуют образованию внутренних дефектов. Это стабилизирует коэффициент трения и существенно снижает износ, делая такие покрытия перспективными для применения в узлах трения с повышенными требованиями к износостойкости.

Список литературы

1 Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путём формирования структуры и свойств их поверхностного

References

1 Enhancing the wear resistance of metallic and metal-polymer tribosystems by forming the structure

слоя / И. В. Колесников, П. Д. Мотренко, В. И. Колесников, Д. С. Мантуров. – Москва : ВИНТИ РАН, 2021. – 168 с. – ISBN 978-5-902928-92-8.

2 **Колесников, И. В.** Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения / И. В. Колесников. – Москва : ВИНТИ РАН, 2017. – 384 с. – ISBN 978-5-902928-72-0.

3 Multilayer coatings for tribology : A mini review / Y. Liu, S. Yu, Q. Shi, X. Ge, W. Wang // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – Article no. 1388. – DOI 10.3390/nano12091388.

4 Fatigue life of TiN and CrN coatings in rolling contact / E. Vera, M. Vite, E. Gallardo, J. Laguna-Camacho // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*. – 2013. – Vol. 227, No. 4. – P. 339–348. – DOI 10.1177/1350650112463844.

5 Microstructure, mechanical and tribological properties of gradient CrAlSiN coatings deposited by magnetron sputtering and arc ion plating technology / Q. Fan, S. Zhang, J. Lin [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2022. – Vol. 760. – Article no. 139490. – DOI 10.1016/j.tsf.2022.139490.

6 Influence of Al and Si content on structure and mechanical properties of arc evaporated Al–Cr–Si–N thin films / C. Tritremmel, R. Daniel, M. Lechthaler, P. Polcik, C. Mitterer // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 534. – P. 403–409. – DOI 10.1016/j.tsf.2013.03.017.

7 Structural features and tribological properties of multilayer coatings based on refractory metals / A. D. Pogrebnjak, Y. O. Kravchenko, O. V. Bondar [et al.] // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 240–258. – DOI 10.1134/S2070205118020107.

8 Effect of interlayer design on friction and wear behaviors of CrAlSiN coating under high load in seawater / Y. Ye, Z. Liu, W. Liu [et al.] // *RSC Advances*. – 2018. – Vol. 8. – P. 5596–5607. – DOI 10.1039/C7RA12409K.

9 Исследование свойств покрытий CrAlSiN спектроскопическими методами / А. В. Сидашов, М. В. Бойко, А. Т. Козаков, Д. С. Мантуров // *Вестник машиностроения*. – 2022. – № 2. – С. 60–64. – DOI 10.36652/0042-4633-2022-2-60-64.

10 Покрытия DLC, стабилизированные азотом : оптимизация свойств и режимов нанесения с использованием алгоритмов рандомизированных деревьев и нейронных сетей / А. И. Воропаев, В. И. Колесников, О. В. Кудряков [и др.] // *Физическая мезомеханика*. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

and properties of their surface layer. / I. V. Kolesnikov, P. D. Motrenko, V. I. Kolesnikov, D. S. Manturov. – Moscow : VINITI RAS, 2021. – 168 p. – ISBN 978-5-902928-92-8.

2 **Kolesnikov, I. V.** System analysis and synthesis of processes occurring in metal-polymer friction units for friction and antifriction purposes / I. V. Kolesnikov. – Moscow : VINITI RAS, 2017. – 384 p. – ISBN 978-5-902928-72-0.

3 Multilayer coatings for tribology : A mini review / Y. Liu, S. Yu, Q. Shi, X. Ge, W. Wang // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – Article no. 1388. – DOI 10.3390/nano12091388.

4 Fatigue life of TiN and CrN coatings in rolling contact / E. Vera, M. Vite, E. Gallardo, J. Laguna-Camacho // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*. – 2013. – Vol. 227, No. 4. – P. 339–348. – DOI 10.1177/1350650112463844.

5 Microstructure, mechanical and tribological properties of gradient CrAlSiN coatings deposited by magnetron sputtering and arc ion plating technology / Q. Fan, S. Zhang, J. Lin [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2022. – Vol. 760. – Article no. 139490. – DOI 10.1016/j.tsf.2022.139490.

6 Influence of Al and Si content on structure and mechanical properties of arc evaporated Al–Cr–Si–N thin films / C. Tritremmel, R. Daniel, M. Lechthaler, P. Polcik, C. Mitterer // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 534. – P. 403–409. – DOI 10.1016/j.tsf.2013.03.017.

7 Structural features and tribological properties of multilayer coatings based on refractory metals / A. D. Pogrebnjak, Y. O. Kravchenko, O. V. Bondar [et al.] // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 240–258. – DOI 10.1134/S2070205118020107.

8 Effect of interlayer design on friction and wear behaviors of CrAlSiN coating under high load in seawater / Y. Ye, Z. Liu, W. Liu [et al.] // *RSC Advances*. – 2018. – Vol. 8. – P. 5596–5607. – DOI 10.1039/C7RA12409K.

9 Investigation of the properties of CrAlSiN coatings by spectroscopic methods. / A. V. Sidashov, M. V. Boyko, A. T. Kozakov, D. S. Manturov // *Vestnik Mashinostroeniya*. – 2022. – No. 2. – P. 60–64. – DOI 10.36652/0042-4633-2022-2-60-64.

10 Nitrogen-stabilized DLC coatings : optimization of properties and deposition parameters using randomized tree algorithms and neural networks / A. I. Voropaev, V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov [et al.] // *Physical Mesomechanics*. – 2024. – Vol. 27, No. 2. – P. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

- 11 Advanced PVD coatings for highly loaded components in powertrain applications / K. Bobzin, T. Brögelmann, N. Kruppe, C. Kalscheuer // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 388. – Article no. 125575.
- 12 Structural-phase state and properties of Cr–Al–Si–N coatings obtained by vacuum arc plasma deposition / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka [et al.] // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26, No. 2. – P. 126–136. – DOI 10.1134/S1029959923020029.
- 13 **Teles, V. C.** Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: Effect of interface roughness and of superficial flaws / V. C. Teles, J. D. B. de Mello, W. M. da Silva // Wear. – 2017. – Vols. 376–377. – Part B. – P. 1691–1701. – DOI 10.1016/j.wear.2017.01.116.
- 14 **Политыко, К. Н.** Вакуумная установка для получения ионно-плазменных покрытий трибологического назначения / К. Н. Политыко, А. И. Ворopaев, Д. С. Мантуров // Труды 31-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии-2024», Санкт-Петербург, 25–27 июня 2024 г. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2024. – С. 141–144.
- 15 **Головин, Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 312 с.
- 16 **DIN 50324-1992.** Tribology ; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system). – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 06/12/2026).
- 17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 12.06.2026).
- 18 Structural and mechanical properties of DLC/TiN coatings on carbide for wood-cutting applications / V. Hayeuski, V. Zhyllinski, V. Kazachenko [et al.] // Coatings. – 2023. – Vol. 13. – Article no. 1192. – DOI 10.3390/coatings13071192.
- 11 Advanced PVD coatings for highly loaded components in powertrain applications / K. Bobzin, T. Brögelmann, N. Kruppe, C. Kalscheuer // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 388. – Article no. 125575.
- 12 Structural-phase state and properties of Cr–Al–Si–N coatings obtained by vacuum arc plasma deposition / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka [et al.] // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26, No. 2. – P. 126–136. – DOI 10.1134/S1029959923020029.
- 13 **Teles, V. C.** Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: Effect of interface roughness and of superficial flaws / V. C. Teles, J. D. B. de Mello, W. M. da Silva // Wear. – 2017. – Vols. 376–377. – Part B. – P. 1691–1701. – DOI 10.1016/j.wear.2017.01.116..
- 14 **Polityko, K. N.** Vacuum installation for obtaining ion-plasma coatings for tribological applications / K. N. Polityko, A. I. Voropaev, D. S. Manturov // Vacuum Technology and Equipment – 2024 : proceedings of the 31st All-Russian scientific and technical conference with international participation, Saint Petersburg, June 25–27, 2024. – Saint Petersburg : Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» – 2024. – P. 141–144.
- 15 **Golovin, Yu. I.** Nanoindentation and its capabilities / Yu. I. Golovin. – Moscow : Mashinostroenie, 2009. – 312 p.
- 16 **DIN 50324-1992.** Tribology ; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system). – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 06/12/2026).
- 17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 06/12/2026).
- 18 Structural and mechanical properties of DLC/TiN coatings on carbide for wood-cutting applications / V. Hayeuski, V. Zhyllinski, V. Kazachenko [et al.] // Coatings. – 2023. – Vol. 13. – Article no. 1192. – DOI 10.3390/coatings13071192.

I. V. Kolesnikov, K. N. Polityko, A. I. Azoyan, M. M. Chetverik

STRUCTURE, PROPERTIES, AND WEAR RESISTANCE OF MULTILAYER CrAlSiN CERMET COATINGS

Abstract. This study investigates the structural features, mechanical, and tribological properties of a multilayer metal-ceramic coating (CrAlSiN/Cr) deposited by physical vapor deposition (PVD) onto 40XH steel substrates. The coating's architecture comprises a Cr adhesive layer, a nanostructured functional CrAlSiN layer, an intermediate Cr layer with up to 12 alternating layers, and a final CrAlSiN layer. These layers are designed to increase load-bearing capacity and reduce crack propagation under sliding contact. The microstructure, elemental composition, hardness, and elastic modulus were investigated using scanning electron microscopy, energy-dispersive spectroscopy, and nanoindentation. Tribological tests were conducted using a ball-

on-disk setup, with an Al_2O_3 ball serving as the counterweight. These tests allowed us to determine the friction coefficient and wear rate under dry friction.

Preliminary tribological tests have confirmed the stability of the friction coefficient and high wear resistance, which is due to the multilayer architecture and optimal mechanical properties of the material. The alternation of hard CrAlSiN ceramic layers with ductile Cr interlayers creates an effective system of internal barriers that prevent crack propagation and localize plastic deformation. The combination of structural features and mechanical properties of the CrAlSiN/Cr coating renders it an exceptionally effective solution for components operating under high loads and limited lubrication.

Keywords: multilayer coatings, PVD technology, metal-ceramic composites, CrAlSiN/Cr, tribological testing, wear resistance, microhardness, coefficient of friction, nanocomposite structures.

For citation: Structure, properties, and wear resistance of multilayer CrAlSiN cermet coatings / I. V. Kolesnikov, K. N. Polityko, A. I. Azoyan, M. M. Chetverik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 210–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_210.

Сведения об авторах

Колесников Игорь Владимирович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук,
член-корреспондент РАН,
ведущий научный сотрудник НИЧ,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Политыко Кирилл Николаевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
младший научный сотрудник НИЧ,

Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр
Российской академии наук (ЮНЦ РАН),
лаборатория
транспорта, композиционных материалов
и конструкций ЮНЦ РАН,
младший научный сотрудник,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Азоян Анаид Иосиповна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
кандидат технических наук, доцент,
научный сотрудник НИЧ,
e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Четверик Максим Максимович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
аспирант,
e-mail: chetverikm@mail.ru

Information about the authors

Kolesnikov Igor Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Doctor of Engineering Sciences,
Corresponding Member of the RAS,
Leading Researcher of the Research Department,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Polityko Kirill Nikolaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Junior Researcher of the Research Department,

Federal Research Center of Southern Scientific
Center of the Russian Academy of Sciences
(SSC RAS),
Laboratory of Transport, Composite Materials
and Structures of SSC RAS,
Junior Researcher,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Azoyan Anaid Iosipovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Researcher of the Research Department,
e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Chetverik Maksim Maksimovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Postgraduate Student,
e-mail: chetverikm@mail.ru