

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев – PhD, доцент-зерттеуші, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Сведения об авторах

Айгүл Журсиновна Сагындыкова – PhD, доцент, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбек Дәукеева, кафедра Электр энергетика; e-mail: a.sagyndikova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-5694>.

Наталья Анатолиевна Заец – Исследователь, PhD, профессор, Берлинский университет прикладных наук, кафедра мехатроники и оптометрии; e-mail: natalia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-2081>.

Рита Адилевна Жамашева – Humboldt-Innovation GmbH, Гумбольдт университет, PhD, старший преподаватель, Алматинский технологический университет, кафедра пищевой технологии; e-mail: rita_2206@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4940-8336>.

Нуржан Нурлыбекович Нурғалиев – PhD, доцент-исследователь, Шакарим Университет, кафедра химии и экологии; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Information about the authors

Aigul Zhursinovna Sagyndykova – PhD, associate professor, University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Department of Electro Energy; e-mail: a.sagyndikova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-5694>.

Nataliya Anatolievna Zaets – Researcher, PhD, professor, Berlin University of Applied Sciences, Department of Mechatronic and Optometric; e-mail: natalia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-2081>.

Rita Adilovna Zhamasheva – Researcher, Humboldt-Innovation GmbH, Humboldt University, PhD, senior lecturer, Almaty Technological University, Department of Food Technology, e-mail: rita_2206@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4940-8336>.

Nurzhan Nurlybekovich Nurgaliyev – PhD, associate professor-researcher, Shakarim University, Department of Chemistry and Ecology, e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Редакцияға енуі 06.01.2026

Өңдеуден кейін түсуі 06.03.2026

Жариялауға қабылданды 18.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-56](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-56)



МРНТИ: 53.01.05

Л.С. Баймолданова^{1*}, Б.К. Рахадиллов², Али Чорух³, Е.М. Қабдыкенева¹, М.В. Ермоленко⁴

¹Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарима, 148

²ТОО «PlasmaScience»,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя, 7Б

³Университет Сакарья,
54050, Турция, г. Сакарья, кампус Эсентепе

⁴Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

*e-mail: baimoldals@gmail.com

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ, КОРРОЗИОННЫЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiSiCN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация: В работе исследованы термическая стабильность, трибологические и электрохимические свойства покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si. Показано влияние силы дугового тока (400-600 А) на результаты испытаний и характеристики сформированного слоя. Рентгенофазовый анализ и исследование поперечных шлифов методом

©Л.С. Баймолданова, Б.К. Рахадиллов, Али Чорух, Е.М. Қабдыкенева, М.В. Ермоленко, 2026

сканирующей электронной микроскопии подтверждают формирование покрытия системы Ti–Si–C–N и позволяют оценить его толщину и микроструктурные особенности. Термогравиметрический анализ, проведённый в атмосфере N₂, использован для сравнительной оценки термической стабильности покрытий при нагреве до 950°C. По данным трибологических испытаний установлена зависимость коэффициента трения от режима напыления и отмечена тенденция к его стабилизации при повышенных значениях тока. Электрохимические исследования в 3,5% растворе NaCl показали улучшение коррозионных характеристик покрытий по сравнению с подложкой. Полученные результаты характеризуют покрытия TiSiCN как перспективные защитные слои для применения в условиях трения, нагрева и воздействия коррозионных сред.

Ключевые слова: реактивное плазменное напыление, покрытия TiSiCN, термическая стабильность, трибологические свойства, коррозионная стойкость, нанокompозитные покрытия, коэффициент трения, защитные покрытия, износостойкость.

Введение

Современные энергетические, нефтехимические и машиностроительные установки функционируют в условиях повышенных температур, интенсивного износа и воздействия агрессивных сред, что приводит к ускоренному разрушению рабочих поверхностей деталей и снижению ресурса оборудования. Особенно уязвимыми являются элементы, работающие в условиях трения, высокотемпературного газового потока и контакта с коррозионно-активными средами, включая растворы, содержащие ионы хлора. В этой связи одной из наиболее эффективных стратегий повышения долговечности оборудования является нанесение защитных покрытий, способных одновременно обеспечивать износостойкость, термическую стабильность и коррозионную защиту [1].

В последние годы значительный интерес вызывают покрытия на основе системы Ti–Si–C–N, относящиеся к классу нанокompозитных материалов. Их эффективность связана с формированием структуры, в которой нанокристаллиты твёрдых фаз на основе Ti(C,N) распределены в аморфной кремнийсодержащей матрице. Такая структура обеспечивает высокую твёрдость, устойчивость к росту трещин и повышенную химическую стабильность, что делает подобные покрытия перспективными для эксплуатации в тяжёлых условиях [2,3]. Ранее было показано, что покрытия TiSiCN способны сохранять структурную целостность при повышенных температурах и демонстрировать устойчивость к трибокоррозионному износу благодаря формированию защитных поверхностных слоёв [4-6].

Особую роль при эксплуатации покрытий играет их поведение при трении. В ряде исследований установлено, что в процессе скольжения на поверхности покрытий TiSiCN формируются трибооксидные плёнки, содержащие оксиды титана и кремния, которые выполняют роль твёрдой смазки и уменьшают коэффициент трения [7-9]. Такие плёнки снижают интенсивность прямого контакта выступов сопряжённых поверхностей и уменьшают локальные напряжения в зоне трения, что приводит к стабилизации режима скольжения и снижению износа. Кроме того, наличие кремния способствует формированию более стабильных оксидных слоёв, повышающих стойкость покрытия к разрушению при длительном нагружении [10].

Другим важным фактором является устойчивость покрытий к высокотемпературному воздействию. При нагреве большинство металлических поверхностей подвергается интенсивному окислению, что приводит к образованию рыхлых оксидных слоёв и ускоренному разрушению материала. В то же время покрытия на основе TiSiCN способны формировать плотные оксидно-нитридные слои, которые замедляют диффузию кислорода вглубь материала и стабилизируют структуру покрытия при нагреве [11, 12]. Термогравиметрические исследования показывают, что такие покрытия характеризуются незначительным изменением массы даже при нагреве до высоких температур, что свидетельствует о формировании эффективных защитных барьерных слоёв [13].

Не менее важной является проблема коррозионной стойкости покрытий в средах, содержащих хлориды. Ионы хлора способны разрушать пассивные плёнки на поверхности металлов, что приводит к локальной коррозии и ускоренному разрушению конструктивных элементов. Ранее было показано, что нанесение покрытий TiSiCN приводит к смещению потенциала коррозии в положительную область и значительному снижению плотности коррозионного тока по сравнению с незащищёнными сталями, что связано с формированием плотной барьерной структуры покрытия и образованием устойчивых пассивных слоёв на

поверхности [14-17]. Таким образом, подобные покрытия способны существенно замедлять проникновение агрессивных сред к подложке и повышать срок службы деталей.

Большинство исследований, посвящённых покрытиям TiSiCN, сосредоточено на тонких плёнках, полученных методами вакуумного осаждения, такими как PVD и CVD [18, 19]. Однако для практического применения в энергетическом оборудовании требуются покрытия значительной толщины, способные эффективно противостоять механическим нагрузкам и эрозионному воздействию. В этом отношении метод реактивного плазменного напыления представляет значительный интерес, поскольку позволяет формировать толстые покрытия с хорошей адгезией и высокой производительностью процесса [20-23].

Известно, что параметры плазменного напыления оказывают существенное влияние на плотность, пористость и структурную целостность покрытий, что напрямую отражается на их эксплуатационных характеристиках. Повышение энергии плазменной струи способствует более полному расплавлению частиц и формированию более плотной ламеллярной структуры покрытия, уменьшающей проницаемость для агрессивных сред и повышающей устойчивость к износу [8-12]. Следовательно, оптимизация режимов напыления является ключевым фактором получения покрытий с улучшенными защитными свойствами.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование термических, трибологических и электрохимических свойств покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления, а также анализ влияния параметров процесса на формирование защитных механизмов при эксплуатации в условиях трения, нагрева и воздействия коррозионных сред.

Материал и методы исследования

Покрытия TiSiCN получали методом реактивного плазменного напыления механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si с использованием прямооточного плазмотрона мощностью до 40 кВт. В качестве исходного материала использовалась механически активированная порошковая смесь системы TiCN–SiC–Si. Средний размер частиц порошка составлял (20-50) мкм, что соответствует требованиям к порошкам для плазменного напыления. Частицы порошка имели преимущественно неправильную форму, характерную для механически активированных порошков, что способствует их эффективному нагреву и расплавлению в плазменной струе. В качестве подложек применялась нержавеющая сталь марки 12X18H10T размером 20×20×3 мм. Перед нанесением покрытия подложки подвергались механической обработке и ультразвуковой очистке в этаноле и ацетоне для удаления поверхностных загрязнений и повышения адгезии покрытия. Параметры напыления варьировались за счёт изменения силы дугового тока в диапазоне 400-600 А при фиксированном расстоянии напыления 110 мм. Реактивное плазменное напыление проводилось с использованием плазмообразующего газа аргона с добавлением азота, который выполнял функцию реактивного газа. Расходы газов подбирались таким образом, чтобы обеспечить стабильность плазменной струи и условия формирования карбонитридной фазы в покрытии.

Рентгенофазовый анализ покрытий проводили на дифрактометре (указать модель) с использованием CuK α -излучения ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) в диапазоне углов $2\theta = 20-90^\circ$ с шагом $0,02^\circ$. Идентификацию фаз осуществляли с использованием базы данных ICDD PDF-4.

Термическая стабильность покрытий исследовалась методом термогравиметрического анализа (ТГА) в атмосфере азота в диапазоне температур от комнатной до 950°C при скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ с использованием установки TGA-1250. Изменение массы образцов фиксировалось в процессе нагрева, что позволяло оценить устойчивость покрытий к высокотемпературному окислению [9, 13].

Трибологические испытания проводились на трибометре TNT-S-AX0000 (Anton Paar, Австрия) по схеме «шар-диск» в условиях сухого трения. В качестве контртела использовался шар из Al_2O_3 диаметром 6 мм. Испытания выполнялись при нормальной нагрузке 5 Н, скорости скольжения 0,1 м/с и продолжительности испытаний 90 мин. Коэффициент трения регистрировался в процессе испытаний в режиме реального времени.

Электрохимические свойства покрытий исследовались методом потенциодинамической поляризации в 3,5% растворе NaCl при комнатной температуре. Измерения проводились в стандартной трёхэлектродной ячейке с использованием насыщенного хлорсеребряного электрода сравнения и платинового вспомогательного электрода [1, 7, 14]. Поляризационные кривые регистрировались в диапазоне потенциалов от

–0,8 до +0,8 В относительно насыщенного хлорсеребряного электрода со скоростью развертки 0,5 мВ/с. По полученным кривым определялись потенциал коррозии (E_{corr}) и плотность коррозионного тока (I_{corr}), на основании которых рассчитывалась скорость коррозии.

Каждый эксперимент проводился не менее трёх раз для обеспечения воспроизводимости результатов, а представленные значения являются средними величинами измерений.

Результаты и обсуждения

Рентгенофазовый анализ покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления, представлен на рисунке 1.

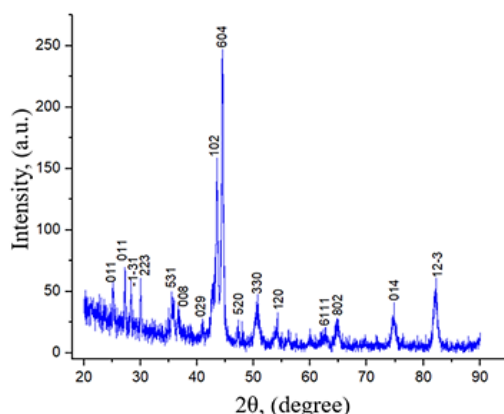


Рисунок 1 – Рентгенофазовая дифрактограмма покрытия TiSiCN, полученного методом реактивного плазменного напыления

На представленной дифрактограмме фиксируются интенсивные дифракционные максимумы, соответствующие твёрдому раствору на основе Ti(C,N), что свидетельствует о протекании реакций карбонитридообразования в процессе плазменного напыления. Наличие выраженных отражений с индексами (111), (200), (220) и (311) характерно для кубической структуры Ti(C,N), что согласуется с литературными данными для покрытий системы Ti–Si–C–N, полученных плазменными методами.

Помимо основных пиков Ti(C,N), на дифрактограмме наблюдаются слабые дополнительные отражения, которые могут быть отнесены к вторичным фазам, образующимся в результате взаимодействия компонентов порошковой смеси и остаточного кислорода в плазменной струе. К таким фазам могут относиться кремнийсодержащие соединения и оксидные компоненты титана, характерные для покрытий, полученных методом плазменного напыления при высоких температурах процесса.

Следует отметить, что относительная интенсивность отражений Ti(C,N) значительно превышает интенсивность вторичных фаз, что указывает на преобладание карбонитридной фазы в структуре покрытия. Это свидетельствует о формировании функционально ориентированной структуры, обеспечивающей высокую термическую стабильность и устойчивость покрытий при эксплуатации.

Полученные данные рентгенофазового анализа хорошо согласуются с результатами термогравиметрических, трибологических и электрохимических испытаний, представленных в настоящей работе. Доминирование фазы Ti(C,N) в сочетании с возможным присутствием кремнийсодержащих и оксидных компонентов может способствовать формированию защитных поверхностных слоёв при нагреве и трении, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках покрытий TiSiCN.

Микроструктурные особенности покрытий TiSiCN исследованы методом сканирующей электронной микроскопии на поперечных шлифах. СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия представлено на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, покрытие имеет сплошную слоистую структуру и характеризуется чётко выраженной границей раздела «покрытие–подложка», что свидетельствует о хорошем сцеплении покрытия с металлической основой. Разрушений и отслаиваний на границе раздела не наблюдается.

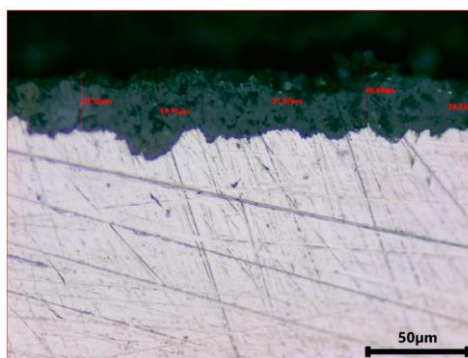


Рисунок 2 – СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия TiSiCN

Толщина покрытия, определённая по данным СЭМ-анализа, составляет порядка 40-50 мкм, что соответствует типичным значениям для покрытий, полученных методом реактивного плазменного напыления. Толщина слоя относительно равномерна по всей протяжённости покрытия, что указывает на стабильность процесса напыления при выбранных режимах.

В объёме покрытия наблюдается характерная для плазменно-напылённых материалов ламеллярная структура. Явных сквозных пор и макродефектов не выявлено, что косвенно указывает на формирование сплошного защитного слоя. Наличие отдельных мелких межламеллярных границ является типичным для покрытий, полученных плазменными методами, и не оказывает критического влияния на их эксплуатационные характеристики.

Термогравиметрический анализ покрытий TiSiCN проводился в атмосфере азота с целью оценки их термической стабильности при нагреве до 950 °С. Полученные термогравиметрические кривые приведены на рисунке 3.

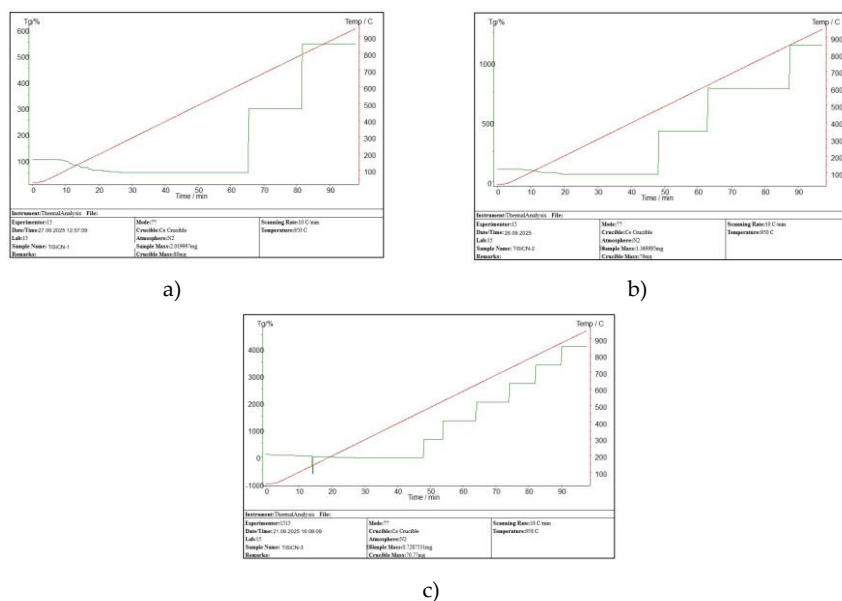


Рисунок 1 – Термогравиметрические кривые (ТГА) покрытий TiSiCN (TiSiCN-1, TiSiCN-2 и TiSiCN-3), зарегистрированные в атмосфере N₂ до 950 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин

В низкотемпературной области наблюдается незначительное изменение массы, связанное с удалением адсорбированной влаги и летучих компонентов с поверхности покрытия. В интервале средних и высоких температур изменение массы образцов носит слабовыраженный характер, что указывает на высокую термическую стабильность покрытий в инертной атмосфере. В области температур до ~150 °С наблюдается незначительное уменьшение массы образцов, что связано с удалением адсорбированной влаги и летучих примесей с поверхности покрытия. В интервале температур 400-700 °С фиксируется слабое увеличение массы, величина которого не превышает 1%.

Следует отметить, что проведение ТГА в атмосфере N₂ не позволяет напрямую анализировать процессы окисления. Наблюдаемые изменения массы могут быть

обусловлены структурными превращениями компонентов покрытия, а также присутствием следовых количеств примесей в защитном газе. Полученные данные используются исключительно для сравнительной оценки термической стабильности покрытий, сформированных при различных режимах напыления.

Кривые изменения коэффициента трения покрытий TiSiCN, полученных при различных значениях дугового тока, приведены на рисунке 4.

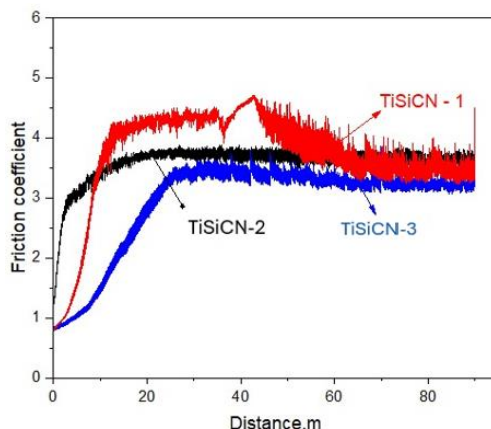


Рисунок 4 – Кривые коэффициента трения покрытий TiSiCN при идентичных условиях испытаний

Как видно из рисунка 4, в начальной стадии испытаний наблюдается период приработки, после которого коэффициент трения выходит на квазистационарный режим. При этом уровень коэффициента трения и стабильность его изменения существенно зависят от режима напыления.

Покрытия, полученные при меньших значениях дугового тока, характеризуются более выраженными колебаниями коэффициента трения, что связано с локальными разрушениями поверхностного слоя. В то же время при повышенных значениях тока формируется более стабильный режим трения и наблюдается снижение коэффициента трения.

Наиболее устойчивые и минимальные значения коэффициента трения характерны для покрытия TiSiCN-3, полученного при токе 600 А, и составляют 0,45-0,55. Такое поведение связано с формированием на поверхности в процессе трения защитных трибооксидных плёнок, содержащих оксиды титана и кремния, которые уменьшают контактные напряжения и стабилизируют режим скольжения [15].

Стабилизация коэффициента трения для покрытий, полученных при повышенных значениях дугового тока, может быть связана с изменением состояния поверхностного слоя в процессе трения. При таких условиях возможно формирование более сглаженного поверхностного слоя, что способствует снижению контактных напряжений и переходу к более устойчивому режиму скольжения.

Подобное поведение покрытий системы Ti–Si–C–N ранее отмечалось в литературе и связывается с трибохимическими процессами, протекающими на поверхности в условиях трения, особенно при повышенных температурах.

Результаты электрохимических испытаний покрытий TiSiCN приведены в таблице 1. Представленные экспериментальные данные являются средними значениями по результатам трёх независимых измерений. Разброс экспериментальных данных, обусловленный воспроизводимостью измерений, не превышал 10%, что соответствует погрешности используемых методов и условий эксперимента. По сравнению с необработанной нержавеющей сталью, покрытия TiSiCN демонстрируют явный положительный сдвиг потенциала коррозии (E_{corr}) и значительное снижение плотности тока коррозии (I_{corr}), что указывает на повышенную коррозионную стойкость. Наиболее стабильное электрохимическое поведение наблюдалось для покрытий, нанесённых при силе тока 500-600 А, которые показали наименьшие значения плотности тока коррозии (0,72-0,74 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) и минимальные скорости коррозии (~0,008 мм/год). Эти результаты подтверждают, что оптимизация параметров плазменного напыления улучшает плотность покрытий и их

пассивацию, обеспечивая формирование защитного оксидно-нитридного слоя, эффективно подавляющего анодное растворение в растворе 3,5 % NaCl.

Таблица 1 – Электрохимические параметры покрытий TiSiCN в 3,5 % растворе NaCl (средние значения трёх независимых испытаний)

Обозначение образца	Потенциал коррозии E_{corr} , мВ	Плотность тока коррозии I_{corr} , мкА/см ²	Скорость коррозии, мм/год
12X18H10T	-528	4.44	0.0506
TiSiCN-1	-478	0.86	0.0090
TiSiCN-2	-465	0.72	0.0080
TiSiCN-3	-470	0.74	0.0084

Электрохимические характеристики покрытий TiSiCN определялись методом потенциодинамической поляризации в 3,5% растворе NaCl. Поляризационные кривые исследуемых образцов приведены на рисунке 5.

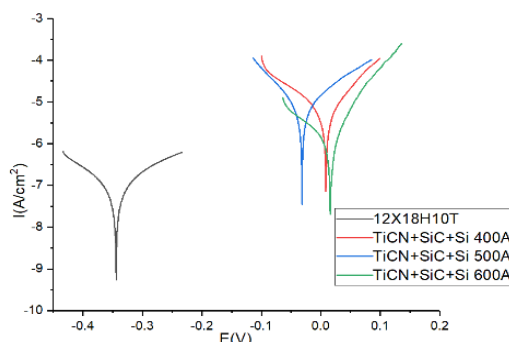


Рисунок 5 – Потенциодинамические кривые поляризации покрытий в 3,5% растворе NaCl: покрытия TiCN+SiC+Si, нанесённые при 400, 500 и 600 А

Как видно из рисунка 5, нанесение покрытий приводит к смещению потенциала коррозии в более положительную область по сравнению с незащищённой стальной подложкой, что свидетельствует о повышении коррозионной стойкости.

Количественные значения потенциала коррозии, плотности коррозионного тока и скорости коррозии приведены в таблице 1. Минимальные значения плотности коррозионного тока (0,72-0,74 мкА/см²) и скорости коррозии (~0,008 мм/год) наблюдаются для покрытий, полученных при повышенных значениях дугового тока.

Увеличение силы дугового тока в процессе реактивного плазменного напыления сопровождается изменением тепловых условий формирования покрытия, что может способствовать более интенсивному плавлению частиц и их взаимодействию в плазменной струе. Полученные экспериментальные данные позволяют говорить о тенденции к изменению структурных характеристик покрытий при повышении тока напыления.

Таким образом, результаты термогравиметрического анализа, трибологических испытаний и электрохимических исследований показывают, что покрытия TiSiCN, полученные методом реактивного плазменного напыления, обладают высокой устойчивостью к высокотемпературному воздействию, стабильным режимом трения и повышенной коррозионной стойкостью. Наиболее сбалансированные эксплуатационные характеристики достигаются при повышенных значениях дугового тока (500-600 А), что связано с формированием более однородной структуры покрытия.

Заключение

В работе исследованы термические, трибологические и электрохимические свойства покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si. Показано влияние силы дугового тока напыления на характеристики сформированных покрытий.

Рентгенофазовый анализ и исследование поперечных шлифов методом сканирующей электронной микроскопии позволили подтвердить формирование покрытий системы Ti–Si–C–N и оценить их толщину и микроструктурные особенности. Термогравиметрический анализ, проведённый в атмосфере N₂, использован для сравнительной оценки термической стабильности покрытий при нагреве до 950 °С.

По результатам трибологических испытаний установлена зависимость коэффициента трения от режима напыления и отмечена тенденция к его стабилизации при повышенных значениях дугового тока. Электрохимические исследования в 3,5 % растворе NaCl показали улучшение коррозионных характеристик покрытий по сравнению с подложкой.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности покрытий TiSiCN в качестве защитных слоёв для применения в условиях трения, нагрева и воздействия коррозионных сред. Детальный анализ механических свойств, износных характеристик и процессов взаимодействия с кислородом требует дополнительных исследований и будет предметом последующих работ.

Список литературы

1. TiSiCN as coatings resistant to corrosion and neutron activation / Mirzayev M.N. et al // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – Art. 1835. <https://doi.org/10.3390/ma16051835>.
2. Ternary and quaternary TiSiN and TiSiCN nanocomposite coatings obtained by CVD / I. Endler et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 215. – P. 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.085>.
3. Structure, mechanical properties and tribocorrosion behaviours of superhard TiSiCN nanocomposite coatings / H.Q. Wang et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 470.
4. Evaluation of the tribological behavior of TiSiCN nanocomposites / C.H. Ortiz et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.XXXXXX>.
5. Effect of N content on microstructure and tribological properties of TiSiCN composite coatings / B. Zhou et al // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2022. – Vol. 40, № 4. – Art. 043407. <https://doi.org/10.1116/6.0001904>.
6. Microstructure and tribological performance of nanocomposite Ti–Si–C–N coatings deposited using hexamethyldisilazane precursor / R. Wei et al // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2010. – Vol. 28, № 5. – P. 1126-1132.
7. Wu Z. Electrochemical and tribological properties of TiSiCN coatings in coolant / Z. Wu, S. Li, F. Zhou // *Materials Science (Medžiagotyra)*. – 2019. – Vol. 25, № 4. – P. 548-553. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.25.4.19252>.
8. Plasma-sprayed Ti–Si–C coatings and their crystallization behavior / J. Deng et al // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49, № 1. – P. 623-631. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.185>.
9. Microstructure evolution and reaction mechanism of Ti–C–N coatings fabricated by reactive plasma spraying / Y. Qin et al // *Vacuum*. – 2024. – Vol. 213. – Art. 112123. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112123>.
10. Wang Y. High-temperature solid particle erosion behavior of plasma-sprayed ceramic coatings / Y. Wang, M. Yan, Y. Yang // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2021. – Vol. 30. – P. 1227-1240. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01225-8>.
11. Influence of mechanical activation on the evolution of TiSiCN powders for reactive plasma spraying / L.S. Baimoldanova et al // *Crystals*. – 2024. – Vol. 14, № 11. – Art. 1005. <https://doi.org/10.3390/cryst14101005>.
12. Microstructure evolution and reaction mechanism of in-flight Ti–Si–C agglomerates during reactive plasma spraying / X. Sun et al // *Ceramics International*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.XXX>.
13. Structure and properties of nanocomposite coatings TiN/Si–N and Ti–Al–Si–N / A. Pogrebnjak et al // *Surface and Coatings Technology*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125121>.
14. Microstructure and properties of Ti–Si–C–N coatings / X. Chen et al // *Ceramics International*. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.033>.
15. Effect of arc current on TiN coatings prepared by arc ion plating / Y. Zhou et al // *Vacuum*. – 2020. – Art. 109369. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109369>.
16. Influence of H₂ addition on plasma-sprayed coatings / Y. Zhang et al // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.146>.
17. Effect of argon flow rate on structure and adhesion of hard coatings / S. Singh et al // *Vacuum*. – 2016. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.04.005>.
18. Reactive magnetron sputtering of TiSiN coatings / F.-D. Duminica et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.05.038>.

19. Environmental benefits of fluorogypsum reuse in the production of construction materials / B.K. Rakhadilov et al // Buildings. – 2024. – Vol. 14. – Art. 3618. <https://doi.org/10.3390/buildings14113618>.
20. Ceschini L. Frictional behaviour and wear resistance of TiN-based PVD coatings under dry sliding against a TiN-coated tool steel / L. Ceschini, G. Palombarini, G. Sambogna // Metallurgia Italiana. – 1999. – Vol. 91. – P. 45-51.
21. The effect of substrate treatment on the properties of TiAlSiYN/CrN nanocomposite coatings / A. Pogrebnjak et al // Surfaces and Interfaces. – 2022. – Vol. 30. – Art. 101902. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2022.101902>.
22. Multilayered vacuum-arc nanocomposite TiN/ZrN coatings before and after annealing: Structure, properties, first-principles calculations / A. Pogrebnjak et al // Materials Characterization. – 2017. – Vol. 134. – P. 55-63.
23. Effect of spraying distance on microstructure and properties of coatings / L. Wang et al // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Art. 126421. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126421>.

Л.С. Баймолданова^{1*}, Б.К. Рахадиллов², Али Чорух³, Е.М. Қабдыкенева¹, М.В. Ермоленко⁴

¹С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,

070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Шәкәрім даңғылы, 148

²«PlasmaScience» ЖШС, 070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Гоголь көш., 7Б

³Сақария университеті, 54050, Түркия, Сақария, Эсентепе кампусы

⁴Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көш., 20А

*e-mail: baimoldals@gmail.com

РЕАКТИВТІ ПЛАЗМАЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН TiSiCN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ, КОРРОЗИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕРМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Жұмыста TiCN-SiC-Si жүйесінің механикалық белсендірілген ұнтақ қоспаларын реактивті плазмалық тозаңдату әдісімен алынған TiSiCN жабындарының термиялық тұрақтылығы, трибологиялық және электрохимиялық қасиеттері зерттелді. Доғалық ток күшінің (400-600 А) қалыптасқан қабаттың сынақ нәтижелері мен сипаттамаларына әсері көрсетілген. Рентгендік-фазалық талдау және сканерлейтін электрондық микроскопия әдісімен көлденең тегістегіштерді зерттеу Ti-Si-C-N жүйесі жабынының қалыптасуын растайды және оның қалыңдығы мен микроструктуралық ерекшеліктерін бағалауға мүмкіндік береді. N₂ атмосферасында жүргізілген термогравиметриялық талдау 950 °C дейін қыздыру кезінде жабындардың термиялық тұрақтылығын салыстырмалы бағалау үшін пайдаланылады. Трибологиялық сынақтардың деректері бойынша үйкеліс коэффициентінің тозаңдандыру режиміне тәуелділігі белгіленген және токтың жоғары мәндері кезінде оны тұрақтандыру үрдісі белгіленген. NaCl 3,5% ерітіндісіндегі электрохимиялық зерттеулер төсеммен салыстырғанда жабындылардың коррозиялық сипаттамаларының жақсарғанын көрсетті. Алынған нәтижелер TiSiCN жабындарын үйкеліс, қызу және коррозиялық ортаның әсері жағдайларында қолдану үшін перспективалы қорғаныс қабаттары ретінде сипаттайды.

Түйін сөздер: реактивті плазмалық бүрку, TiSiCN жабындары, термиялық тұрақтылық, трибологиялық қасиеттер, коррозияға төзімділік, нанокөміршіткі жабындар, үйкеліс коэффициенті, қорғаныш жабындар, тозуға төзімділік.

L.S. Baimoldanova^{1*}, B.K. Rakhadilov², Ali Coruh³, E.M. Kabdykenova¹, M.V. Yermolenko⁴

¹S. Amanzholov East Kazakhstan University,

070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 148 Shakarim Avenue

²PlasmaScience LLP, 070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 7B Gogol Street,

³Sakarya University, 54050, Turkey, Sakarya, Esendepe Campus

⁴Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka Street

*e-mail: baimoldals@gmail.com

TRIBOLOGICAL, CORROSION, AND THERMAL PROPERTIES OF TiSiCN COATINGS PRODUCED BY REACTIVE PLASMA SPRAYING

Thermal stability, tribological and electrochemical properties of TiSiCN coatings obtained by reactive plasma sputtering of mechanically activated powder mixtures of TiCN-SiC-Si system are investigated. The effect of arc current strength (400-600 A) on the test results and characteristics of the formed layer is shown. X-ray phase analysis and cross-section analysis by scanning electron microscopy confirm the formation of the

coating of the Ti-Si-C-N system and make it possible to assess its thickness and microstructural features. Thermogravimetric analysis conducted in an N_2 atmosphere was used to compare the thermal stability of coatings when heated to 950 °C. According to the data of tribological tests, the dependence of the friction coefficient on the spraying mode was established and a tendency to its stabilization was noted at increased current values. Electrochemical studies in a 3.5% NaCl solution showed improved corrosion characteristics of the coatings compared to the substrate. The results obtained characterize TiSiCN coatings as promising protective layers for use in friction, heating and corrosive environments.

Key words: reactive plasma spraying, TiSiCN coatings, thermal stability, tribological properties, corrosion resistance, nanocomposite coatings, coefficient of friction, protective coatings, wear resistance.

Авторлар туралы мәліметтер

Лазат Сарқытбекқызы Баймолданова* – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, физика және технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, PhD, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-242X>.

Бауыржан Қорабаевич Рахадиллов – PhD, профессор, жетекші ғылыми қызметкер, «PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>.

Али Чорух – PhD, физика кафедрасының профессоры, Сакарья университеті, Сакарья, Түркия; e-mail: coruh@sakarya.edu.tr. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7362-6173>.

Еркежан Мұратқызы Қабдыкенова – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, физика және технологиялар кафедрасының сениор-лекторы, магистр, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: kabdykenovaerkezhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9095-6631>.

Михаил Вячеславович Ермоленко – Техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (доцент), Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Сведения об авторах

Лазат Сарқытбековна Баймолданова* – ассоциированный профессор кафедры физики и технологий, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, PhD, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-242X>;

Бауыржан Қорабаевич Рахадиллов – PhD, профессор, ведущий научный сотрудник, ТОО «PlasmaScience», Республика Казахстан; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>.

Али Чорух – профессор кафедры физики, Университет Сакарья, г. Сакарья, Турция; e-mail: coruh@sakarya.edu.tr. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7362-6173>.

Еркежан Мұратқызы Қабдыкенова – сениор-лектор кафедры физики и технологий, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, магистр, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: kabdykenovaerkezhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9095-6631>.

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Information about the authors

Lazat Sarkytbekkyzy Baimoldanova* – Associate Professor of the Department of Physics and Technology of the National Academy of Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, PhD, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-242X>.

Bauyrzhan Rakhadilov – PhD, Professor, Leading Researcher, PlasmaScience LLP, Republic of Kazakhstan; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>.

Ali Coruh – Prof.Dr, Department of Physics, Sakarya University, Sakarya, Turkey; e-mail: coruh@sakarya.edu.tr. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7362-6173>.

Erkezhan Muratkyzy Kabdykenova – Senior Lecturer, Department of Physics and Technologies, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Master's Degree holder, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: kabdykenovaerkezhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9095-6631>.

Mikhail Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering; Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Поступила в редакцию 05.02.2026

Поступила после доработки 27.02.2026

Принята к публикации 12.03.2026