ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.793.14

Влияние толщины ионно-плазменных покрытий на износостойкость при трении и каплеударной эрозии

Д.М. Калинин[1], К.Н. Политыко[2]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
В работе представлены результаты определения критической толщины вакуумных ионно-плазменных покрытий δ_{min}, обеспечивающей повышение их износостойкости в условиях трения скольжения. На основе анализа экспериментальных данных предложены аналитические выражения для расчета δ_{min}, а также построены диаграммы критических состояний для покрытий системы CrAlSiN, нанесенных на подложку из стали 40ХН. Физический смысл величины δ_{min} в работе раскрывается через изменение механизмов изнашивания покрытия. При толщине покрытия, превышающей δ_{min}, износ высокотвердого слоя протекает сравнительно медленно — по механизму истирания. При толщине менее δ_{min} процесс изнашивания существенно интенсифицируется вследствие прогиба, растрескивания и диспергирования покрытия. В данном случае реализуется абразивно-механический механизм изнашивания. Применение предложенной расчетно-аналитической методики целесообразно при получении вакуумных ионно-плазменных покрытий трибологического назначения, осаждаемых на контактные поверхности нагруженных узлов трения машиностроительного и энергетического оборудования с целью повышения их работоспособности.

Ключевые слова: технология ионно-плазменного синтеза, нитридные тонкие пленки, износостойкость покрытий, трибологические испытания, механизмы изнашивания, диаграммы критических состояний

Для цитирования. Калинин Д.М., Политыко К.Н. Влияние толщины ионно-плазменных покрытий на износостойкость при трении и каплеударной эрозии. *Молодой исследователь Дона.* 2026;11(4):79–85.

The Effect of Ion-Plasma Coating Thickness on Wear Resistance under Friction and Droplet Impact Erosion

Daniil M. Kalinin[1], Kirill N. Polityko[2]
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract
The article presents the results of the study on determining the critical thickness of vacuum ion-plasma coatings (δ_{min}) intended to ensure increased wear resistance under sliding friction. Based on the analysis of the experimental data, analytical expressions for calculation of δ_{min} were proposed, and critical state diagrams were drawn for CrAlSiN coatings applied to 40ХН steel substrate. The article investigates the physical significance of δ_{min} through changes in the coating wear mechanisms. In a coating with thicknesses exceeding δ_{min}, the wear process in the high-hardness layer is relatively slow, and is deployed via the abrasive wear mechanism. In coatings with thicknesses less than δ_{min}, the wear process intensifies significantly due to deflection, cracking, and dispersion of the coating. In this case, the abrasive-mechanical wear mechanism is taking place. The proposed analytical methodology of calculation is expedient for using in production of vacuum ion-plasma tribological coatings that are deposited on the contact surfaces of heavily loaded friction joints of mechanical engineering and power-generating equipment to improve the performance thereof.

Keywords: ion-plasma synthesis technology, nitride thin films, wear resistance of coatings, tribological testing, wear mechanisms, critical state diagrams

For Citation. Kalinin DM, Polityko KN. The Effect of Ion-Plasma Coating Thickness on Wear Resistance under Friction and Droplet Impact Erosion. *Young Researcher of Don.* 2026;11(4):79–85.

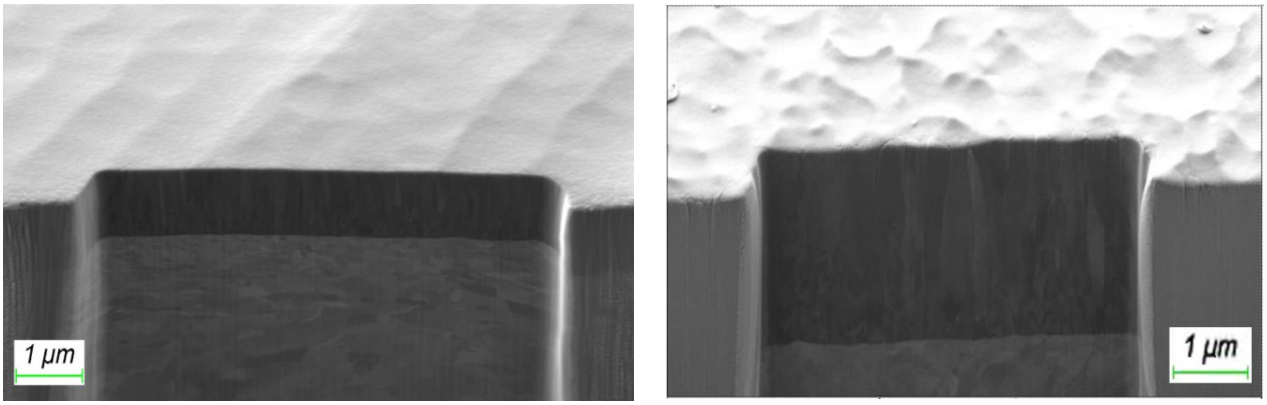
https://mid-journal.ru

© Калинин Д.М., Политыко К.Н., 2026

Введение. Технология вакуумного ионно-плазменного синтеза в последние два-три десятилетия получила широкое распространение [1]. Она обладает рядом преимуществ, позволяющих применять получаемые с ее использованием покрытия [2] в различных сферах производства [3]: для режущего инструмента в металлообработке [4], нагруженных контактных поверхностей в узлах трения транспортных средств [5,6], термобарьерной и эрозионной защиты энергетического оборудования [7], триботехнических устройств космической техники [8] и других объектов. Исследования ионно-плазменных покрытий существенно расширяют непрерывно формируемую базу научных знаний в области инженерии поверхности, в частности в сфере изучения тонкой структуры поверхностных слоев [9], фазовых превращений [10], а также формирования специальных свойств поверхности и покрытий [11]. К основным достоинствам технологии ионно-плазменного синтеза относятся уникальные характеристики получаемых покрытий [12]: формирование их структуры на основе интенсивных сил межатомного взаимодействия, высокая плотность и низкая дефектность, возможность нанесения слоев различной природы (металлических, интерметаллидных, углеродных, нитридных, боридных, композиционных), а также малая, микрометрическая, толщина. Вместе с тем именно с толщиной покрытия связана определенная неопределенность, поскольку ее критическое значение существенно зависит от области применения покрытия. Особую актуальность данная проблема приобретает в сферах, связанных с защитой от изнашивания, в частности при трении и каплеударной эрозии. Исследованию и решению задачи определения критического, то есть минимально допустимого, значения толщины ионно-плазменных покрытий посвящена настоящая работа.

Материалы и методы. В качестве экспериментального материала использовали плоские стальные образцы пластинчатой формы. При нанесении вакуумных ионно-плазменных покрытий значительное внимание уделяется подложке. Поскольку покрытие имеет пленочную толщину и высокую адгезию, оно с высокой точностью воспроизводит рельеф поверхности основания. В связи с этим к качеству поверхности подложки предъявляются жесткие требования — $Ra \leq 0{,}12$ мкм и $Rz \leq 0{,}6$ мкм, что соответствует полированной поверхности. Кроме того, функциональным назначением исследуемых покрытий является защита от износа в условиях трения и каплеударной эрозии, поэтому для изготовления подложки была выбрана сталь 40ХН в термообработанном состоянии (закалка + высокий отпуск) с сорбитной структурой. В таком структурном состоянии сталь 40ХН широко применяется в энергетическом машиностроении, в частности для изготовления различных трибосопряжений в узлах трения.

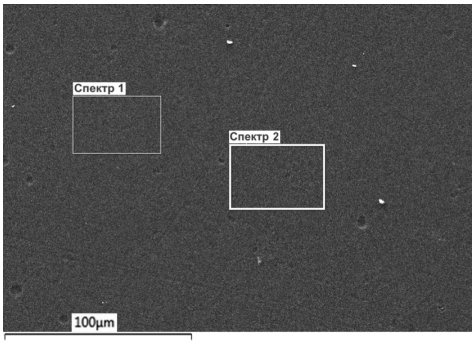
Покрытия наносили на технологической установке ионно-плазменного синтеза BRV600 методом катодно-дугового испарения. Для определенности и верификации полученных результатов в настоящей работе рассмотрена только группа нитридных покрытий. Экспериментальный массив данных, использованный для разработки и апробации расчетно-аналитической модели, включал покрытия TiN, TiAlN, CrAlSiN и других нитридных систем. Толщина покрытий находилась в достаточно широком диапазоне значений — от 0,5 до 7,5 мкм. На рис. 1 представлены типичные иллюстрации структуры нитридных покрытий, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), а на рис. 2 — один из примеров определения химического состава покрытия методом микрорентгеноспектрального энергодисперсионного анализа (EDAX).



а) *б)*

Рис. 1. Микроструктура покрытий CrAlSiN в поперечном сечении, SEM:
а — покрытие толщиной 1,0 мкм; *б* — покрытие толщиной 2,6 мкм

https://mid-journal.ru



а)

Название спектра	Спектр 1	Спектр 2
N	46.55	46.32
Al	17.13	16.62
Si	8.44	8.23
Cr	26.94	28.17
Fe	0.71	0.47
Ni	0.23	0.19
Сумма	100.00	100.00

б)

Рис. 2. Элементный состав покрытия CrAlSiN толщиной 1,0 мкм, EDAX:
а — электронное изображение поверхности покрытия с областями сканирования;
б — сводная таблица результатов сканирования, ат.%

На рис. 1 показано сечение покрытий, выполненное с помощью ионного источника в вакуумной камере электронного микроскопа методом «кросс-секций». В соответствии с диаграммой Мовчана–Демчишина–Торнтона [13] структура покрытий характеризуется как столбчато-волокнистая, с поперечным размером волокон в пределах 100–300 нм. Такое строение обычно обусловливает определенную анизотропию свойств покрытия в направлениях, нормальном и тангенциальном к поверхности подложки. На рис. 1 образцы наклонены в сторону наблюдателя на углы 28 град. (рис. 1 а) и 36 град. (рис. 1 б), что позволяет на одном изображении изучать строение покрытия как в поперечном сечении, так и по поверхности. Поверхность исследуемых покрытий характеризуется незначительным рельефом, отсутствием капельной фазы и других видов дефектов, что свидетельствует о высоком качестве их нанесения. Аналогичный вывод может быть сделан и по микроснимку на рис. 2а, полученному в нормальной проекции к поверхности покрытия.

Химический состав покрытия CrAlSiN, приведенный в таблице на рис. 2 б, типичен для ионно-плазменных покрытий данной системы, поскольку при катодно-дуговом испарении элементы катодов переходят в паровую фазу с различной интенсивностью. Наличие Fe и Ni объясняется «захватом» тонкого слоя подложки при использовании метода EDAX, что закономерно для покрытий малой, пленочной, толщины.

Механические характеристики, твердость H и модуль упругости E, измеряли методом непрерывного индентирования на платформе NanoTest600 в соответствии с ГОСТ 8.748–2011. Их значения составили:

– для подложки: усредненные значения H = 2,5 ГПа, E = 198 ГПа;

– для покрытий: H = 13,6–23,2 ГПа, E = 282,9–326,7 ГПа.

Таким образом, в рассматриваемой ниже модели анализируется система «твердое покрытие — пластичная подложка».

Результаты и обсуждение. Суть решаемой научно-практической задачи состояла в следующем. Испытания покрытий на трение скольжения обычно проводят на трибометрах по стандартизированным методикам DIN 50324-1992 и ASTM G99-2017 по схеме «шарик-диск». Шарик диаметром 6,25 мм, обычно изготовленный из электрокорунда Al2O3, выполняет роль контртела. Он жестко закреплен на неподвижном штифте, к которому прикладывается нормальная сила — нагрузка трения *F*. Роль «диска» выполняет образец с покрытием, вращающийся с постоянной скоростью, обычно 1,0 мм/с, так, что шарик формирует на поверхности покрытия круговую дорожку трения длиной $l \approx 20$ мм. В качестве трибологических характеристик определяют коэффициент трения μ и износ, который может оцениваться либо как общая длина дорожки трения до разрушения покрытия L, либо как объем дорожки трения при фиксированной длине пробега ($L = const$).

Проблема заключается в том, что при недостаточной толщине покрытия происходит его прогиб и, вследствие малой пластичности, преждевременное разрушение (рис. 3). В этом случае трибологические испытания, строго говоря, характеризуют не собственные трибологические свойства покрытия, а устойчивость системы «покрытие-подложка». Для определения истинной износостойкости покрытия необходимо предотвратить его прогиб, зависящий от соотношения нагрузки трения F, свойств покрытия (H, E) и его толщины δ. Задача исследования состоит в определении минимальной, или критической, толщины покрытия δ_{min}, которая в заданных условиях испытаний исключает прогиб. При этом методика решения данной задачи идентична как для трения [14], так и для каплеударной эрозии [15]. В последнем случае вместо давления [16], развиваемого нагрузкой F в центре дорожки трения, рассматривается максимальное давление, возникающее в центре области соударения капли с покрытием при ее кавитационном схлопывании [17].

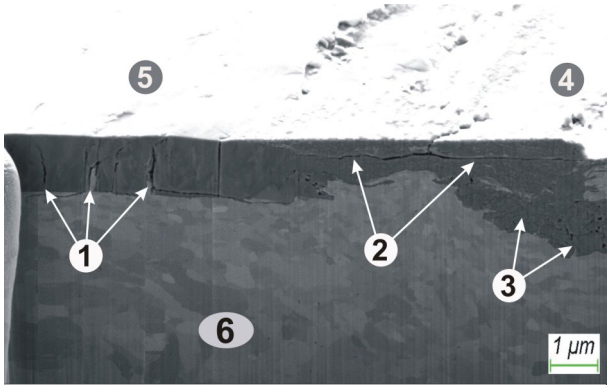


Рис. 3. Несколько стадий прогиба и разрушения покрытия CrAlSiN при испытаниях на трение скольжения, поперечное сечение покрытия в области дорожки трения: 1 — радиальные трещины, образующиеся в покрытии при его прогибе в периферийной зоне 5 дорожки трения; 2 — тангенциальные трещины в покрытии; 3 — диспергирование и пластическое перемешивание фрагментов разрушенного покрытия в зоне максимального давления в центральной зоне 4 дорожки трения; 6 — стальная подложка

При описанной выше методике трибологических испытаний электрокорундовый шарик [18], выполняющий функцию движущегося индентора, под действием нагрузки F внедряется в поверхность образца с покрытием и формирует дорожку трения, или трек. По сечению трека давление шарика распределяется неравномерно: в его центральной части оно достигает максимального значения Pmax, а по направлению к периферии уменьшается. Это иллюстрирует рис. 3, на котором представлен определенный этап усталостного разрушения покрытия, когда шарик уже совершил заданное количество оборотов, или циклов нагружения, по дорожке трения. Начальные стадии прогиба покрытия характеризуются появлением радиальных трещин [19], зарождающихся на границе раздела покрытия и подложки, поскольку при прогибе именно в этой области формируются максимальные растягивающие напряжения. На рис. 3 радиальные трещины 1 образованы в периферийной зоне покрытия 5, где давление шарика минимально, и ориентированы вершиной от подложки к поверхности покрытия. Такие ровные острые трещины характерны для хрупкого разрушения материалов с высокой твердостью. При увеличении числа циклов нагружения либо при возрастании давления P, как показано на рис. 3, вслед за радиальными трещинами формируются тангенциальные трещины 2. Под действием разнонаправленного растрескивания происходит разрушение и диспергирование покрытия. При этом фрагменты покрытия, представляющие собой продукты износа, остаются в контактной зоне трека и при очередном проходе шарика, то есть при последующем цикле нагружения, деформируются, измельчаются, внедряются в подложку и перемешиваются с ее пластичным металлом. Этот этап разрушения покрытия зафиксирован на рис. 3 в зоне 4, соответствующей максимальному давлению шарика, то есть в центре трека.

Таким образом, вследствие неравномерного распределения давления P в контактной зоне дорожки трения на рис. 3 зафиксированы все стадии механизма разрушения тонкого ионно-плазменного нитридного покрытия. В целом такой механизм износа покрытия классифицируется как абразивно-механический. Для обеспечения высокой износостойкости и длительной работоспособности покрытий необходимо, чтобы механизм их изнашивания соответствовал истиранию.

Экспериментальные данные трибологических испытаний [3] показывают, что для каждого типа покрытий существует некоторое критическое значение толщины δ_{min}, являющееся границей перехода от механизма абразивно-механического износа, характерного для тонких покрытий с толщиной $\delta < \delta_{min}$, к механизму истирания, при котором толщина покрытия соответствует условию $\delta > \delta_{min}$. В работе [20] была разработана методика расчета различных параметров трибологических испытаний, в которой на основе теории контактного разрушения в зависимости от нагрузки F рассчитываются значения как P_{max}, так и среднего давления q_a, равномерно распределенного по площади контакта шарика и покрытия. Авторы работы делают вывод о том, что использование параметра P_{max} более целесообразно в теоретических подходах с точки зрения обеспечения запаса прочности покрытия. Применение параметра q_a в большей степени согласуется с экспериментальными данными. Кроме того, в рамках указанной методики вычисляется предел выносливости покрытия σw, рассчитываемый в соответствии с полуэмпирической моделью Мураками — Эндо. Модель Мураками — Эндо определяет изменение σ_w материала или покрытия при появлении поверхностного макродефекта. К таким дефектам может быть отнесена дорожка трения. Поэтому в рамках методики интегрирован расчет изменения трех величин P_{max}, q_a, σ_w в зависимости от нагрузки F, что в совокупности определяет диаграмму критических состояний (ДКС) материала или покрытия для заданных условий проведения трибоиспытаний. Построенная таким образом ДКС позволяет определить критическое значение нагрузки трения $F_{кр}$, превышение которого в процессе испытания приводит к прогибу, разрушению и абразивно-механическому износу покрытия. Далее в рамках указанной методики определяется минимальная толщина покрытия δ_{min}, соответствующая значению $F_{кр}$.

Однако методика, представленная авторами работы [20], имеет ряд ограничений. Во-первых, значения $F_{кр}$ и δ_{min} вычисляются на основе различных теорий: усталостной модели Мураками — Эндо для определения $F_{кр}$ и известного правила Бюкле для оценки δ_{min}. Во-вторых, основной параметр δ_{min} в явном виде не представлен на ДКС. Это вызывает определенные затруднения в технологическом процессе нанесения покрытий, поскольку значение δ_{min} является прежде всего технологическим параметром вакуумного ионно-плазменного синтеза. В связи с этим в рамках настоящей работы методика построения ДКС, предложенная в работе [20], была дополнена: на получаемых диаграммах функции P_{max}, q_a и σ_w представлены в зависимости от δ_{min} при фиксированных значениях нагрузки трения F. На наш взгляд, для использования в технологическом процессе нанесения ионно-плазменных покрытий такой подход более целесообразен, чем предложенный в работе [20].

Получены следующие основные аналитические выражения для построения ДКС, в которых независимым параметром является величина δ_{min}:

$$P_{max} = 1{,}5 \cdot q_a = 1{,}5 \cdot \frac{F \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot k \cdot \delta_{min} \cdot R} \tag{1}$$

$$\sigma_w = 1{,}43 \cdot (H + 120) \cdot \left[0{,}5 \cdot (1 - R_0)\right]^{\alpha} \cdot V_{ar}^{-\frac{1}{6}} \tag{2}$$

$$V_{ar} = \sqrt{R^2 \cdot a\sin\left(\sqrt{\frac{k \cdot \delta_{min}}{R}}\right) - \sqrt{k \cdot \delta_{min} \cdot R \cdot \left(R^2 - k \cdot \delta_{min} \cdot R\right)}} \cdot 10^{-6} \tag{3}$$

где k — коэффициент правила Бюкле (обычно принимается k = 0,1); R — радиус шарика-индентора (в нашем случае для стандартного трибометра R = 3,175 мм); R_0 — коэффициент ассиметрии цикла нагружения (при круговой дорожке трения квазистационарный цикл нагружения является отнулевым $\sigma_{min} = 0$, тогда $R_0 = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0$); $\alpha = 0{,}226 + H \cdot 10^{-4}$ — показатель степени в уравнении Мураками — Эндо; V_{ar} — корень квадратный из площади поверхностного дефекта в теории Мураками — Эндо, мкм.

В качестве поверхностного дефекта V_{ar} в выражениях (2) и (3) рассматривается поперечное сечение (сегмент круга) дорожки трения, то есть отпечаток, оставленный на поверхности образца (покрытия) сферическим штифтом-индентором при трибологических испытаниях по схеме «штифт-пластина» на машине трения. Множитель 10^{-6} введен в выражения (1)–(3) в связи с тем, что в теории Мураками-Эндо значения V_{ar} вычисляются в мкм.

Пример построения ДКС для нитридного покрытия на основе выражений (1)–(3) приведен на рис. 4.

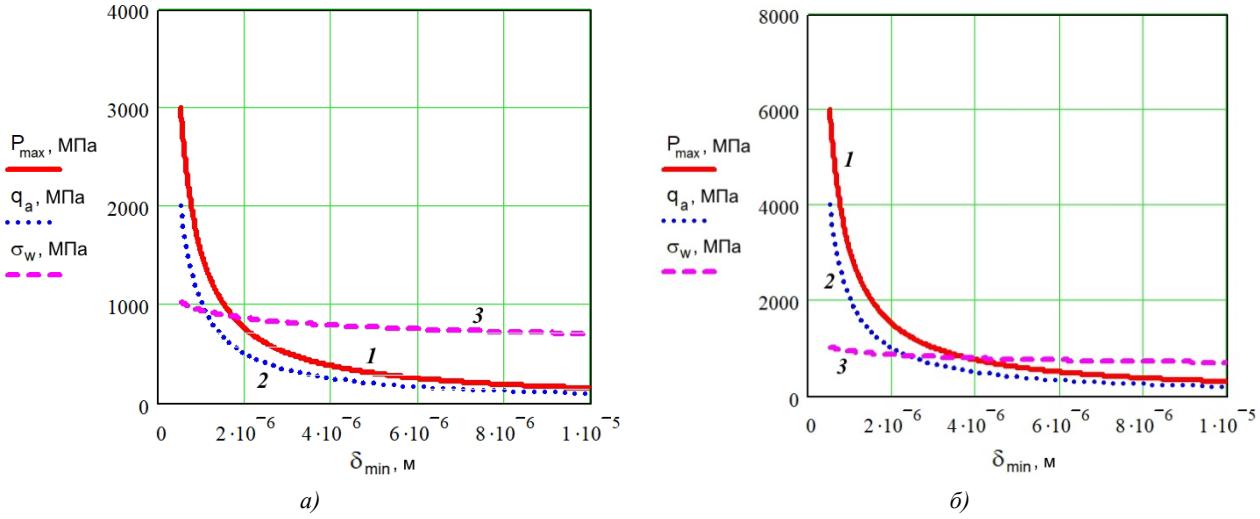


Рис. 4. Диаграммы критических состояний покрытия CrAlSiN в зависимости от параметра δ_{min} при фиксированных нагрузках трения F = 2 Н (*а*) и F = 5 Н (*б*): 1 — максимальное давление в центре дорожки трения (трека) P_{max}; 2 — равномерно распределенное давление в треке q_a; 3 — предел выносливости покрытия σ_w

Необходимо подчеркнуть, что на диаграммах рис. 4 показаны критические состояния покрытий, а не привычные зависимости между параметрами. Так, например, на рис. 4 предел выносливости покрытия σ_w уменьшается с ростом толщины покрытия δ_{min}, что противоречит здравому смыслу. Для критических состояний противоречия здесь нет, поскольку δ_{min} — это не привычная толщина покрытия δ, а δ_{min} представляет собой минимальную толщину покрытия, обеспечивающего его работоспособность. Ещё одной особенностью ДКС на рис. 4 является то, что значения σ_w и δ_{min} должны рассматриваться совместно. То есть для обеспечения требуемого значения σ_w, характеризующего работоспособность покрытия, необходимо такое значение δ_{min}, которое соответствует этому значению σ_w на кривой $\sigma_w = f(\delta_{min})$ из построенной ДКС. Другими словами, для обеспече-

https://mid-journal.ru

ния работоспособности покрытия его δ_{min} должно быть тем больше, чем меньше у покрытия предел выносливости σ_w. При этом измеряемая толщина покрытия δ может быть любой, соответствующе условию: $\delta > \delta_{min}$.

Из построенных ДКС следует, что при нагрузке $F = 2$ Н критическое значение толщины ионно-плазменного покрытия CrAlSiN находится в пределах δ_{min} = 1,1–1,6 мкм (рис. 4 а), а при $F = 5$ Н: δ_{min} = 2,4–3,7 мкм (рис. 4 б). Эти результаты имеют удовлетворительную корреляцию с экспериментальными данными.

Заключение. В последние годы всё более широкое распространение получают вакуумные ионно-плазменные покрытия трибологического назначения, осаждаемые на контактных поверхностях нагруженных узлов трения с целью увеличения их работоспособности — снижения коэффициента трения и износа. В работе рассмотрена прикладная задача, решение которой имеет важное значение для применения защитных износостойких покрытий микрометрической толщины, например, в таких областях как машиностроение или энергетика. Определение критической толщины δ_{min} таких покрытий, которое получено в работе в виде аналитических выражений и, построенных на их основе, диаграмм критических состояний, позволяет получать по технологии ионно-плазменного синтеза покрытия с толщиной δ, удовлетворяющей условию $\delta > \delta_{min}$. Выполнение этого условия обеспечивает более высокую износостойкость покрытий, поскольку износ в этом случае происходит по механизму истирания, тогда как при условии $\delta < \delta_{min}$, процесс изнашивания является абразивно-механическим и катастрофически быстро интенсифицируется за счет прогиба, растрескивания и диспергирования покрытия.

Список литературы

1. Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., Спектор В.С. *Вакуумная ионно-плазменная обработка*. Москва: Альфа-М: ИНФРА-М, 2023.160 с.

2. Погребняк А.Д., Комаров Ф.Ф., Береснев В.М., Константинов С.В., Салищев Г.А. *Многокомпонентные и высокоэнтропийные сплавы и нитридные покрытия на их основе*. Москва: ЛЕЛАНД, 2021. 336 с.

3. Lifar MS, Guda SA, Kudryakov OV, Guda AA, Pashkov DM, Rusalev YuV, et al. Relationships between Synthesis Conditions and Tin Coating Properties Discovered from the Data Driven Approach. *Thin Solid Films*. 2023;768:139725. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139725

4. Lou M, Xu K, Chen L, Hong C, Yuan Y, Du Y, et al. Development of Robust Surfaces for Harsh Service Environments from the Perspective of Phase Formation and Transformation. *Journal of Materials Informatics*. 2021;1:5. https://doi.org/10.20517/jmi.2021.02

5. Kudryakov OV, Varavka VN, Kolesnikov IV, Novikov ES, Zabiyaka IYu. DLC coatings for tribotechnical purposes: features of the structure and wear resistance. In: Proceedings of the Conference *"Dynamics of Technical Systems, DTS 2020"(DTS 2020), September11–13, 2020, Rostov-on-Don, Russia. Vol.1029*. IOP Science; 2021. P. 012061. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012061

6. Колесников В.И., Кудряков О.В., Варавка В.Н., Мантуров Д.С., Новиков Е.С. Влияние адгезионных свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий TiAlN на износостойкость при трении. *Трение и износ*. 2021;42(5):495–507. https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-5-495-507

7. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Мониторинг начальных стадий эрозионного износа ионно-плазменных покрытий при каплеударном воздействии. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012;10(94):40-47. URL: https://www.mashin.ru/files/2012/utp10_12.pdf (дата обращения: 03.05.2026)

8. Kolesnikov VI, Kudryakov OV, Belyak OA, Manturov DS, Kolesnikov IV, Polityko KN. High-Entropy Coating Resources for Use in Space Technology. *Acta Astronautica*. 2026;238(A):1447–1456. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.09.095

9. Kudryakov OV. Dislocation Quasi-Dipoles and Their Possible Role in Martensitic Transformations in Steel. *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 2002;94(5):3–10.

10. Кудряков О.В., Варавка В.Н. *Феноменология мартенситного превращения и структуры стали*. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ; 2004. 200 с.

11. Sapunov SYu, Kudryakov OV, Fartushnyj NI. Structure and Properties of Nickel-Zinc Coating on Steel. *Stal(in Translation)*. 2003;33(11):70–74.

12. Кудряков О.В., Пустовойт В.Н. Структурный критерий коррозионной стойкости «белых слоев». *Материаловедение*. 1998;(7):33–39.

13. Anders A. A Structure Zone Diagram Including Plasma Based Deposition and Ion Etching. *Thin Solid Films*. 2010;518(15):4087–4090. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.10.145

14. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Особенности разрушения металлических сплавов в условиях устойчивой каплеударной эрозии. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2012;3(167):45–50.

15. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях. *Материаловедение*. 2012;(5):36–43.

16. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях. *Материаловедение*. 2012;(6):14–19

17. Рыженков В.А., Качалин Г.В., Медников А.Ф., Медников Ал.Ф., Кудряков О.В., Варавка В.Н. Кинетика зарождения и развития процесса эрозионного разрушения поверхности сталей при каплеударном воздействии. *Надёжность и безопасность энергетики*. 2012;1(16):67–71.

18. Варавка В.Н., Кудряков О.В., Медников А.Ф., Ирха В.А. Закономерности и параметры каплеударной эрозии титановых сплавов. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2011;6(164):92–98.

19. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Прочность и механизмы разрушения высокопластичных материалов при воздействии дискретного водно-капельного потока *Вестник Донского государственного технического университета.* 2011;11(8-2):1376–1384.

20. Кудряков О.В., Колесников В.И., Ковалева И.Н., Колесников И.В., Мантуров Д.С. Расчетно-аналитическое прогнозирование износа покрытий при трибологических испытаниях на основе моделей контактно-усталостного разрушения. *Трение и износ*. 2024;45(3):262–274. https://doi.org/10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274

Об авторах:

Даниил Максимович Калинин, магистрант кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), 89185578274@yandex.ru

Кирилл Николаевич Политыко, аспирант кафедры «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), politykokirill@yandex.ru

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Daniil M. Kalinin, Master's Degree Student of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), 89185578274@yandex.ru

Kirill N. Polityko, Postgraduate Degree Student of the Theoretical Mechanics Department , Rostov State Transport University (2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), politykokirill@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.