

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.793.14

Прогнозирование износостойкости многокомпонентных вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе метода Харрингтона

А.В. Лысенков¹, К.Н. Политыко²

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

² Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты многопараметрического сравнительного анализа вакуумных ионно-плазменных покрытий трибологического назначения. В качестве объектов сравнения выступают нитридные покрытия TiAlN и CrAlSiN, а также углеродное покрытие класса DLC (алмазоподобное) и азотированный слой подложки, изготовленной из стали 38ХМЮА. Изделия из нитраллоя 38ХМЮА после ионного или газового азотирования широко распространены в машиностроении при изготовлении нагруженных узлов трения, поэтому азотированный слой был выбран в качестве эталона для оптимизации износостойкости покрытий. В анализе использованы экспериментальные данные четырех независимых характеристик покрытий. Процедура оптимизации выполнена по методу построения функции желательности Харрингтона. Анализ показал преимущества многокомпонентных нитридных покрытий, которые по комплексу механических и трибологических свойств значительно превосходят азотированный эталон и покрытие DLC. Результаты исследования рекомендованы для практического применения с целью повышения износостойкости контактных поверхностей нагруженных узлов трения.

Ключевые слова: ионно-плазменная технология, многокомпонентные покрытия, механические свойства, трибологические свойства, оптимизация, метод Харрингтона

Для цитирования. Лысенков А.В., Политыко К.Н. Прогнозирование износостойкости многокомпонентных вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе метода Харрингтона. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(3):76–82.

Forecasting Wear Resistance of Multicomponent Ion-Plasma Coatings According to the Harrington Method

Aleksei V. Lysenkov¹, Kirill N. Polityko²

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The paper presents the results of a multiparameter comparative analysis of vacuum ion-plasma coatings used in tribology. The objects of comparison were TiAlN and CrAlSiN nitride coatings, as well as DLC (diamond-like) carbon coating and a nitrided layer of a substrate made of 38CrMoAl steel. Products made of nitralloy 38CrMoAl that had undergone ion or gas nitriding are widely used in mechanical engineering for manufacture of the heavy-loaded friction units, therefore the nitrided layer was chosen as a reference for optimizing the wear resistance of coatings. The experimental data on four independent properties of coatings were used in the analysis. Optimization was performed according to the Harrington desirability function. The analysis showed the advantages of the multicomponent nitride coatings. The combination of their mechanical and tribological properties significantly surpasses that in the nitrided reference sample and the DLC coating. The research results are recommended for practical implementation to improve the wear resistance of the contact surfaces of the heavy-loaded friction units.

Keywords: ion-plasma technology, multicomponent coatings, mechanical properties, tribological properties, optimization, Harrington method

For Citation. Lysenkov AV, Polityko KN. Forecasting Wear Resistance of Multicomponent Ion-Plasma Coatings According to the Harrington Method. *Young Researcher of Don*. 2025;10(3):76–82.

Введение

Постановка задачи исследования. В процессе многолетней практики научных исследований кафедрой «Физическое и прикладное материаловедение» (ныне кафедра «Материаловедение и технологии металлов») ДГТУ был накоплен большой экспериментальный задел в области технологий нанесения покрытий [1, 2], исследования прочностных [3–5], коррозионных [6] и эрозионных [7–9] свойств конструкционных материалов и функциональных покрытий, их износостойкости [10] и механизмов деградации [11, 12] в условиях различных внешних воздействий, в том числе при трении [13, 14]. Тем самым созданы фундаментальные основы для прикладного использования разрабатываемых покрытий в заданных областях эксплуатации, в частности, на контактных поверхностях ответственных трибосопряжений. При производстве, обработке и эксплуатации ответственных изделий, в том числе и триботехнического назначения, от материала может требоваться не один десяток характеристик, которые, к тому же, могут относиться к совершенно различным областям знаний. Из-за этого задача анализа и оптимизации свойств материала и изделия часто становится нерешаемой. В отношении вакуумных ионно-плазменных покрытий микрометрической толщины проблема оптимизации дополнительно осложняется мультипараметричностью самой технологии напыления и ограниченным количеством экспериментально измеряемых свойств. В этом случае актуальной задачей становится применение методик оптимизации, использующих для оценки комплекс разнородных свойств анализируемого объекта и некоторую собственную безразмерную оценочную шкалу. К таким универсальным способам оценки относится методика построения функции желательности Харрингтона. Этот метод оптимизации не требует громоздких расчетов, сложных геометрических построений и способен обобщить наиболее важные характеристики материалов в единый количественный информационный признак, по которому возможно ранжирование материалов и покрытий.

Объекты и методы исследования

Методика многопараметрической оценки на основе функции желательности. Методика многопараметрической оценки на основе функции желательности. Требования к материалам могут относиться к различным отраслям знаний (материаловедение, химия, механика, технология изготовления, технология упрочняющей обработки и т.д.) и каждая характеристика материала имеет свой физический смысл и свою размерность. Для их объединения в единый критерий необходима некоторая безразмерная шкала. Одним из наиболее удобных способов построения такой шкалы является функция желательности Харрингтона [15]. Её назначение — установление соответствия между «физическими» (что включает не только собственно физические параметры, но также технологические, экономические, статистические и др.) и «психологическими» параметрами, то есть субъективными оценками экспериментатора желательности того или иного значения «физического» параметра. Методика построения функции желательности Харрингтона состоит в следующем.

Для перевода какого-либо «физического» параметра (Y) в безразмерную шкалу можно воспользоваться аналитическим выражением функции желательности k :

$$k = \exp[-\exp(-Y)], \quad (1)$$

где Y — безразмерное значение параметра, выражаемое через его натуральные значения y_i :

$$Y = \frac{y_i - y_{io}}{\Delta y_i}; \quad y_{io} = \frac{\max y_i - \min y_i}{2}; \quad \Delta y_i = \frac{\max y_i - \min y_i}{8}. \quad (2)$$

Шкала желательности по односторонним ограничениям ($Y \geq Y_{min}$ или $Y \leq Y_{max}$) представлена на рис. 1. По оси абсцисс указаны значения параметра Y (или Y_i , если, как в нашем случае, проводится многопараметрическая оптимизация) в условном масштабе, за начало отсчета которого выбрано значение, соответствующее желательности 0,37 — начало области «удовлетворительно». Ось ординат имеет экспоненциальную шкалу, на ней нанесены значения желательности, изменяющиеся от 0 (абсолютно неприемлемый уровень данного свойства) до 1 (самое лучшее значение).

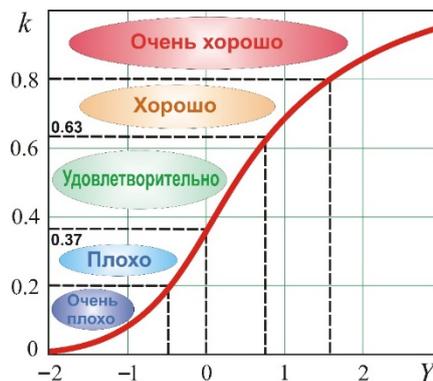


Рис. 1. Общий вид функции желательности Харрингтона k с ранжированием выходной характеристики материала Y

Найдя частные функции желательности (k_i) для каждого выходного параметра материала (в нашем случае, это свойства исследуемых материалов и покрытий), можем перейти к решению основной задачи — построению обобщённой функции желательности K , являющейся комплексной оценкой свойств материала. Наиболее часто эта оценка задаётся как среднее геометрическое частных желательностей k_i :

$$K = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m k_i} \quad (3)$$

где K — комплексный критерий желательности свойств материала или покрытия, который является количественным, однозначным и универсальным показателем качества материала; k_i — частные критерии желательности отдельных свойств, определяемые по результатам выполненных исследований, литературным источникам или ранжированным экспертным оценкам (в наших исследованиях — это экспериментальные данные измеряемых свойств материала или покрытия).

Если учесть лёгкую возможность введения или исключения из рассмотрения того или иного отдельного параметра (свойства материала) по ходу проведения исследований и накопления информации, то становится ясным, что обобщённый параметр K можно использовать в качестве критерия для оценки широкой гаммы разнообразных по свойствам материалов. Причем, количество параметров не ограничивается.

Таким образом, решение задачи оптимизации материалов с помощью функции желательности Харрингтона K заключается в ранжировании (то есть нахождении величины Y_i) каждой натуральной характеристики y_i (то есть физических, химических, механических, технологических, экономических, статистических и др. свойств) из общей их совокупности и создание эмпирико-статистической модели взаимовлияния разнородных факторов на конечные свойства материала (аналогично рис. 1).

Материалы, оборудование и методики исследования. В качестве объекта исследования, предназначенного для прогнозирования сравнительной износостойкости методом построения функции желательности Харрингтона, были выбраны нитридные покрытия TiAlN и CrAlSiN, а также углеродное покрытие класса DLC (алмазоподобное) и азотированный слой подложки, изготавливаемой из стали 38ХМЮА. Изделия из этой стали, прошедшие ионное или газовое азотирование, широко применяются в машиностроении для изготовления нагруженных узлов трения, что обуславливает выбор азотированного слоя в качестве эталона для оптимизации износостойкости покрытий.

Покрытия наносились с помощью технологии ионно-плазменного осаждения (PVD) на вакуумной установке BRV600 (производитель «БелРосВак», Республика Беларусь). Нитридные покрытия получали методом дугового катодного испарения при температуре подложки 400–450 °С, напряжении смещения —100 В и давлении в рабочей камере 0,03–0,30 Па. Покрытие DLC формировалось в специализированном модуле установки BRV600, где испарение углерода происходило по методу лазерной абляции графитового катода с последующим «холодным» осаждением на подложку при 200–250 С. Нитридный слой на поверхности стальной подложки был получен по технологии газового азотирования.

Состав и структура объектов исследования контролировались с использованием двулучевого сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «ZEISS CrossBeam 340», либо на поперечном микрошлифе, полученном по стандартной методике препарирования, либо на кросс-секции, выполненной в вакуумной камере микроскопа с использованием встроенного ионного источника. Состав покрытий определялся методом микрорентгеноспектрального анализа с применением встроенного в СЭМ энергодисперсионного детектора X-Max 50N (Oxford Instruments), как по поверхности покрытий, так и по поперечному сечению.

В анализе использованы экспериментальные данные четырех независимых характеристик покрытий: механических — твердости H (ГПа) и сопротивления пластической деформации H^3/E^2 (ГПа); трибологических — безразмерного коэффициента трения μ и объемного износа образцов J (мм³/(Н·м)).

Твердость H определялась параллельно с модулем упругости E на измерительной платформе «NanoTest 600» по методу непрерывного индентирования с использованием трехгранного индентора Берковича в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.748–2011. Значения величины H^3/E^2 определялись расчетным путем по экспериментальным данным полученных значений H и E .

Трибологические испытания проводились на машине трения TRB (Anton Paar Tritec) в соответствии с методиками DIN 50324–1992 и ASTM G99–2017. Использовалась испытательная схема «штифт-пластина» с возвратно-поступательным движением образца с покрытием («пластина») на частоте 10 Гц и амплитуде 800 мкм. Нормальное усилие на штифте составляло 5 Н. В штифте был закреплён шарик из металлокерамики WC–Co диаметром 6,35 мм, служивший контртелом. Поскольку шарик неподвижен в штифте, испытания относятся к типу трения скольжения.

Структура исследуемых покрытий представлена на рис. 2.

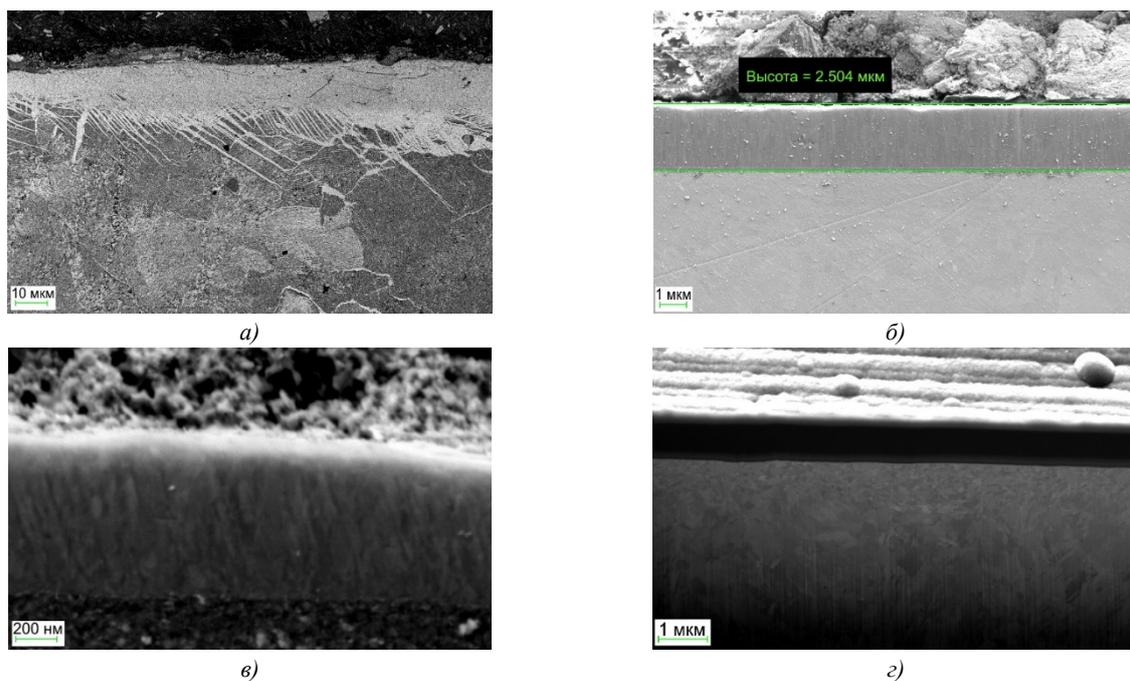


Рис. 2. Строение исследуемых покрытий в поперечном сечении, СЭМ:

a — азотированный нитридный слой стали 38ХМЮА, микрошлиф; *б* — однослойное покрытие TiAlN, микрошлиф; *в* — покрытие CrAlSiN, микрошлиф; *г* — покрытие DLC, кросс-секция СЭМ, наклон образца в сторону наблюдателя 15 град

В качестве эталона при определении механических и трибологических свойств, а также при сравнительном анализе по методу построения функции желательности использовались азотированные образцы стали 38ХМЮА, имеющие на поверхности сплошной нитридный слой (рис. 2*а*). При использовании в качестве подложки для последующего нанесения покрытий на образцах формировался азотированный слой с дисперсными равномерно распределенными нитридами. Из рис. 2 видно, что все объекты исследования существенно отличались по структуре. Так, структура покрытия TiAlN (рис. 2*б*) однородна, состоит из тонких столбчатых кристаллитов, ортогональных поверхности, и по архитектуре представляет собой монослой. Покрытие CrAlSiN, хотя и также представляет собой монослой, является гетерофазным (рис. 2*в*). Его структура состоит из наноразмерных вытянутых кристаллитов, ориентированных под определенным углом к поверхности. Наиболее однородным, как по структуре, так и по архитектуре, является покрытие DLC (рис. 2*г*), которое, предположительно, представляет собой аморфный или тетрагональный углерод с высокой долей алмазной электронной конфигурации sp^3 (исследование тонкой структуры покрытий DLC в данном случае не проводилось).

Результаты и их обсуждение. Методика построения функции желательности Харрингтона K была применена к каждому из покрытий, которые были нанесены на азотированную подложку из стали 38ХМЮА. Для анализа выбраны параметры из указанных четырех свойств ($H, H^3/E^2, \mu, J$), которые были отобраны для оптимизации как наиболее значимые с точки зрения износостойкости для использования покрытий, предназначенных для использования на контактных поверхностях нагруженных трибосопряжений.

Первоначально для успешного применения методики построения функции желательности необходимо определить значения величин, используемых в выражении (2). Эти значения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Интервалы значений измеряемых свойств и вспомогательные расчетные данные, используемые для определения параметра Y

Свойства	$\min y_i$	$\max y_i$	Δy_i	y_{io}
Твердость H , ГПа	6,42	32,8	3,323	13,29
H^3/E^2 , ГПа	0,0247	0,3620	0,0422	0,1686
Коэффициент трения μ *	$0,9^{-1} = 1,1111$	$0,25^{-1} = 4,0$	0,3611	1,4445
Износ образцов $J, 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ *	$16^{-1} = 0,0625$	$1,68^{-1} = 0,5952$	0,0666	0,26635

Примечание: * — в отличие от прогрессивных свойств H и H^3/E^2 , свойства μ и J являются регрессивными, поэтому в качестве минимального и максимального значений принимаются величины обратные худшему и лучшему показателям этих свойств

Расчетные значения параметров оптимизации, определяемых по выражениям (1) и (3), для каждого покрытия по всем четырем свойствам представлены в таблице 2. Основным из них является интегральная функция желательности Харригтона K , по вычисленным значениям которой проводится сравнительная оценка покрытий по комплексу всех 4-х свойств. Метод оптимизации с помощью функции желательности имеет одно слабое место. Из выражения (3) следует, что если какая-либо частная функция желательности одного из свойств обращается в ноль $k_i = 0$, то и интегральная функция $K = 0$. Из табл. 2 видно, что среди экспериментальных значений рассматриваемых свойств покрытий имеются случаи $k_i = 0$. Чтобы избежать обнуления функции K и не противоречить методике определения интегральной функции желательности, в этих случаях значения $k_i = 0$ в рассмотрение не принимались, то есть значения функции K определялись по тем свойствам, для которых $k_i \neq 0$.

Таблица 2

Экспериментальные и вычисляемые параметры оптимизации ионно-плазменных покрытий на подложке из азотированной стали 38ХМЮА

Свойства и их параметры		Азотир. слой	TiAlN	CrAlSiN	DLC	
Твердость H	y_1 , ГПа	12,0	24,7	22,8	15,3	
	Y_1	-0,388	3,223	2,862	0,605	
	k_1	0,229	0,961	0,944	0,579	
H^3/E^2	y_2 , ГПа	0,02975	0,1935	0,2863	0,0976	
	Y_2	-3,290	0,5901	2,7891	-1,6825	
	k_2	0	0,574	0,940	0,0046	
Коэффициент трения μ **	y_3	$0,528^{-1} = 1,894$	$0,634^{-1} = 1,577$	$0,602^{-1} = 1,661$	$0,320^{-1} = 3,125$	
	Y_3	1,245	0,367	0,599	4,654	
	k_3	0,75	0,5	0,577	0,991	
Износ образцов J **	y_4 , 10^{-7} мм ³ /Н/м	$4,5^{-1} = 0,222$	$16,0^{-1} = 0,0625$	$1,68^{-1} = 0,595$	$7,53^{-1} = 0,133$	
	Y_4	-0,666	-3,061	4,935	-2,002	
	k_4	0,143	0	0,993	0	
Интегральная функция желательности		K	0,291	0,651	0,844	0,138

Примечание: ** — свойства μ и J являются регрессивными, поэтому также, как в табл. 1, в расчетах использованы величины обратные их экспериментальным значениям

Для наглядности полученные результаты расчетных значений интегральной функции желательности K представлены в виде гистограммы на рис. 3. В таком виде их удобно сравнивать с данными, полученными по другим методикам многопараметрической оптимизации, например, по методу радиальных диаграмм [16]. Такое сравнение показывает, что закономерность распределения значений любого параметра оптимизации для всех нитридных систем, включая азотированный слой, практически одинакова. Эта закономерность устойчиво выстраивает исследованные нитридные системы в следующем порядке возрастания износостойкости: азотированный слой → покрытие TiAlN → покрытие CrAlSiN. В отношении углеродного DLC-покрытия результаты оптимизации с применением различных методик могут расходиться. Если в работе [16] на радиальных диаграммах покрытие DLC по комплексу свойств существенно превосходит азотированный слой и конкурирует с покрытием системы TiAlN, то функция желательности K у покрытия DLC значительно уступает всем нитридным покрытиям (Таблица 2, рис. 3). Это расхождение результатов может объясняться отсутствием толщины покрытий h среди частных функций желательности k_i . Сопоставление с данными источника [16] показывает, что этот параметр может вносить существенный вклад в результаты оптимизации.

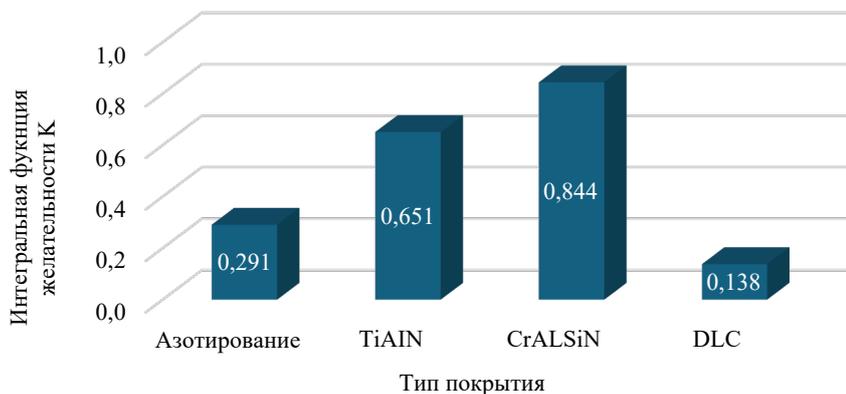


Рис. 3. Гистограмма распределения параметра оптимизации покрытий — интегральной функции желательности Харригтона из таблицы 2

Заключение. Таким образом, результаты, полученные при использовании метода оптимизации, основанного на построении функции желательности Харрингтона, для нитридных покрытий имеют стабильную корреляцию с результатами других проверенных методик, свидетельствуя о достоверности полученных данных. Различия, касающиеся покрытия DLC, обусловлены различным набором параметров оптимизации. В связи с этим выводы, сделанные в нескольких работах (например, в [13]), о функциональном использовании покрытия DLC как трибологического решения, используемого в дополнение к износостойкому покрытию системы CrAlSiN, остаются актуальными. На этой основе результаты наших исследований могут быть рекомендованы для практического применения с целью повышения износостойкости контактных поверхностей нагруженных узлов трения в виде комбинированных двухслойных покрытий, которые комбинируют наружный антифрикционный слой DLC и внутренний износостойкий нитридный слой системы CrAlSiN.

Список литературы

1. Sapunov SYu, Kudryakov OV, Fartushnyj NI. Structure and Properties of Nickel-Zinc Coating on Steel. *Steel in Translation*. 2003;33(11):70–74.
2. 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.
3. Kudryakov O.V. Dislocation Quasi-Dipoles and Their Possible Role in Martensitic Transformations in Steel. *Fizika metallov i metallovedenie (Physics of Metals and Metallurgy)*. 2002;94(5):3–10.
4. Кудряков О.В., Варавка В.Н. *Феноменология мартенситного превращения и структуры стали*. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ; 2004. 200 с.
5. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Прочность и механизмы разрушения высокопластичных материалов при воздействии дискретного водно-капельного потока. *Advanced Engineering Research*. 2011;11(8-2):1376–1384.
6. Кудряков О.В., Пустовойт В.Н. Структурный критерий коррозионной стойкости «белых слоев». *Материаловедение*. 1998;(7):33–39.
7. Варавка В.Н., Кудряков О.В., Медников А.Ф., Ирха В.А. Закономерности и параметры каплеударной эрозии титановых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011;6(164):92–98.
8. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Особенности разрушения металлических сплавов в условиях устойчивой каплеударной эрозии. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2012;3(167):45–50.
9. 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. *Надежность и безопасность энергетики*. 2012;1(16):67–71.
10. 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.
11. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях. *Материаловедение*. 2012;(5):36–43.
12. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях. *Материаловедение*. 2012;(6):14–19.
13. Kudryakov OV, Varavka VN, Zabiya IYu, Kolesnikov IV, Novikov ES. DLC Coatings for Tribotechnical Purposes: Features of the Structure and Wear Resistance. In: *Proceedings of the International Conference “Dynamics of Technical Systems, DTS 2020” (DTS 2020). 11–13 September 2020, Rostov-on-Don, Russia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1029*. IOP Publishing Ltd; 2021. 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012061>
14. 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.
15. Кудряков О.В. *Методика выбора и разработки материалов с заданными свойствами*. Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2018. С. 28–34.
16. Voropaev AI, Kudryakov OV, Varavka VN, Kolesnikov VI, Kolesnikov IV, Novikov ES. Multi-Parameter Assessment of Wear Resistance of Antifriction Ion-Plasma Coatings Deposited on a Cemented Steel Substrate. In: Parinov IA, Chang SH, Putri EP (Eds.). *Proceedings of the International Conference PHENMA 2023 “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”*. Springer Nature; 2024. P. 424-433. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52239-0_40

Об авторах:

Алексей Викторович Лысенков, магистрант кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), leha67341@gmail.com

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Aleksei V. Lysenkov, Master's Degree Student of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), leha67341@gmail.com

Kirill N. Polityko, Postgraduate Degree Student of the Theoretical Mechanics Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya 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.