

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.793.14

Многопараметрический сравнительный анализ износостойкости ионно-плазменных покрытий по методу лучевых диаграмм

П.Е. Антипов, А.Р. Блинский

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

Аннотация

В работе решается задача многопараметрической оптимизации вакуумных ионно-плазменных покрытий. В качестве объекта исследования рассмотрены три типа покрытий толщиной 0,5–3,5 мкм: покрытия двух нитридных систем TiAlN и CrAlSiN, а также углеродное алмазоподобное покрытие DLC (Diamond-Like Coating). Покрытия наносили на подложку из конструкционной стали 12X2H4A, подвергнутой цементации с последующей закалкой и низким отпуском. Износостойкие цементованные поверхностные слои стальных изделий широко распространены в машиностроении в качестве контактной поверхности в нагруженных узлах трения. Цель работы — проведение сравнительного анализа свойств поверхности образцов без покрытий и образцов, имеющих ионно-плазменные покрытия различного происхождения, для дальнейшей оптимизации покрытий. Для анализа применялась методика интегральной оценки каждого материала путем построения радиальных (лучевых) диаграмм. Результаты анализа показали устойчивую закономерность: по комплексу из восьми параметров все покрытия существенно превосходят эталонный цементованный слой. Наиболее высоким интегральным показателем свойств обладает покрытие CrAlSiN.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, износостойкость, трибологические свойства, многопараметрическая оптимизация

Для цитирования. Антипов П.Е., Блинский А.Р. Многопараметрический сравнительный анализ износостойкости ионно-плазменных покрытий по методу лучевых диаграмм. *Молодой исследователь Дона*. 2024;9(4):30–37.

Multiparameter Comparative Analysis of Wear Resistance of Ion-Plasma Coatings Using the Ray Diagram Method

Pavel E. Antipov, Andrei R. Blinskii

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

Abstract

The work solves the problem of multi-parameter optimization of vacuum ion-plasma coatings. Three types of coatings with a thickness of 0.5–3.5 μm were considered as the object of study: coatings of two nitride systems TiAlN and CrAlSiN, as well as a diamond-like carbon coating (DLC). The coatings were applied to a substrate made of structural steel 12X2H4A, subjected to carburization, followed by hardening and low tempering. Wear-resistant cemented surface layers of steel products are widely used in mechanical engineering as a contact surface in loaded friction units. The aim of this study is to conduct a comparative analysis of the surface properties of uncoated samples and samples with ion-plasma coatings of different origins in order to further optimize coatings. For the analysis, a multiparameter optimization technique was used in the form of an integral assessment of each material by constructing radial diagrams. The results of the analysis showed a consistent pattern: in terms of a set of eight parameters, all coatings were significantly superior to the reference cemented layer. Among these, the CrAlSiN coating had the highest integral property indicator.

Keywords: ion plasma coatings, wear resistance, tribological properties, multiparameter optimization

For citation. Antipov PE, Blinskiii AR. Multiparameter Comparative Analysis of Wear Resistance of Ion-Plasma Coatings Using the Ray Diagram Method. *Young Researcher of Don*. 2024;9(4):30–37.

Введение. В ходе предшествующих исследований, выполненных с участием научного коллектива кафедры материаловедения и НОЦ «Материалы» ДГТУ, была сформирована база данных вакуумных ионно-плазменных покрытий, включающая разнообразные характеристики элементного и фазового состава покрытий [1], их структуры [2, 3], качества и рельефа поверхности [4], физико-механических [5, 6], трибологических [7, 8] и других свойств. Одной из задач анализа созданной базы данных в настоящее время является определение оптимальных покрытий для той или иной сферы прикладного использования. Цель работы — проведение многопараметрического сравнительного анализа свойств цементованной поверхности образцов (без покрытия) и образцов, имеющих ионно-плазменные покрытия различного состава, для дальнейшей оптимизации покрытий.

Большинство существующих методик выбора материалов для конкретных изделий или условий эксплуатации целесообразны к применению, когда выбор детерминирован одним-двумя основными свойствами материала, которые и определяют надежность и долговечность эксплуатации изделия. Если же таких ведущих свойств несколько или они вообще неизвестны, то детерминированные методики, скорее всего, не дадут ожидаемого однозначного результата. Подобная неопределенная ситуация часто складывается в научной работе, когда создается новый материал и сфера его применения ещё до конца не ясна [9, 10], или когда необходимо охарактеризовать известный материал для новой сферы использования, не прибегая к дорогостоящим стендовым или натурным испытаниям [11, 12]. В последнем случае экспериментальным путем устанавливается качественная или количественная корреляция между данными испытаний и данными лабораторных измерений нескольких (то есть комплекса) известных свойств материала, чтобы в дальнейшем характеризовать и сравнивать материалы по этому комплексу свойств, измеряемых в лаборатории.

С целью решения научно-прикладных задач для интегральной оценки свойств материалов разработан метод построения радиальных (лучевых) диаграмм, примеры практической реализации которого можно найти в работах [13, 14]. Начальный этап выполнения данной методики сводится к определению группы (комплекса) свойств материала, на основе которых в дальнейшем строится диаграмма. Подбор свойств материала может осуществляться из любых источников или баз данных, но при этом свойства должны удовлетворять ряду требований:

- 1) они должны быть актуальны для решения поставленной задачи, то есть иметь непосредственное отношение к той области эксплуатации изделия, для которого выбирается материал;
- 2) все свойства материала должны соответствовать одному и тому же структурному состоянию (или состоянию обработки) материала;
- 3) комплекс должен включать не менее 6–8 свойств (максимальное количество свойств не ограничивается);
- 4) для более объективной итоговой оценки рекомендуется по возможности подбирать для комплекса различные свойства, включая в него механические, физические, технологические, экономические (стоимость) и другие свойства.

Сформированная авторами база данных ионно-плазменных покрытий позволяет удовлетворить всем перечисленным требованиям для использования методики построения лучевых диаграмм с целью оптимального выбора покрытий трибологического назначения. В связи с этим, основной задачей настоящей работы является построение и анализ радиальных 8-ми лучевых ($j = 1...8$) диаграмм для четырех объектов оптимизации ($I = 1...4$) — трёх различных ионно-плазменных покрытий и поверхностного цементованного слоя стальной подложки, используемого в качестве сравнительного эталона.

Основная часть. Материалы, оборудование и методики исследования. Исследуемые нитридные покрытия систем TiAlN и CrAlSiN получали методом катодного дугового испарения с использованием установки PLATIT π^{80} . Углеродное покрытие класса DLC получено методом лазерного испарения графита на установке BRV600. В качестве подложки использованы плиточные образцы с размерами 50×30×5 мм, изготовленные из цементованной стали 12X2H4A (глубина цементации 0,9...1,5 мм; твердость цементованной поверхности HRC≥59). Выполненные ранее исследования показали слабую зависимость физико-механических и трибологических свойств покрытий системы TiAlN от их структуры. Так, из четырех исследованных физико-механических характеристик (далее — H , E , H/E и H^3/E^2) структурную зависимость продемонстрировало только соотношение H^3/E^2 [2]. С учетом этих данных целесообразно такие структурные характеристики покрытий, как слоистость или толщина слоев, в параметры оптимизации не включать. Поэтому для соблюдения единообразия при оптимизации рассмотрены только покрытия с монослойной структурой.

Для исследования физико-механических свойств покрытий в нано- и микромасштабе применялась измерительная платформа Nanotest 600. По методу непрерывного индентирования [15] определяли модуль упругости E и твердость покрытий H . При измерениях в микродиапазоне (нагрузка менее 2 Н, глубина отпечатка более 0,2 мкм) применялся четырехгранный индентор Виккерса; для работы в нанодиапазоне (глубина отпечатка не более 0,2 мкм) — трехгранный индентор Берковича. Условия испытаний и обработка полученных данных осуществлялись в соответствии с ГОСТ 8.748-2011. При использовании физико-механических свойств покрытий в аналитической картине выполняемой оптимизации, в соответствии с рекомендациями работ [16, 17], учитывалось влияние специфической дефектной структуры покрытий, формирующейся в условиях неравновесного процесса ионно-плазменного осаждения [18, 19]. Помимо структурно зависимой твердости H и структурно независимого модуля упругости E , определяемых методом индентирования, для характеристики покрытий часто используются соотношения H/E и H^3/E^2 . Первое из них определяет сопротивление покрытий упругой деформации, а второе — сопротивление покрытий пластической деформации [20]. В частности, экспериментальные данные по определению указанных механических характеристик материала подложки (цементованного слоя стали 12Х2Н4А) составили: $H = 6,42$ ГПа; $E = 200$ ГПа; $H/E = 0,0321$ ГПа; $H^3/E^2 = 0,0066$ ГПа.

Трибологические испытания покрытий проводились на машине трения TRB (Anton Paar Trites) в соответствии с методиками DIN 50324 и ASTM G99. Использовалась испытательная схема «штифт-пластина» при возвратно-поступательном движении пластины (образец с покрытием) с частотой 10 Гц и амплитудой 800 мкм. Нормальное усилие на штифте составляло 10 Н. Контробразец представлял собой закрепленный в штифте шарик диаметром 6,35 мм из кермета (твердого сплава) WC-Co. В силу того, что шарик неподвижен в штифте, испытания относятся к типу трения скольжения. Продолжительность испытания составляла 50 000 циклов. Основные определяемые трибологические параметры — коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J (мм³/Н/м) и контртела J_K (мм³/Н/м).

В качестве параметров оптимизации при построении радиальных 8-ми лучевых диаграмм выбраны 8 характеристик: четыре физико-механических (H , E , H/E , H^3/E^2), три описанных выше трибологических свойства (коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J и контртела J_K), а также толщина покрытия h . Значения h измерялись на поперечных сечениях образцов с покрытиями с использованием сканирующего электронного микроскопа ZEISS Crosbeam 340, параллельно с идентификацией локального химического состава, определяемого с помощью энергодисперсионного детектора X-Max EDAX (Oxford Instruments), интегрированного в микроскоп. Величина h у покрытий более, чем на порядок меньше глубины цементованного слоя подложки, так как вакуумное ионно-плазменное покрытие не может иметь большую толщину в силу технологии нанесения, а также потому что не должно нарушать геометрию трибосопряжения.

Методика мультипараметрической оценки. После того как объекты оптимизации ($I = 1 \dots 4$) и их оптимизационные параметры, то есть свойства ($j = 1 \dots 8$), определены, по известным правилам строится лучевая (радиальная) диаграмма. Количество лучей диаграммы соответствует количеству свойств, причем все углы между лучами должны быть равными. По каждой оси диаграммы откладывается одно из свойств каждого материала в единицах измерения этого свойства. Например, если выбрано четыре материала, то на оси каждого свойства должно быть четыре точки. Когда на каждой оси будет нанесено по четыре точки, все точки, отвечающие одному материалу, последовательно соединяются между собой. Таким образом, на построенной диаграмме должно быть четыре многоугольника, соответствующих каждому из выбранных материалов. Построенная таким образом лучевая диаграмма называется диаграммой в абсолютных единицах свойств.

Суть интегральной оценки свойств материалов по лучевым диаграммам заключается в вычислении и сравнении площадей полученных на диаграмме фигур. Однако по диаграмме в абсолютных единицах свойств провести такую оценку невозможно, поскольку масштаб каждой оси (то есть каждой стороны многоугольника) различен. Поэтому необходимо привести полученную диаграмму к единому (относительному) масштабу. Для этого необходимо выполнить две операции:

- 1) перейти к масштабу относительных единиц измерения на каждой оси диаграммы;
- 2) проранжировать все свойства (оси) в зависимости от их значимости для условий эксплуатации заданного изделия.

Перевод диаграммы из абсолютных единиц в относительные производится для прогрессивных и регрессивных свойств по-разному. Для первых из них: чем выше значение свойства, тем лучше конечный результат; для вторых — наоборот: общий результат лучше, если свойство имеет минимальное значение. Для прогрессивного свойства абсолютные значения всех точек на соответствующей оси X_i делятся на их максимальное значение X_{max} : X_i / X_{max} . Тогда относительный максимум на этой оси диаграммы будет иметь значение 1,0, а остальные точки будут иметь значения меньше единицы. Для регрессивного свойства перевод абсолютных значений в относительные осуществляется как: X_{min} / X_i , где X_{min} — минимальное абсолютное значение из всех точек X_i на соответствующей оси. Тогда максимальным относительным значением на этой оси также будет 1,0, но оно будет соответствовать абсолютному значению X_{min} .

После выполнения первой из указанных выше операций, примененной ко всем точкам диаграммы (на каждой оси отдельно), получим единый безразмерный (относительный) масштаб измерения по всем осям диаграммы. Такая диаграмма носит название диаграммы в относительных единицах свойств. Для того чтобы завершить её построение, провести по ней вычисления и выбрать оптимальный материал, необходимо выполнить вторую операцию — ранжирование свойств. Она проводится путем введения весовых коэффициентов (коэффициентов значимости) для каждого свойства q_j , где j — количество осей (свойств) на диаграмме. Все относительные значения, расположенные на оси данного свойства, должны быть умножены на соответствующий весовой коэффициент q_j этого свойства.

Процесс назначения коэффициентов значимости всегда имеет некоторую долю субъективизма. Часто их значения выбираются априорно, исходя из целесообразности и практического опыта — путем обоснования их значений с точки зрения функциональности материала. Математические методы не решают проблему субъективного фактора, исключить влияние которого в процедуре прикладного выбора материалов, по-видимому, не представляется возможным. Однако в процессе оптимизации экспериментальных результатов научных исследований, при неопределенности влияния того или иного свойства на конечный результат комплексной оценки и в отсутствие количественных зависимостей, весовые коэффициенты могут быть приняты равными или близкими 1,0.

В соответствии с методикой выбора материалов с помощью радиальных (лучевых) диаграмм, площадь многоугольника на построенной диаграмме в относительных единицах свойств может быть использована в качестве интегральной статистической оценки для сравнения комплекса свойств каждого материала: чем больше площадь многоугольника у рассматриваемого материала (покрытия), тем выше комплекс его свойств.

Площадь многоугольника S рассчитывается как сумма площадей составляющих его n треугольников, по следующему выражению:

$$S = \frac{1}{2} \left[a_1 \times a_n + \sum_{i=1}^{n-1} (a_i \times a_{i+1}) \right] \sin \frac{2\pi}{n}, \quad (1)$$

где n — число лучей (свойств) диаграммы; a_i — относительное значение свойства на диаграмме; a_i и a_{i+1} — стороны треугольника, лежащие на смежных лучах диаграммы.

Результаты и их обсуждение. На основе анализа имеющейся базы экспериментальных данных вакуумных ионно-плазменных покрытий систем TiAlN, CrAlSiN и DLC, нанесенных на подложку из цементованной стали 12X2H4A, были определены среднестатистические исходные значения свойств для построения радиальных диаграмм (таблица 1). Следует заметить, что толщина цементованного слоя в таблице 1 принята равной 30 мкм. В реальности при газовой цементации она может достигать нескольких миллиметров. Использование реальных значений толщины слоёв химико-термической обработки (ХТО) практически приводит этот параметр оптимизации к нулевому значению (на диаграммах в относительных единицах) и делает его использование бессмысленным. Поэтому в качестве параметра оптимизации h для слоёв ХТО целесообразно использовать такие значения, которые соизмеримы со значениями h исследуемых покрытий и, с другой стороны, искусственность которых не влияет на конечный результат оптимизации.

Таблица 1

Обобщенные экспериментальные данные свойств исследуемых покрытий на цементованной стали 12X2H4A

Тип покрытия	H , ГПа	E , ГПа	H/E , ГПа	H^3/E^2 , ГПа	μ	$J \times 10^{-7}$, мм ³ /Н/м	$J_K \times 10^{-7}$, мм ³ /Н/м	h , мкм
Цементованный слой	6,42	200,0	0,0321	0,0066	0,900	12,30	4,46	30,0
TiAlN	25,50	316,1	0,0810	0,1660	0,756	12,91	4,79	3,6
CrAlSiN	24,10	251,3	0,0959	0,2885	0,820	0,79	1,66	1,0
DLC	12,40	170,6	0,0727	0,0655	0,500	10,46	2,75	0,4

Радиальная (лучевая) диаграмма в абсолютных значениях свойств, построенная по данным таблицы 1, приведена на рис. 1.

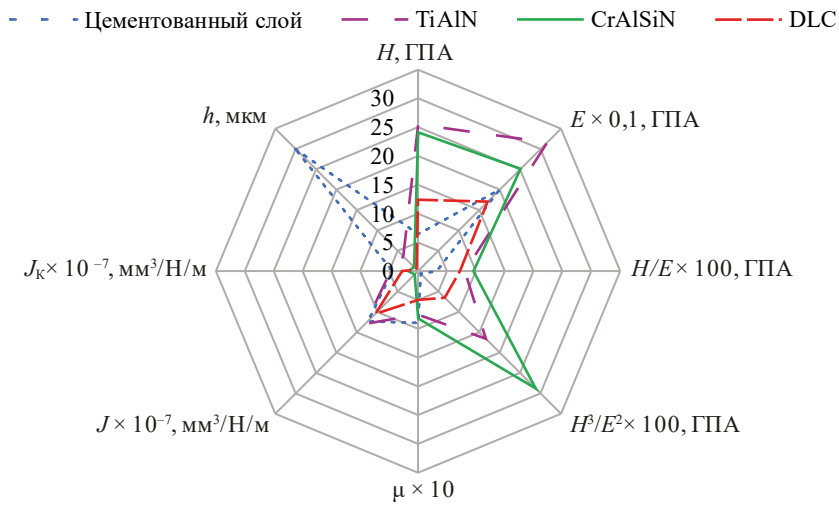


Рис. 1. Радиальная диаграмма в абсолютных единицах измерения свойств покрытий, нанесенных на цементованную сталь 12Х2Н4А; контурное исполнение многоугольников

По рассмотренным выше причинам «абсолютная» диаграмма на рис. 1 не является аналитической и информативной, а приведена из иллюстративных соображений. Поэтому, не останавливаясь на её анализе, перейдём к диаграмме в относительных единицах измерения свойств покрытий, нанесенных на подложку из стали 12Х2Н4А, которая построена в соответствии с методикой по данным таблицы 2 и приведена на рис. 2.

Таблица 2

Относительные значения свойств исследуемых покрытий на стали 12Х2Н4А, использованные для процедуры оптимизации

Тип покрытия	H	E	H/E	H^3/E^2	μ	J	J_k	h	Площадь S на диаграмме
Цементованный слой	0,252	0,633	0,335	0,023	0,556	0,064	0,372	0,013	0,162
TiAlN	1,000	1,000	0,845	0,575	0,661	0,061	0,347	0,111	1,033
CrAlSiN	0,945	0,795	1,000	1,000	0,610	1,000	1,000	0,400	1,960
DLC	0,486	0,540	0,758	0,227	1,000	0,076	0,604	1,000	0,807

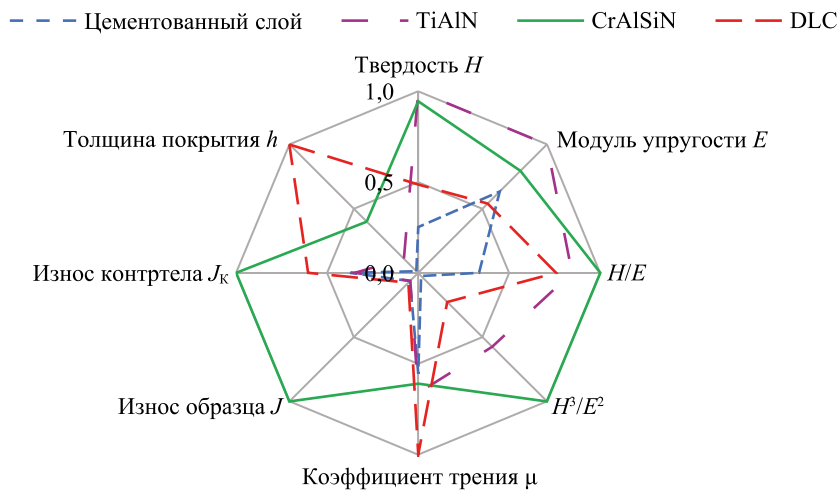


Рис. 2. Радиальная диаграмма в относительных единицах для оптимизации покрытий, нанесенных на цементованную сталь 12Х2Н4А; контурное исполнение многоугольников

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по комплексу 8-ми свойств все покрытия превосходят эталонный цементованный слой стали. При этом неоспоримым лидером является нитридное покрытие системы CrAlSiN. Если сравнивать этот результат с отдельными свойствами, то аналогичную расстановку приоритетов дают только механические характеристики H , H/E и H^3/E^2 , а также параметр h . Однако главный трибологический параметр — износ образцов J — не соответствует результату комплексной оптимизации, поскольку износостойкость цементованного слоя практически того же уровня, что и у покрытий TiAlN и DLC. А по другому важному трибологическому параметру — коэффициенту трения μ — вне конкуренции оказывается DLC-покрытие. Даже если повысить приоритет указанных свойств J и μ за счет введения весовых коэффициентов, то итоговый результат выполненной оптимизации (порядок расположения покрытий по критерию оптимизации S) от этого не изменится.

Распределение значений параметра комплексной оптимизации S , приведенное на гистограмме рис. 3, иллюстрирует целесообразность применения покрытий для повышения комплекса свойств контактной поверхности трения цементованной стали. Следует отметить, что введение весовых коэффициентов свойств, например снижение значимости прочностных свойств (всех, кроме H^3/E^2), а также J_K и h на 20–30 %, уменьшает в целом параметр S , но не меняет относительное расположение покрытий на рис. 3.

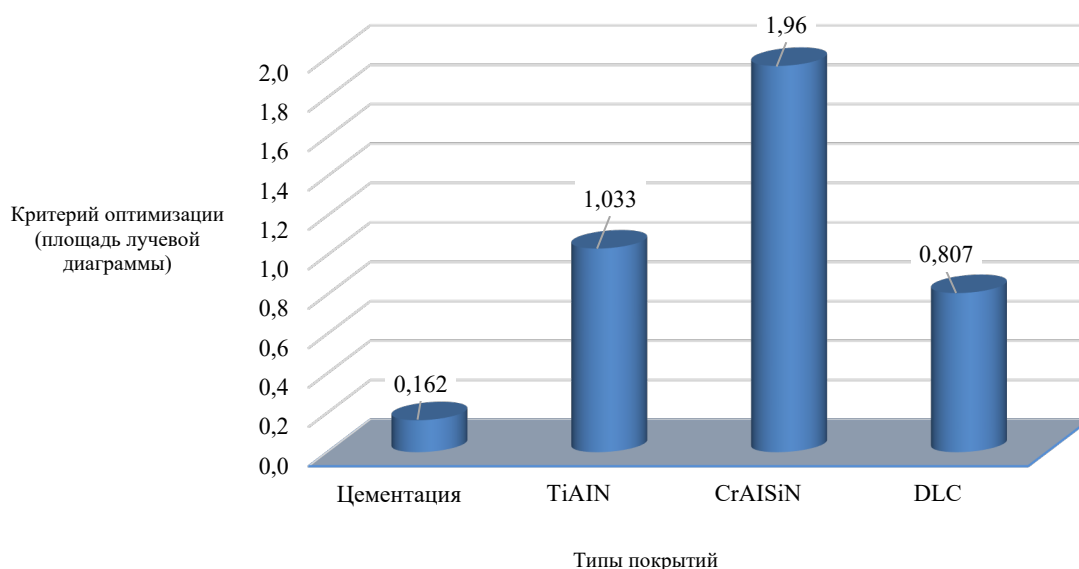


Рис. 3. Сравнительные данные параметра оптимизации покрытий — площадей фигур на радиальной диаграмме рис. 2

В целом же, оптимальным решением является применение ионно-вакуумного нитридного покрытия системы CrAlSiN. Его использование повышает как прочностные характеристики стальной поверхности (H , E , H/E , H^3/E^2), так и трибологические (μ , J , J_K), а главное, обеспечивается стабильный значительный прирост износостойкости трибосопряжения. При этом толщина покрытия остается в диапазоне «тонких пленок», что не нарушает геометрии используемых трибосопряжений, не требует их дополнительной конструкторской доработки или новых прочностных расчетов.

Заключение. В соответствии с результатами многопараметрической оптимизации по комплексу свойств (8 свойств) различных по составу покрытий, выполненной путем построения радиальных (лучевых) диаграмм, для повышения работоспособности контактных поверхностей трения из цементованной стали 12X2H4A рекомендуется использование вакуумного ионно-плазменного покрытия системы CrAlSiN в виде тонкой пленки толщиной 1,0...1,5 мкм. Для повышения трибологических свойств (в частности, для снижения коэффициента трения) рекомендуется использование комбинированного покрытия в виде указанного покрытия CrAlSiN с дополнительным нанесением пленки DLC-покрытия в виде наружного слоя.

Определение оптимального комплекса свойств материала по методу радиальных (лучевых) диаграмм направлено на прогнозирование достоверности экспериментальных результатов, полученных в лаборатории, по отношению к результатам эксплуатационных, натуральных или стендовых испытаний, поэтому использование этого метода требует обратной связи в виде сравнительной оценки адекватности прогноза. Только при наличии удовлетворительной обратной корреляционной связи целесообразны рекомендации по использованию лабораторных измерений взамен сложных или дорогостоящих эмпирических испытаний. С этой целью на основе результатов выполненной оптимизации были разработаны технологические рекомендации для проведения стендовых испытаний нагруженных шлицевых муфт, в том числе при критических параметрах нагружения.

Список литературы

1. Kudryakov O.V., Varavka V.N., Zabiya I.Yu., Sidashov A.V., Novikov E.S. Synthesis, Electronic Structure, Microstructure, and Properties of Vacuum Ion-Plasma Coatings Based on Carbon. In: *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications*. Springer Proceedings in Materials, Vol. 10. P. 197–206. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76481-4_17
2. Колесников В.И., Кудряков О.В., Варавка В.Н., Сидашов А.В., Колесников И.В., Мантуров Д.С. и др. Особенности структурно-фазового состояния и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий системы Cr-Al-Si-N. *Физическая мезомеханика*. 2022;25(6):26–38 https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_6_26
3. Колесников В.И., Кудряков О.В., Забияка И.Ю., Новиков Е.С., Мантуров Д.С. Структурные аспекты износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий. *Физическая мезомеханика*. 2020;23(1):62–77. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-11006>
4. 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.
5. 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. URL: <https://www.sigma08.ru/jour/article/view/257> (дата обращения: 15.05.2024).
6. 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.
7. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiya I.Yu., Novikov E.S., Manturov D.S. Structural Aspects of Wear Resistance of Coatings Deposited by Physical Vapor Deposition. *Physical Mesomechanics*. 2020;23(6):570–583. <https://doi.org/10.1134/S1029959920060132>
8. Varavka V.N., Kudryakov O.V. Regularities of Steel Wear under the Impact of Discrete Water–Droplet Stream, Part II: Stage of Developed Droplet-Impingement Erosion. *Journal of Friction and Wear*. 2015;36(2):153–162. <https://doi.org/10.3103/S1068366615020166>
9. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 1. *Материаловедение*. 2012;(5):36–43.
10. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 2. *Материаловедение*. 2012;(6):14–19.
11. Варавка В.Н., Кудряков О.В., Медников Ал.Ф., Ирха В.А. Закономерности и параметры каплеударной эрозии титановых сплавов. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011;6(164):92–98.
12. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Прочность и механизмы разрушения высоко-пластичных материалов при воздействии дискретного водно-капельного потока. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2011;11(8–2(59)):1376–1384. URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/867/862> (дата обращения: 15.05.2024).
13. Varavka V.N., Kudryakov O.V., Ryzhenkov A.V. Multilayered Nanocomposite Coatings for Anti-Erosive Protection. Chapt. 5. In book: I.A. Parinov (Ed.), *Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications*. NY, USA; Nova Science Publishers: 2015. P. 105–132.
14. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Integrated Indentation Tests of Metal-Ceramic Nanocomposite Coatings. *Inorganic Materials*. 2015;51(15):1508–1515. <https://doi.org/10.1134/S0020168515150108>
15. ISO/FDIS 14577–1:2002; *Metallic Materials — Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters. Part 1: Test Method*.
16. Кудряков О.В., Пустовойт В.Н. Структурный критерий коррозионной стойкости «белых слоев». *Материаловедение*. 1998;(7):33–39.
17. Сапунов С.Ю., Кудряков О.В., Фартушный Н.И. Структура и свойства никель-цинкового покрытия на стали. *Сталь*. 2003;(11):94–96.
18. Кудряков О.В. Дислокационные квазидиполи и их роль в мартенситном превращении стали. *Физика металлов и материаловедение*. 2002;94(5):3–10.
19. Кудряков О.В., Варавка В.Н. *Феноменология мартенситного превращения и структуры стали*. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ; 2004. 200 с.
20. Roy M. Nanocomposite Films for Wear Resistance Applications. In: Roy M. (Ed.). *Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear*. Wien; Springer-Verlag: 2013. 310 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0101-8_2

Об авторах:

Павел Евгеньевич Антипов, магистрант кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), sly_fox_03@mail.ru

Андрей Русланович Блинский, магистрант кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), blinskiy.andrey12@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Pavel E. Antipov, Master's Degree Student of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), sly_fox_03@mail.ru

Andrei R. Blinskiiii, Master's Degree Student of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), blinskiy.andrey12@gmail.com

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.