

УДК 621.7/9.048.7

Котов С.Ю., Беляев Г.Я.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С ЦЕЛЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

**Введение.** Техничко-экономические показатели машин в значительной степени определяются эффективностью и надежностью узлов трения. Снижение износа деталей и потерь на трение повышает КПД, мощность и надежность машин, существенно снижает затраты, сопутствующие ремонту и эксплуатации техники.

Среди существующих на данном этапе развития науки и техники способов увеличения долговечности узлов трения, наиболее целесообразным является нанесение на трущиеся поверхности различного рода покрытий [1]. Среди таких методов лучшим сочетанием преимуществ и недостатков обладает метод осаждения покрытий из плазмы в вакууме, хорошо зарекомендовавший себя при упрочнении вкладышей подшипников скольжения, втулок, деталей ДВС и других пар трения.

Стоит отметить, что существует ряд факторов, сдерживающих широкое применение покрытий в узлах трения. Так, на настоящий момент не существует единой методики по определению эффективности применения покрытий в узлах трения скольжения, а аналогичных методик для узлов трения качения попросту не существует. В своих работах исследователи руководствуются субъективным предпочтением того или иного покрытия, в то время, как любая характеристика вакуумно-плазменного покрытия не является постоянной величиной и может изменяться в определенном диапазоне. Помимо прочего, нет единого фактора оценки свойств трибопокрытий: некоторые ученые при оценке эффективности использования покрытия для улучшения эксплуатационных свойств узлов трения руководствуются исключительно триботехническими свойствами (коэффициентом трения скольжения, износостойкостью, иногда оценивается изнашивающая способность по отношению к контртелу), часть исследователей оценивают комплекс физико-механических характеристик (микротвердость, адгезионную прочность, краевой угол смачивания и т.д.). Особенно затрудняет исследование тот факт, что несмотря на достаточную обширность изучения вакуумно-плазменных покрытий, исследование их триботехнических характеристик чаще всего носит частный, а порой и противоречивый характер [2–7].

Все вышеуказанные факты свидетельствуют об острой необходимости разработки единой системы по оценке свойств и о необходимости создания единой базы сведений о каждом покрытии.

Целью данного научного исследования является разработка единой методики оценки свойств вакуумно-плазменных покрытий с целью их использования в узлах трения.

**Широкий спектр материалов,** используемых в качестве исходных PVD методами, обуславливает большое разнообразие покрытий, каждое из которых обладает набором уникальных свойств. Данное обстоятельство затрудняет выбор того или иного покрытия для работы в определенных условиях эксплуатации.

Рядом исследователей предложены многочисленные методики, позволяющие оценить эксплуатационные свойства покрытий, предназначенных для упрочнения режущего инструмента. Оценка покрытий для узлов трения по такой методике невозможна, т.к.

главной величиной, определяющей функциональную ценность инструментального покрытия является его способность защищать рабочую поверхность инструмента (износостойкость, термостойкость и т.д.), а особенности воздействия на сопряженное тело, потери на трение и остальные характеристики (микротвердость, вязкость и др.) являются малозначимыми.

Оценка пригодности покрытий для увеличения срока службы узлов трения является более сложной и комплексной задачей, т.к. к триботехническим покрытиям предъявляется ряд специфических требований. Так, наравне с износостойкостью, должен оцениваться и износ контртела, т.к. изменение зазора в паре трения вследствие износа вне зависимости от вида поверхности (упрочняемой или сопряженной) носит одинаково негативный характер для долговечности узла трения. Необходимым является и увеличение эффективности работы таких узлов за счет снижения потерь на трение [8].

Анализ имеющихся данных свидетельствует, что на настоящий момент отсутствуют универсальные полноценные научные методики оценки пригодности использования покрытий в узлах трения скольжения, а также полностью отсутствуют аналогичные разработки для узлов трения качения. По всей видимости, это связано с большим числом факторов, оказывающих влияние на работу покрытия в паре трения, отсутствием научно обоснованных рекомендаций по составу, методах нанесения, средах и режимах процесса нанесения.

С целью определения оптимального сочетания характеристик вакуумных покрытий при трении со сталью ШХ15 нами путем математического моделирования разработан и проверен на практике комбинированный ступенчатый метод оценки функциональной пригодности триботехнических покрытий.

В основе данной методики лежит определение характеристик покрытий в три этапа:

а) оценка основных триботехнических характеристик. На этом этапе производится оценка таких параметров, как:

- коэффициент трения скольжения – величина, характеризующая способность покрытия сопротивляться скольжению контртела по своей поверхности. Стоит отметить, что нанесение покрытий при соблюдении ряда условий, как правило, приводит к уменьшению силы трения за счет создания барьера при молекулярном взаимодействии поверхностей;
- износостойкость – способность покрытия сопротивляться износу при трении скольжения, т.к. сохранение геометрических параметров и величины зазора контактирующих поверхностей в значительной степени влияет на долговечность узлов трения, величина износа одной из главных при определении характеристик покрытия;
- изнашивающая способность покрытия по отношению к контртелу – величина, характеризующая интенсивность изнашивания покрытием сопряженной поверхности.

**Котов Сергей Юрьевич**, ассистент кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета.  
**Беляев Геннадий Яковлевич**, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, г. Минск, ул. Б. Хмельницкого, 9, учебный корпус 6, e-mail: Kotov\_Sergey09@mail.ru.

Для наглядности и дальнейших вычислений на основании трех основных триботехнических характеристик предлагается производить построение объемного симплекса триботехнических характеристик покрытий. Затем на основании графического изображения производится комплекс вычислений, позволяющий определить покрытия с оптимальными триботехническими свойствами:

б) оценка физико-механических свойств покрытий – на данном этапе производится оценка микротвердости (нанотвердости), краевого угла смачивания, адгезионной прочности сцепления с материалом подложки, коррозионной стойкости (время возникновения первых очагов коррозии, их качественная и количественная характеристики) и др.;

в) оценка экономической целесообразности и эффективности применения покрытий с наилучшим сочетанием триботехнических и физико-механических свойств (для мелко- и среднегабаритных серийных подшипников, работающих в условиях эксплуатации близким к нормальным).

Согласно предлагаемой методики оценки, функциональная пригодность рассматриваемых покрытий будет определяться площадью основания симплекса, образованного прямыми, попарно соединяющими значения основных триботехнических показателей (в относительных значениях) в трех взаимоперпендикулярных плоскостях.

Площадь симплекса определяли согласно формуле (1):

$$S = \sqrt{p \cdot (p - a) \cdot (p - b) \cdot (p - c)}, \quad (1)$$

где  $a, b, c$  – основные триботехнические показатели покрытий или длины граней симплекса;

$$a = \sqrt{L_{Ku}^2 + L_f^2}; \quad (2)$$

$$b = \sqrt{L_{Kuuk}^2 + L_f^2}; \quad (3)$$

$$c = \sqrt{L_{Ku}^2 + L_{Kuuk}^2}, \quad (4)$$

$p$  – полупериметр проекций граней симплекса на каждую плоскость;

$$p = \frac{a + b + c}{2} = \frac{\sqrt{L_{Ku}^2 + L_f^2} + \sqrt{L_{Kuuk}^2 + L_f^2} + \sqrt{L_{Ku}^2 + L_{Kuuk}^2}}{2}, \quad (5)$$

Расчет функциональной пригодности произведен таблично. Градацию покрытий предлагается вести согласно значениям величины площади симплекса  $S$ , параметры оценки которой представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Таблица классификации покрытия

Диапазон значений $S$	Класс покрытия	Оценка возможности применения покрытия в узлах трения
0...20	№1	рекомендовано
20...30	№2	целесообразно
30...50	№3	возможно
60...90	№4	нецелесообразно
>90	№5	противопоказано

Табличный расчет триботехнических характеристик покрытий по результатам собственных исследований [9, 10] представлен в таблице 2, графическое изображение – на рисунке 1.

### Заключение

1. Оптимальное сочетание свойств, таких как пониженный коэффициент трения, низкая скорость изнашивания и низкая изнашивающая способность по отношению к контртелу, при трении в паре со сталью ШХ15 позволяет рекомендовать покрытие ZrN для увеличения работоспособности узлов трения, работающих в условиях ограниченного количества смазки или ее отсутствия. Данное покрытие при трении в паре со сталью ШХ15 позволило уменьшить коэффициент трения на 28%, объемную скорость изнашивания упрочняемой поверхности в 2,5–3 раза и уменьшить износ контртела на 25% в сравнении с парой трения «сталь ШХ15 – сталь ШХ15»;

2. Cr, TiN и многоэлементные покрытия, наряду с высокой износостойкостью и низкой изнашивающей способностью по отношению к контртелу продемонстрировали пониженный коэффициент трения. Это обстоятельство позволяет также рекомендовать использование данных покрытий для увеличения долговечности узлов трения;

3. Карбиды и карбонитриды тугоплавких металлов зарекомендовали себя как покрытия, обладающие высокими антифрикционными и износостойкими свойствами, однако относительно высокая изнашивающая способность по отношению к контртелу и значительное время приработки при трении скольжения в паре со сталью ШХ15 делает их менее предпочтительными для упрочнения узлов трения.

4. Высокие антифрикционные свойства и низкую изнашивающую способность по отношению к контртелу при трении в паре со сталью ШХ15 продемонстрировали металлоподобные алмазоподобные углеродные покрытия. Однако относительно низкая стойкость покрытия позволяет рекомендовать данные покрытия только для узлов трения, подвергающихся изнашиванию в условиях отсутствия смазочного материала.

Таблица 2. Расчет функциональной пригодности применения покрытия в узлах трения

класс	материал	износостойкость	коэффициент трения скольжения	износ контртела	коэффициент трения в отн. величинах	износ контртела в отн. величинах	a	b	c	P	S
		$K_{ис}, (M^3/H·M)·10^{-15}$	$f$	$\Delta m, 10^{-4} г$							
4	ШХ15	10	0,2	2512	10	10	14,2	14,2	14,3	21,4	87,9
2	Cr	5,26	0,1	2145	5	5,6	7,3	7,5	7,7	11,2	24,1
2	TiN	2,32	0,16	2111	8	5,1	8,3	9,5	5,6	11,7	23,3
1	ZrN	2,02	0,13	2015	6,5	3,9	6,8	7,6	4,4	9,4	14,9
2	CrC	2,37	0,12	2354	6	8,2	6,5	10,1	8,5	12,6	27,3
2	ZrCN	2	0,12	2204	6	6,3	6,3	8,7	6,6	10,8	20,8
2	CrCN	3,92	0,14	2015	7	3,9	8,0	8,0	5,6	10,8	20,9
2	ZrON	4,21	0,13	2088	6,5	4,9	7,7	8,1	6,4	11,1	23,2
1	AlTiN	3,51	0,12	2055	6	4,4	7,0	7,5	5,7	10,0	18,7
2	Ti-DLC	10,4	0,07	1857	3,5	2,0	11,0	4,0	10,6	12,8	21,1
2	Cr-DLC	10,2	0,07	1908	3,5	2,6	10,8	4,4	10,5	12,8	22,7

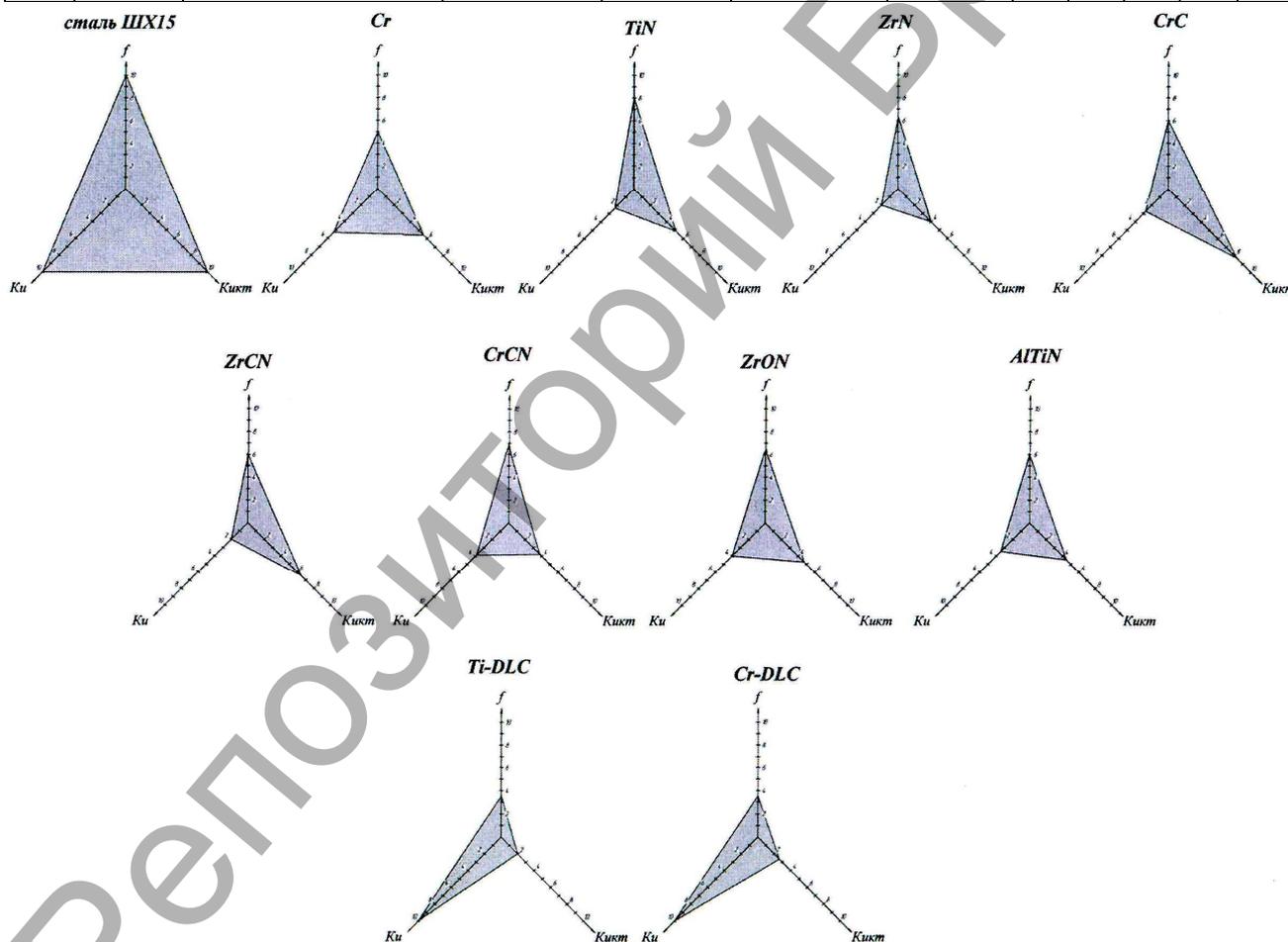


Рис. 1. Симплекс триботехнических свойств покрытия

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- Семенов, А.П. Новая вакуумная ионно-плазменная технология изготовления подшипников скольжения / А.П. Семенов // Вестник КГУ. – 2008. – № 1. – С. 39–47.
- Любченко, А.П. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении по металлическим материалам / А.П. Любченко, В.М. Мацевитый, Г.Н. Бакакин, В.М. Бересев, А.К. Олейник // Трение и износ. – 1983. – № 5. – С. 892–897.
- Спицын, Н.А. О влиянии металлических и неметаллических покрытий на износостойкость и антифрикционные свойства металло-полимерных пар трения в атмосфере и вакууме / Н.А. Спицын, К.Г. Ган, Е.Н. Ивашов // Трибоника и антифрикционное материаловедение: материалы Всесоюзной науч.-техн. конф., Новочеркасск, 21 мая 1980 г. – Новочеркасск, 1983. – С. 168–169.
- Мрочек, Ж.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Ж.А.

- Мрочек, Б.А. Эйзнер, В.А. Марков. – Минск: Наука і тэхніка, 1991. – 95 с.
5. Бугас, Н.А. Решенные и нерешенные задачи по совместимости трибосистем / Н.А. Бугас // Трение и износ. – 1993. – № 4. – С. 25–33.
6. Костюк, Г.И. Физико-технические основы комбинированных технологий напыления покрытий, ионной имплантации, ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения / Г.И. Костюк. – Харьков: АИНУ, 2002. – 1030 с.
7. Дудник, С.Ф. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве / С.Ф. Дудник, А.В. Сагалович, А.П. Любченко, А.К. Олейник // Физическая инженерия поверхности. – 2004. – № 1. – С. 110–114.
8. Физические свойства вакуумно-плазменных покрытий для режущего инструмента [Электронный ресурс] / Сайт рефератов и научных разработок. – Минск, 2006. – Режим доступа: <http://ref.by/refs/81/33163/1.html> – Дата доступа: 30.12.2013.
9. Котов, С.Ю. Триботехнические характеристики одноэлементных PVD покрытий / С.Ю. Котов, Г.Я. Беляев // Трение и износ. – 2013. – № 4. – С. 281–285.
10. Котов, С.Ю. Триботехнические характеристики многоэлементных, многокомпонентных PVD и металлосодержащих DLC покрытий / С.Ю. Котов, Г.Я. Беляев // Агропанорама. – 2013. – № 2. – С. 63–67.

*Материал поступил в редакцию 14.05.14*

**KOTOV S.Yu., BELYAEV G.Ya Technique of the assessment of characteristics of vacuum and plasma coverings for the purpose of use in friction knots**

In this article the problem of evaluating the performance properties of PVD coatings for use in friction sliding and rolling. Was developed and proposed speed estimation of functional fitness coatings. The essence of this method lies in the consistent assessment of tribological, physical, mathematical and economic parameters of coatings. As proposed evaluation parameter assignment covers classes depending on the optimal combination of properties. In order to improve accessibility and effectiveness of the methodology proposed to represent the basic frictional properties of the coatings in the form of a simplex tribological characteristics.

As a result of earlier tribological tests and develop methods evaluated the suitability of the most promising functional vacuum plasma coatings.