

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОЭЛЕМЕНТНЫХ PVD-ПОКРЫТИЙ

С. Ю. КОТОВ⁺, Г. Я. БЕЛЯЕВ

С целью определения возможностей использования вакуумных покрытий в узлах трения были исследованы основные триботехнические характеристики одноэлементных PVD-покрытий на основе титана, циркония, хрома, вольфрама и алюминия при трении скольжения в паре со сталью ШХ15 ГОСТ 801-78. В ходе исследования были выявлены покрытия с оптимальным сочетанием свойств, таких как коэффициент трения, износостойкость, время приработки и изнашивающая способность по отношению к контртелу.

Ключевые слова: узел трения, PVD-покрытия, антифрикционные покрытия, износостойкость.

Введение. Эффективность и надежность узлов трения в значительной степени определяют технико-экономические показатели машин. Снижение износа и потерь на трение повышает КПД, мощность машин, их надежность и существенно снижает затраты, сопутствующие ремонту и эксплуатации.

В настоящее время в различных отраслях промышленности для повышения эксплуатационных свойств узлов трения наибольшее распространение получило применение смазочных материалов. Однако, наряду с относительно низкой стоимостью, эффективностью и некоторой степенью универсальности, применение смазок не всегда целесообразно и возможно. К недостаткам следует отнести:

- усложнение конструкции машин в случае применения конструкций принудительного смазывания, масляных фильтров, уплотнений и т. д.;
- способность смазывающего материала накапливать грязь и продукты износа, что приводит к общему ухудшению условий работы узла трения;
- на свойствах смазывающих материалов значительно отражается изменение температуры окружающей среды;
- невозможность использования смазочных материалов при некоторых специфических видах трения, например, в вакууме.

Все более острой становится необходимость применения более универсальных и эффективных методов улучшения характеристик узлов трения. В настоящее время получили применение полимеры с высокими антифрикционными свойствами, т. н. “самовосстанавливающиеся” материалы, материалы с применением наночастиц и т. д. Рядом зарубежных фирм в качестве менее дорогой альтернативы таким материалам предложено нанесение на трущиеся поверхности различного рода покрытий, которые обеспечивают уникальные сочетания свойств, существенно отличающихся от свойств материала основы. Нанесение покрытий получило применение при упрочнении подшипников скольжения, втулок, деталей двигателей внутреннего сгорания и др.

Среди существующих современных технологий поверхностного упрочнения лучшим сочетанием свойств обладает метод осаждения покрытий на подложку из плазмы в вакууме. Среди разновидностей этого метода стоит выделить метод физического осаждения покрытий в вакууме (в международной классификации PVD — сокращено от англ. *physical vapour deposition*) [1–3]. Функ-

Белорусский национальный технический университет. Беларусь, 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65.

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: Kotov_Sergey09@mail.ru.

циональные покрытия, полученные таким методом, по целевому назначению можно условно разделить на две группы: износостойкие и антифрикционные. К числу износостойких относятся покрытия на основе карбидов и нитридов большинства тугоплавких металлов. В качестве антифрикционных нашли широкое применение покрытия медью, гальваническим хромом, молибденом, алмазоподобные углеродные покрытия (DLC-покрытия) и покрытия на основе сульфидов. Износостойкие покрытия обладают высокой стойкостью, однако, имеют низкие антифрикционные свойства и высокую изнашивающую способность по отношению к контртелу; антифрикционные же покрытия при пониженном коэффициенте трения обладают низкой стойкостью к изнашиванию. Частные случаи трения требуют применения покрытий с высокими износостойкими и антифрикционными характеристиками. Решением данной проблемы могли бы стать композиционные покрытия, однако, они имеют ряд недостатков, ограничивающих их широкое применение: сложность производства и высокую себестоимость [4–5].

Цель данного научного исследования — оценка полного спектра триботехнических характеристик PVD-покрытий с целью их дальнейшего применения для улучшения эксплуатационных качеств узлов трения.

Методы, оборудование и материалы исследований. Для определения коэффициента трения скольжения со смазочным материалом и без использовались образцы из закаленной стали ШХ15 ГОСТ 801-78 (твердость 63...65 HRC), которые представляли собой цилиндрическое тело $\varnothing 60$ мм и высотой 10 мм, на торцовую поверхность которого, магнетронным способом были нанесены покрытия толщиной 5 мкм. Определение коэффициента трения скольжения характеристик вакуумно-плазменных покрытий и износа проводилось в соответствии с ГОСТ 23.224-86 на универсальной машине трения УМТ 2168 с электромеханическим измерителем момента сопротивления вращению (момента трения). В качестве контртела использовались термообработанные втулки из стали ШХ15 (65 HRC), контактная поверхность которых представляла собой кольцо (внутренний диаметр 12 мм, наружный — 20 мм). Шероховатость всех поверхностей трения составляла $R_a = 0,04$ мкм. Условия контакта: трение скольжения по схеме “палец—диск” при неподвижном диске и вращающемся пальце.

При определении коэффициента трения скольжения без смазки в целях недопущения задиrow и улучшения условий приработки пар трения осуществляли однократно смазку пластичной смазкой Литол-24 “ЛЮКС” ГОСТ 21150-87. После проведения первого замера изменения массы образца по истечению 30 секунд от начала испытания смазочный материал удалялся и далее не применялся.

При определении коэффициента трения скольжения со смазкой испытание проводили при погружении пары трения в масло И40А ГОСТ 20799-88, при частоте вращения пальца $n = 300$ мин⁻¹ при постоянных влажности и температуре окружающей среды.

В ходе эксперимента на аналитических весах HR-200 (с точностью измерения до 0,0001 г) регистрировалась величина изменения массы образцов вследствие износа покрытий по истечении 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50 минут от начала эксперимента и контртела в конце эксперимента, а также значения момента трения с частотой два измерения в секунду.

Коэффициент трения рассчитывали по формуле:

$$\mu = \frac{2M_{\text{тр}}}{DF}, \quad (1)$$

где $M_{\text{тр}}$ — момент трения, Н·м; D — диаметр образца, м; $D = 0,02$ м; F — нагрузка, Н; при трении без смазки $F = 200$ Н, при трении со смазкой $F = 1000$ Н.

За величину коэффициента трения принимали его значение в установившемся режиме при испытаниях каждого образца вакуумно-плазменного напыления. Для каждого покрытия опыт повторялся пятикратно.

Изнашивание покрытий предложено оценивать объемной скоростью изнашивания, как объема покрытия, подвергшегося износу при трении скольжения без смазки под нагрузкой на пути трения по формуле:

$$K_{\text{и}} = \frac{V}{LF}, \quad (2)$$

где V — объем металла, удаленного в процессе износа, м^3 ; F — нагрузка, Н; $F = 200$ Н; L — путь трения, м;

$$L = \pi dnt, \quad (3)$$

где d — средний диаметр кольца изнашивания, м; n — частота вращения пальца, мин^{-1} ; при трении без смазки $n = 300$ мин^{-1} ; t — время трения, мин;

В результате трения на образцах образовывалась канавка износа, имеющая форму кольца. Геометрические параметры канавки износа по сечению, перпендикулярному к поверхности трения, имели постоянное значение, что позволило вычислить объем материала покрытия, удаленного в результате износа. Объем удаленного материала определяли умножением высоты бороздки, образовавшейся в ходе эксперимента, на площадь контакта. Высоту кольца износа определяли при помощи контактного профилографа-профилометра модель 252 ГОСТ 19300-86. Площадь контакта принимали равной площади торца контртела, имеющего кольцевидную форму.

Изнашивающую способность покрытия по отношению к контртелу определяли как отношение изменения массы “пальца” к пути трения.

Обсуждение результатов. Коэффициенты трения скольжения без смазки для изучаемых PVD-покрытий представлены на рис. 1.

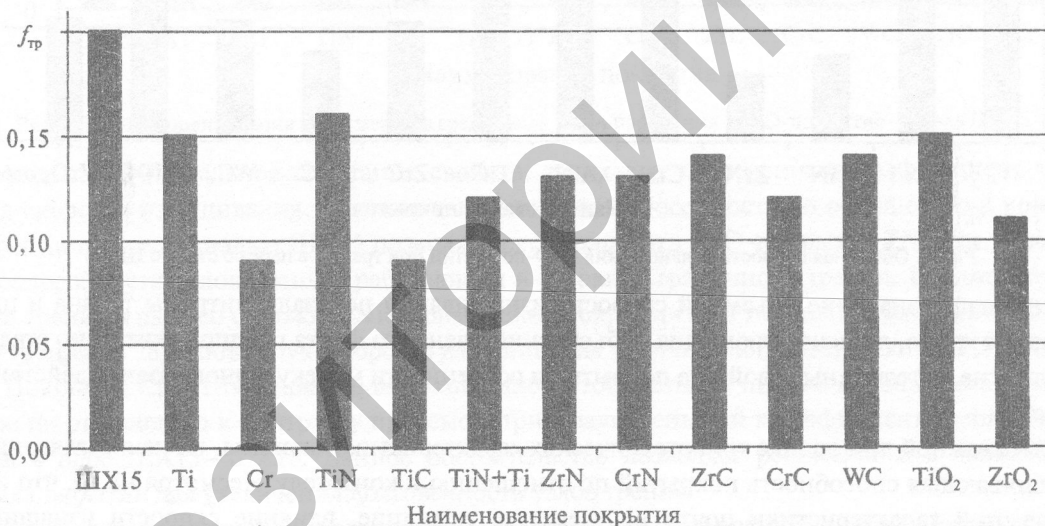


Рис. 1. Коэффициент трения скольжения без смазки пары трения “PVD-покрытие — сталь ШХ15”

Было установлено, что вакуумно-плазменные покрытия Ti, TiO₂, CrON и AlN были полностью изношены до окончания эксперимента. В дальнейших расчетах характеристик этих покрытий используются показатели, полученные до момента достижения покрытиями критического износа.

В результате эксперимента было установлено, что время приработки пары трения “PVD-покрытие — сталь ШХ15” существенно отличается для каждого покрытия. Т. к. приработка характеризуется повышенным износом поверхностей трения, существенным возрастанием их температуры, образованием эксплуатационной шероховатости, которая отличается от технологической и т. д., триботехнические покрытия должны обладать наименьшим временем приработки. Значения времени приработки для PVD-покрытий представлены на рис. 2.

Исходя из результатов исследования и одинаковой шероховатости всех образцов, было выдвинуто предположение о том, что время приработки вакуумно-плазменных покрытий находится в зависимости (близкой к линейной) от их микротвердости. Предположительно, упругие характеристики покрытия в период приработки оказывают определяющее влияние на изменение шероховатости в зоне трения, препятствуя разрушению технологического микрорельефа поверхности.

Результаты исследования объемной скорости изнашивания покрытий приведены на рис. 3.

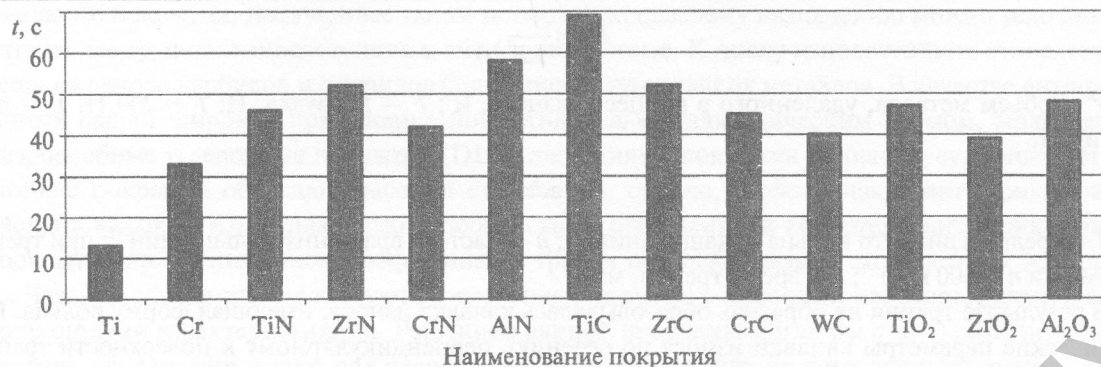


Рис. 2. Время приработки при трении скольжения без смазки в паре "PVD-покрытие — сталь ШХ15"

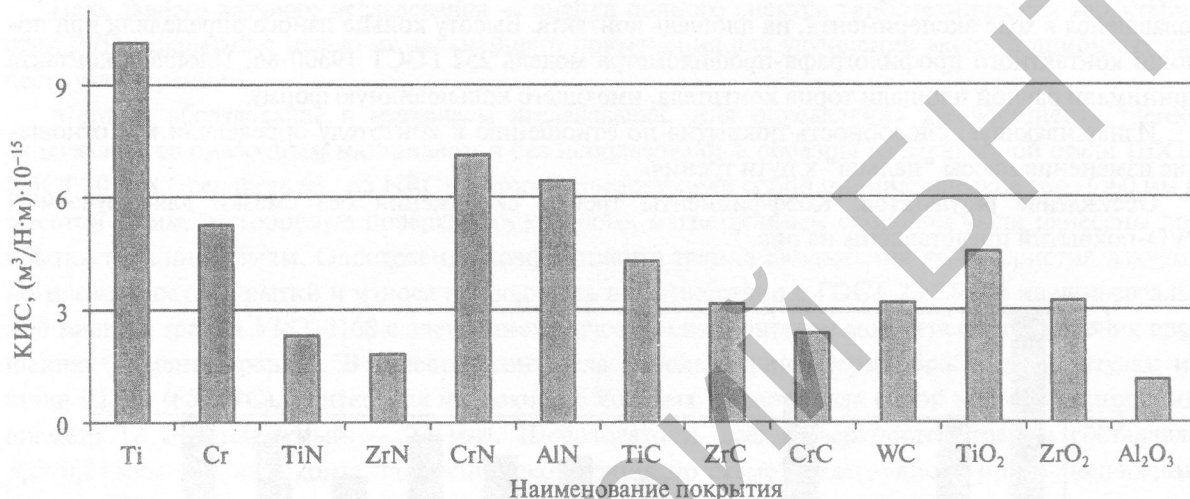


Рис. 3. Объемная скорость изнашивания PVD-покрытий при трении в паре со сталью ШХ15

Наименьшее значение объемной скорости изнашивания показали нитриды титана и циркония, карбид хрома, диоксид алюминия. Объяснением данного факта предположительно стали высокие упругие, адгезионные свойства покрытия и особенности молекулярного взаимодействия поверхностей.

Весьма важной при оценке триботехнических характеристик покрытия, на наш взгляд, является изнашивающая способность покрытий по отношению к контртелу. Несмотря на то, что исследованию этой характеристики почти не уделяется внимание, влияние скорости изнашивания контртела, наравне с показателями изнашивания упрочняемой поверхности, имеет определяющее значение для долговечности, вибро- и шумовой активности узлов трения.

В ходе эксперимента регистрировалась массовая скорость изнашивания контртела (пальца), оцениваемая как изменение массы контртела по окончании эксперимента (рис. 4).

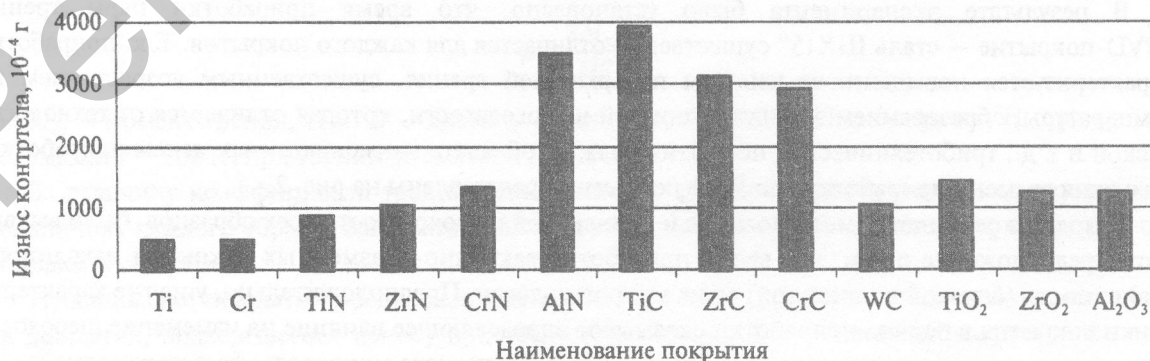


Рис. 4. Массовый показатель износа PVD-покрытий при трении в паре со сталью ШХ15

Наименьшую массовую скорость изнашивания контртела показали вакуумные покрытия Ti, Cr, TiN, ZrN и WC, а наибольшее значение этого показателя продемонстрировали TiC, AlN и CrC, что можно объяснить высокой микротвердостью покрытий, продукты износа которых, присутствуя в зоне трения, приводят к выраженному абразивному действию.

Коэффициенты трения скольжения в среде жидкой смазки для различных PVD-покрытий представлены на рис. 5.

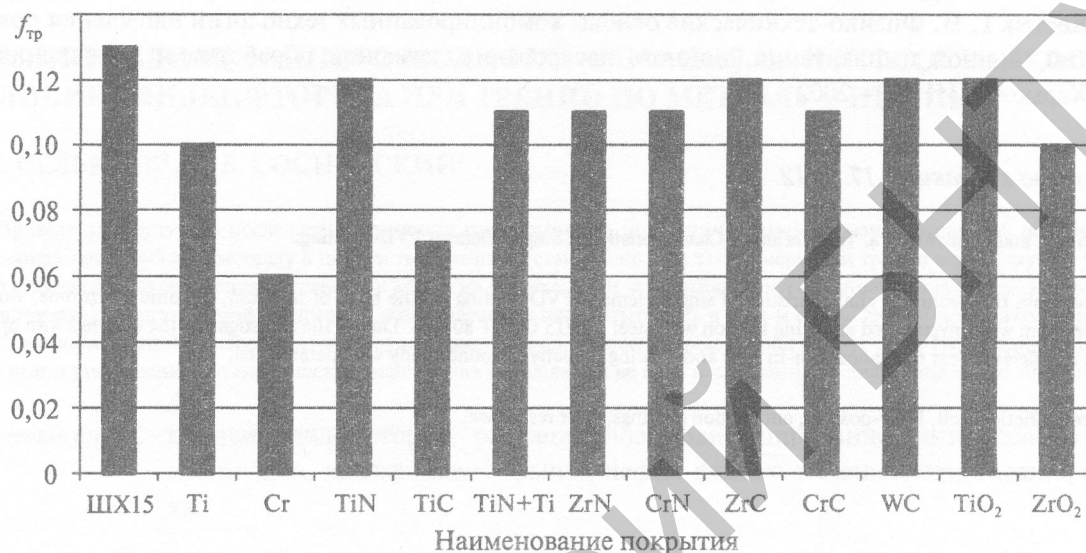


Рис. 5. Коэффициент трения скольжения в среде масла И40А пар трения “PVD-покрытие — сталь ШХ15”

Выводы. 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 PVD-покрытие ZrN для увеличения работоспособности узлов трения, работающих в условиях граничного трения. Применительно к случаю трения в паре со сталью ШХ15 применение покрытия ZrN позволило уменьшить коэффициент трения на 28%, объемную скорость изнашивания упрочняемой поверхности в 2,5–3 раза.

2. Покрытия Cr и TiN, наряду с высокой износостойкостью и низкой изнашивающей способностью по отношению к контртелу продемонстрировали меньший коэффициент трения, чем при трении в паре ШХ15–ШХ15. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать использование данных покрытий для увеличения долговечности узлов трения.

3. Карбиды тугоплавких металлов зарекомендовали себя как покрытия, обладающие высокими антифрикционными свойствами, однако, высокая изнашивающая способность по отношению к контртелу и значительное время приработки при трении скольжения в паре со сталью ШХ15 не позволяют их рекомендовать в качестве упрочняющих покрытий в узлах трения.

Обозначения

μ — коэффициент трения; $M_{тр}$ — момент трения, Н·м; D — диаметр образца, м; d — средний диаметр кольца изнашивания, м; F — нагрузка, Н; L — путь трения, м; n — частота вращения кольца, мин⁻¹; t — время трения, мин; V — объем металла удаленного в результате износа, м³; K_n — объемная скорость изнашивания, м²/Н.

Литература

1. Дудник С. Ф., Сагалович А. В., Любченко А. П., Олейник А. К. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве // Физическая инженерия поверхности. — 2004, № 1, 110–114

2. Любченко А. П., Мацевитый В. М., Бакакин Г. Н., Бересев В. М., Олейник А. К. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении по металлическим материалам // Трение и износ. — 1983 (4), № 5, 892—897
3. Семенов, А.П. Схватывание металлов и методы его предотвращения при трении // Трение и износ. — 1980 (1), № 1, 236—243
4. Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Марков В. А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. — Минск: Наука і тэхніка. — 1991
5. Костюк Г. И. Физико-технические основы комбинированных технологий напыления покрытий, ионной имплантации, ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения. — Харьков: АИНУ. — 2002

Поступила в редакцию 17.12.12.

Kotov S. Yu. and Beliaev G. Ya. **Tribotechnical Characteristics of Single-Element PVD-Coating.**

The main tribotechnical characteristics of single-element PVD-coating on the basis of titanium, zirconium, chrome, wolfram and aluminum were investigated at sliding friction with steel ShH15 GOST 801-78. During the investigation the coatings with optimal friction coefficient, wear resistance, run-in time and wearing capacity of counterbody were determined.

Keywords: friction unit, PVD-coating, antifriction coatings, wear resistance.