

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ

В.М. Береснев, А.И. Федоренко, В.И. Гриценко*, Д.Л. Перлов

Харьковский институт социального прогресса

**Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
Украина*

Поступила в редакцию 14.02.2003

Приведены результаты исследований триботехнических характеристик композиционных покрытий Ti-Al-N, Ti-Cu-N, Mo-Al-N. Показано, что наличие легирующих элементов в покрытии существенно влияет на износостойкость и коэффициент трения.

ВВЕДЕНИЕ

Длительность функционирования покрытий определяется рядом факторов, основными из которых являются: адгезия покрытий к основе и физико-механические свойства (прочность, предел выносливости, пластичность, хрупкость, твердость), а к основным свойствам покрытий, определяющих его главные функции в процессе трения, относится износостойкость и коэффициент трения. Интенсивность изнашивания и уровень коэффициента трения определяются как комплекс перечисленных выше свойств материалов, так и условиями фрикционного контакта. Эти требования особенно велики в области повышения долговечности машин, улучшения условий трения, оптимизации форм деталей, резервирования износостойкости. В этих условиях технология нанесения покрытий обеспечивает успешное решение стоящих проблем и создает основу для дальнейшего поиска имеющихся возможностей. Среди существующих современных технологий поверхностного упрочнения наиболее распространен метод вакуумно-дугового осаждения [1]. Покрытия, полученные этим методом для улучшения триботехнических характеристик пар трения, можно разделить на две основные группы: износостойкие и антифрикционные.

К числу износостойких относятся покрытия на основе карбидов, нитридов большинства тугоплавких материалов. Для них характерна высокая износостойкость, однако они могут сильно отличаться по своим механическим, химическим и электрическим свойствам. Анализ износных испытаний [2, 3] показывает, что при трении со сталью наибольшей износостойкостью обладают однослойные покрытия TiN и TiCN (при соотношении азота и метана в реакционном объеме газовой смеси 4 : 1), а также MoN.

Для снижения коэффициента трения применяются покрытия следующего состава: двухслойные TiN + Mo, TiN + α Ti, TiN + бронза, многослойные TiN + α Ti, а также композиционные

покрытия Fe-Ti-C [4, 5]. Испытания показали, что наилучший комплекс свойств реализуется на образцах с покрытием TiN + бронза. Они оказываются практически износостойкими, как TiN, но обладают при этом в несколько раз меньшей изнашивающей способностью. Многослойные покрытия TiN + α Ti характеризуются наибольшей стабильностью коэффициента трения. Эффективность его обусловлена следующим: мягкий слой α Ti, входя в соприкосновения с вращающимся контртелом, обеспечивает наличие большого положительного градиента механических свойств в покрытии, что, как известно, является хорошей предпосылкой нормального трения (в отсутствие мягкого слоя его функции в той или иной мере выполняют окисные пленки и другие вторичные структуры) [6].

На практике часто применяют покрытия из нитридов, карбидов, т.е. из простых соединений, однако опыт, накопленный при использовании металлических материалов, свидетельствует о том, что оптимальные решения надо искать в создании покрытий, представляющих сложные химические соединения, в состав которых входит несколько материалов.

Вакуумно-плазменные методы позволяют формировать такие покрытия из металлов и различных химических соединений [7].

Результаты исследований влияния легирования покрытий, приведенные в работе [8], свидетельствуют, что легирование TiN молибденом оказывает существенное влияние на его адгезионную активность по отношению к обрабатываемому материалу при резании.

В работе [9] приведены результаты экспериментальных исследований структуры и некоторых свойств многокомпонентных покрытий, полученных путем испарения многокомпонентных сплавов.

Авторами [10, 11] было исследовано влияние технологических параметров осаждения на структуру и фазовый состав покрытий Ti-Al-N, Ti-Cu-N, Mo-Al-N, полученных вакуумно-дуговым методом.

Однако в научной литературе практически отсутствуют сведения о трибологических свойствах покрытий сложных систем, полученных вакуумно-дуговым методом.

Исходя из вышеперечисленного, целью настоящей работы являются исследования триботехнических свойств композиционных покрытий Ti-Cu-N, Ti-Al-N, Mo-Al-N, полученных вакуумно-дуговым методом.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вакуумно-дуговым методом на установке ННВ-6.6-И4 были нанесены покрытия на образцы из стали 38Х2М10А (азотированная), размером 10×10×10 мм. В качестве распыляемых материалов применялись титановые (марка ВТ-1-00), молибденовые (марка МВЧП), алюминиевые и медные (вакуумного переплава) катоды, реакционным газом являлся азот особой чистоты.

Покрытия Ti-Al-N, Ti-Cu-N были нанесены при следующих технологических параметрах осаждения: $P = 0,1$ Па, $U = 100$ В. Регулировалась только скорость поступления Al, Cu. Для покрытия Mo-Al-N были выбраны оптимальные условия осаждения нитрида молибдена, регулировалась только скорость поступления Al на подложку. Определение одержания алюминия, меди в покрытиях осуществлялось на рентгеновском микроанализаторе MAP-2 с абсолютной погрешностью 0,1 % (мас). Фазовый состав покрытий определялся рентгеновским методом на установке ДРОН-3. Толщина покрытий определялась методом косого шлифа. Адгезия определялась методом склерометрии.

Изучение трения и износа осуществлялось на машине трения СМЦ-2 по схеме плоскость-цилиндр. Шероховатость покрытий определялась на приборе профилометр-профилограф модели 201. Методом рентгенофотозлектронной спектроскопии (РФЭС), а также вторичной ионной масс-спектрометрии изучались поверхности трения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью выяснения возможности применения в узлах трения композиционных покрытий, полученных вакуумно-дуговым методом, было проведено изучение износа и изнашивающей способности ряда покрытий.

Покрытия наносились на образцы из азотированной стали 38Х2М10А. Испытания осуществляли на машине трения СМЦ-2 в среде масла М14В2, температура 340К, нагрузка 1,0 кН, время испытаний 1 час. Шероховатость покры-

тий $R_a = 0,32 \div 0,64$ мкм. В табл. 1 приведены значения объемного и весового износа “покрытия-бронза Бр0,12”.

Таблица 1
Результаты изучения износа пары
“покрытие-бронза Бр 0,12”

Состав покрытия	Толщина покрытия, мкм	V_n, Γ	V_k, Γ	$F_{тр}$
TiN	10	0,0005	0,4120	0,124
Ti – Al – N	10	0,0001	0,0099	0,08
Ti – Cu – N	10	0,0001	0,0055	0,032
Mo – Al – N	10	0,0001	0,0015	0,03
Без покрыт.	–	0,010	0,0072	0,07

Как видно из приведенных данных, любое из исследуемых композиционных покрытий значительно повышает износостойкость образца – колочки, кроме того обеспечивает низкую изнашивающую способность покрытия. Исследование топологии поверхности трения покрытий показало, что поверхность покрывается тонкопленочными объектами. Известно [12], что для каждого металла и сплава существуют условия внешних физико-механических воздействий и среды, при которой на поверхности трения образуются вторичные структуры, представляющие собой химическое соединение металла с активными элементами среды. Структурные исследования поверхности трения покрытий были проведены на электронографе ЭГ-100М при ускоряющем напряжении 100 кэВ на отражение. Расчет электронограмм показывает, что на поверхности покрытий находится медь с параметром решетки $a = 3,51$ нм, что ниже табличного значения параметра меди $a = 3,608$ нм. Это можно объяснить тем, что на поверхности образуются химические соединения типа окиси меди нестехиометрического состава.

Физико-химические процессы при трении играют определяющую роль, они не только ускоряют процесс активации в зоне трения, но и способствуют диффузии всех элементов, заполняющих зону трения, независимо от их химической природы. На рис. 1 приведена зависимость коэффициента трения покрытия Ti-Al-N от концентрации алюминия при трении по поверхности гильзового чугуна.

Как видно из рис. 1, наименьшее значение коэффициента трения реализуется для композиционного покрытия с концентрацией алюминия от 10 до 15 % (мас.).

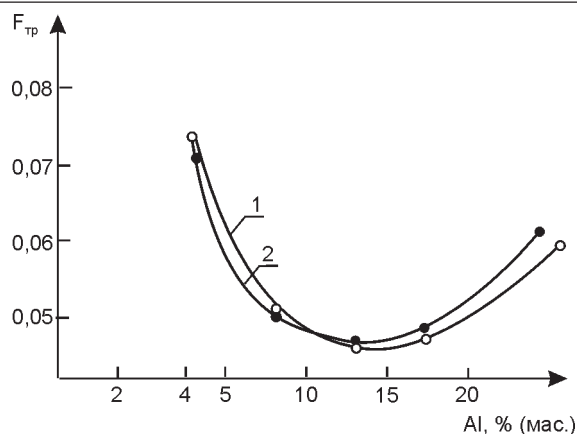


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от содержания алюминия в покрытии при нагрузках: 1 – 0,6 кН, 2 – 1,8 кН.

Таким образом, видно, что коэффициент трения зависит от концентрации легирующих элементов в покрытии.

Анализ поверхности трения методом РФЭС показывает, что энергетическое положение рентгеноэлектронных линий Al 2p на поверхности изменяется в пределах 72,4 эВ (металл алюминий) до 75,0 эВ (окись алюминия). Существование окиси алюминия подтверждается присутствием в спектре 01s компонента с энергией связи $E_{св} = 531,7$ эВ, соответствующей этому соединению. Для подтверждения этого результата, методом вторичной масс-спектрометрии (прибор МС 720 М) изучался химический состав поверхности дорожек трения, а также распределения элементов по глубине. Полученные результаты свидетельствуют об изменении интенсивности пиков алюминия, интенсивность их по глубине увеличивается к поверхности трения. Помимо пиков основных материалов, на поверхности трения в спектре имеются пики, соответствующие кластерным ионам, состоящим из алюминия и соответствующих примесей (кислород, углерод, азот) в различных сочетаниях. Этот результат свидетельствует, что в зоне фрикционного контакта происходит сегрегация алюминия к поверхности взаимодействия со средой и образование вторичных структур на поверхности трения.

В табл. 2 приведены значения коэффициента трения $F_{тр}$, усредненного для каждого покрытия по всем нагрузкам, средний весовой износ покрытия V_n за время испытаний, максимальная глубина канавки износа h , а также наибольшая удельная нагрузка в зоне трения.

Сравнение приведенных результатов показывает, что наибольшей износостойкостью обладают композиционные покрытия. Эти покрытия характеризуются и наименьшим измеряемым

значением износа. За время испытаний они изнашиваются на глубину 0,7 – 0,9 мкм. Композиционные покрытия характеризуются, кроме того, и наибольшей стабильностью коэффициента трения. Таким образом, по совокупности свойств покрытия являются наиболее интересными и перспективными для промышленного применения.

Таблица 2

Результаты изучения трения и износа композиционных покрытий (масло М14 В2, $V = 1,3$ м/сек., пара трения “покрытие – гильзовый чугун”, время испытаний 1 час).

Покрытие	Хром (гальв.)	TiN	Ti-Al-N	Ti-Cu-N	Mo-Al-N
Толщина, мкм	10	10	10	10	10
$F_{ср, тр.}$	0,10	0,11	0,05	0,064	0,067
h , мкм	2,5	1,8	0,7	0,9	0,8
V_n , г	0,019	0,008	0,003	0,003	0,004
Наибольшая удельная нагрузка в зоне трения, МПа	18100	25000	30760	28570	26700

С целью выяснения возможности применения покрытий Ti-Al-N, Ti-Cu-N были проведены сравнительные стендовые испытания. Покрытия наносились на компрессионные и маслоъемные поршневые кольца двигателя 2Д70. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

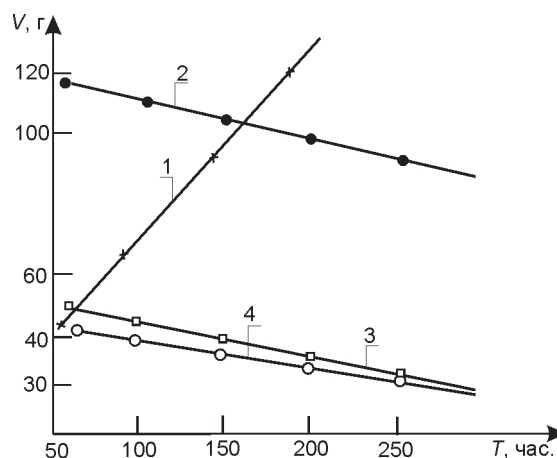


Рис. 2. Интенсивность изнашивания гильз двигателя 2Д70: 1 – Cr (гальван.); 2 – TiN (толщина 12 мкм); 3 – Ti-Al-N; 4 – Ti-Cu-N.

Результаты испытаний свидетельствуют, что наименьшей изнашивающей способностью обладают композиционные покрытия. Эти покрытия за счет гидрофильности содержат запас масла, необходимый при прохождении зоны трения,

выдерживают давления до схватываемости в несколько раз выше, чем гальванический хром при граничном трении, а также обладают высокой смачиваемостью, краевой угол смачиваемости поверхности покрытия Ti-Al-N маслом в 1,7 раза меньше угла смачиваемости гальванического покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований поверхности трения современными физико-химическими методами свидетельствуют о взаимосвязи изнашивания и коэффициента трения с процессами, протекающими на поверхности материалов при трении.

Показано, что концентрация алюминия в покрытии Ti-Al-N оказывает существенное влияние на коэффициент трения. Наименьшее значение коэффициента трения реализуется с концентраций алюминия в покрытии 10 – 15 %. Использование композиционных покрытий в паре с бронзой Бр0,12 приводит к снижению коэффициента трения, кроме того обеспечивает низкую изнашивающую способность покрытия.

Доказано, что в процессе трения на поверхности контакта происходит образование вторичных структур, которые в значительной степени влияют на процесс трения и изнашивания.

Проведены стендовые испытания композиционных покрытий, нанесенных на компрессионные и маслоъемные кольца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толоч В.Т., Падалка В.Г. Разработка и внедрение новых методов плазменной технологии высоких энергий // Вестник АН УССР. – 1979. – № 4. – С. 40-49
2. Любченко А.П., Мацевитый В.М., Бакакин Г.Н., и др. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении на металлических материалах // Трение и износ. – 1981. – № 6. – С. 29-31.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ, ОДЕРЖАНИХ ВАКУУМНО-ДУГОВИМ МЕТОДОМ

В.М. Береснев, А.І. Федоренко,
В.І. Гриценко, Д.Л. Перлов

Наведені результати досліджень триботехнічних характеристик композиційних покриттів Ti-Al-N, Ti-Cu-N, Mo-Al-N. Показано, що наявність легуючих елементів у покритті істотно впливає на зносостійкість та коефіцієнт тертя.

3. Мацевитый В.М., Борушко М.С., Береснев В.М. и др. Структура и механические свойства вакуумно-плазменных покрытий TiCN// Известия вузов “Черная металлургия”. – 1984. – № 3. – С. 83-86.
4. Полянин Б.И., Мацевитый В.М., Береснев В.М. и др. Вакуумно-плазменная конденсация бронзы// Авиационная промышленность. – 1985. – № 5. – С. 60-62.
5. Береснев В.М., Гриценко В.И., Толоч В.Т. и др. Получение многокомпонентных покрытий методом КИБ// Труды семинара “Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике”. М.: – 1989. – С. 143-144.
6. Поверхностная прочность материалов при трении/ Под редакцией Костецкого Б.И. – К.: Техника, 1976. – 292 с.
7. Береснев В.М., Перлов Д.А., Федоренко А.И. Экологически безопасные вакуумно-плазменные оборудования и технологии нанесения покрытий – Харьков: ХИСПИ, 2003. – 292 с.
8. Мацевитый В.М., Казак И.Б., Спольник А.И. и др. Некоторые аспекты адгезионного взаимодействия твердых тел//Доп. НАНУ. – 2003. – № 9. – С. 99-105.
9. Мрочек Ж.А., Эйзнер Б.А., Марков В.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. – Минск: Наука і техника, 1991. – 95 с.
10. Beresnev V.M. Ion-plasma multicomponent films layers//International Conf. Modification of Properties of Surface Layers of Non-semiconducting Materials Using Particle Beams MSPL – Sumy (Ukraine). – 1993. – P. 43.
11. Beresnev V.M., Geluh O.N., Kovalenko I.A., Fedorenko A.I. The Study of Friction and Wear of Ion-Plasma Coverings//Physics in Ukraine-93, Intern. Conf. Plasma Physics. – Kiev (Ukraine). – 1993. – P. 90.
12. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. – М.: Машиностроение, 1986. – 359 с.

RESEARCH OF FRICTION PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS OBTAINED BY A VACUUM-ARC METHOD

V.M. Beresnev, A.I. Fedorenko,
V.I. Gritsenko, D.L. Perlov

The results of researches of the tribotechnical characteristics of composite coatings Ti-Al-N, Ti-Cu-N, Mo-Al-N are shown. Substantial influence of doping elements in coating on wear resistance and friction coefficient is demonstrated.