

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ  
НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ  
ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Доктора техн. наук ИВАЩЕНКО С. А., ИВАНОВ И. А.,  
аспиранты СУЛТАН С. А., КАРМАЖИ Х. Т.*

*Белорусский национальный технический университет*

Для покрытий, осаждаемых в вакууме, характерно образование столбчатой структуры при относительно низкой температуре поверхности конденсации [1]. В соответствии с зонной теорией Мовчана – Демчишина – Торнтонна управление структурой покрытий (следовательно, их свойствами) возможно только за счет варьирования температуры поверхности основы и давления газа. Однако, как показали результаты исследований, конденсация вакуумных покрытий в условиях ионной бомбардировки вносит некоторые изменения в процесс формирования их структуры [2]. Наблюдаемые структурные изменения должны вести, в свою очередь, к изменению физико-механических свойств покрытий (например, к изменению величины коэффициента трения). Однако вопрос о влиянии структуры вакуумно-плазменных покрытий на их свойства изучен слабо.

Цель работы – изучение особенностей формирования структуры вакуумных электродуговых покрытий типа металл – кремний – азот (где металл – титан или цирконий) и установление связи между величиной коэффициента трения и структурой осаждаемых покрытий.

Для получения покрытий типа металл – кремний – азот использовали установки вакуумного нанесения покрытий УВНИПА-1-001 моделей 3.279.079 и 3.279.048. В качестве материала расходоуемых катодов выбраны сплавы металл – кремний (где металл – титан или цирконий). Шероховатость поверхности формируемых покрытий (параметр  $R_a$ ) измеряли на

профилометре модели 296. Структуру покрытий исследовали на их поперечных шлифах и изломах. Коэффициент трения измеряли по схеме «палец – диск» в условиях трения без смазочного материала. В качестве контртела использовали незакаленную конструкционную сталь 45 твердостью НВ 188 и сталь 40Х твердостью HRC 50, а в качестве индентора, на который наносили покрытие, – термообработанную инструментальную сталь Р6М5.

Как известно, вакуумные электродуговые покрытия формируются в условиях совместного осаждения ионного потока и капель. Наличие капель в потоке является одной из причин возникновения дефектов в покрытии и способствует росту шероховатости обрабатываемой поверхности [3]. Исследования показывают, что покрытия, получаемые осаждением металл-кремниевой плазмы, ухудшают качество поверхности упрочняемых деталей. Так, при исходной шероховатости поверхности основы  $R_a = 0,212$  мкм шероховатость поверхности покрытия составляет 0,8 мкм [1]. Такая же закономерность наблюдается при осаждении покрытий в среде технологического газа. Рост давления как азота, так и аргона способствует ухудшению качества поверхности формируемых покрытий (рис. 1).

При низких значениях отрицательного ускоряющего потенциала ( $U_{\text{осн}} = 0-100$  В) и давления азота осаждаемые покрытия являются многофазными и не имеют каких-либо структурных особенностей. Соединения с участием атомов азота в покрытиях отсутствуют [1].

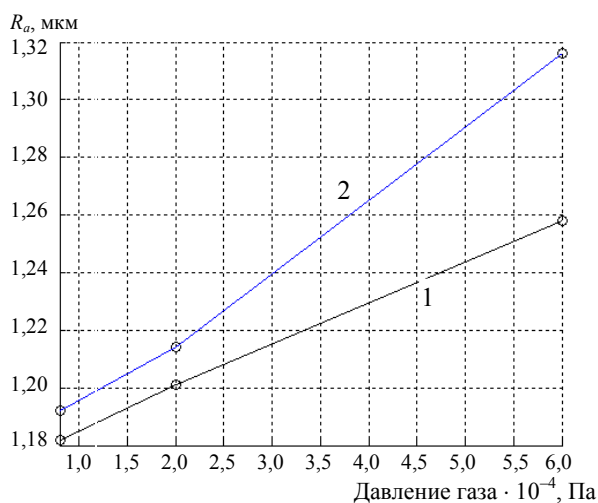


Рис. 1. Влияние давления технологического газа на шероховатость поверхности осаждаемых покрытий: 1 – в аргоне,  $U_{очн} = -150$  В; 2 – в азоте,  $U_{очн} = -50$  В

С ростом давления азота покрытия приобретают характерную столбчатую структуру (рис. 2а). При этом какие-либо существенные изменения в фазовом составе покрытий не наблюдаются.

Несмотря на отсутствие на рентгенограммах покрытий металл – кремний – азот осаждаемых при низких значениях ускоряющего потенциала линий, соответствующих нитридам металла или кремния, увеличение давления технологического газа ведет к росту его содержания в покрытии [4].

Как показывают результаты исследований, проведенных на покрытиях TiN [5], в этом случае адсорбированный, но не участвующий в образовании химических соединений азот будет концентрироваться по границам растущих кристаллов. Концентрация азота на фронте кристаллизации изменяет силы поверхностного натяжения и, следовательно, термодинамические условия взаимодействия плазменного потока с поверхностью растущего покрытия [6]. Следствием этого изменения является образование в покрытии прослоек, обогащенных азотом. Для покрытий титан – кремний – азот формирование таких структур наблюдается при  $U_{очн} = -(150-250)$  В (рис. 2б).

Измерение коэффициента трения скольжения покрытий  $\mu$  показало следующее: при трении имеет место окислительное изнашивание, о чем свидетельствует наличие черной полосы окислов на поверхности трения или по ее краям. Кроме этого, изнашивание сопровождается значительными колебаниями коэффициента трения (рис. 3).

При взаимодействии индентора из инструментальной стали без покрытия с вязким материалом (сталь 45) поверхность трения представляет собой широкую полосу, содержащую продукты износа темного цвета. Процесс трения характеризуется высокой скоростью изнашивания и сопровождается схватыванием индентора и диска.

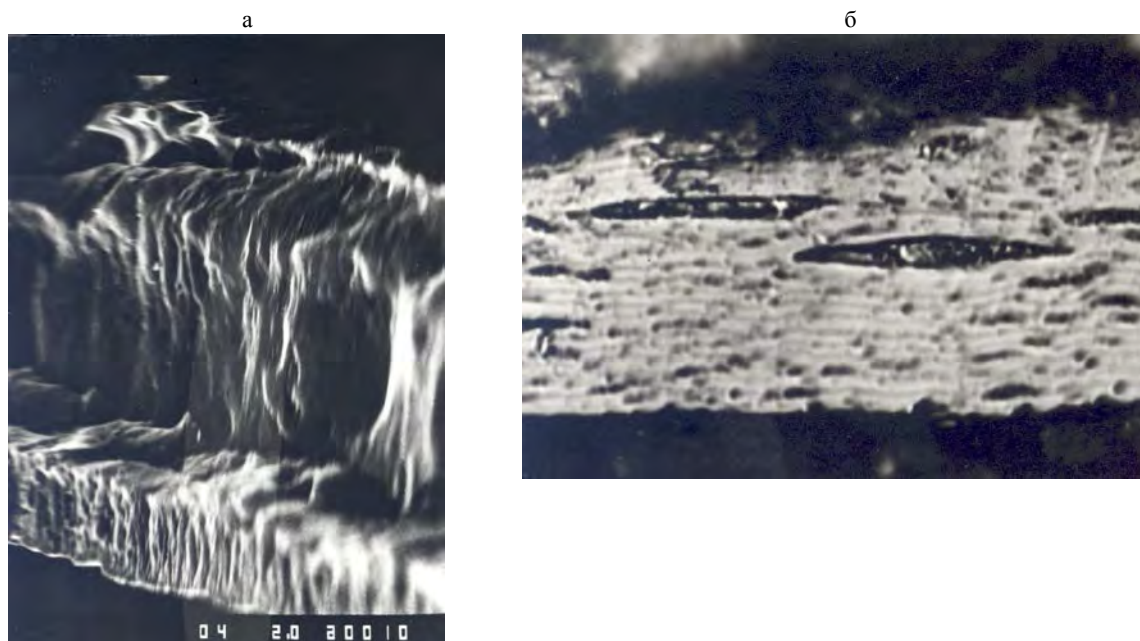


Рис. 2. Структура покрытий TiSiN: а –  $U_{очн} = 0-100$  В; б –  $-(150-250)$  В

Трение индентора по закаленной стали 40X не сопровождается схватыванием. Поверхность трения узкая, черного цвета. Величина  $\mu$  плавно растет с течением времени. Среднее значение коэффициента трения за время измерения составляет 0,35 для стали 45 и 0,25 – для стали 40X.

Нанесение покрытия TiN не изменяет интенсивность изнашивания. Коэффициент трения растет с течением времени более значительно (рис. 3а). Поверхность трения имеет самую большую ширину. Цвет поверхности коричневый, по краям – черный. Через 600 с испытания  $\mu = 0,65$  при трении по стали 45 и  $\mu = 0,5$  – при трении по стали 40X.

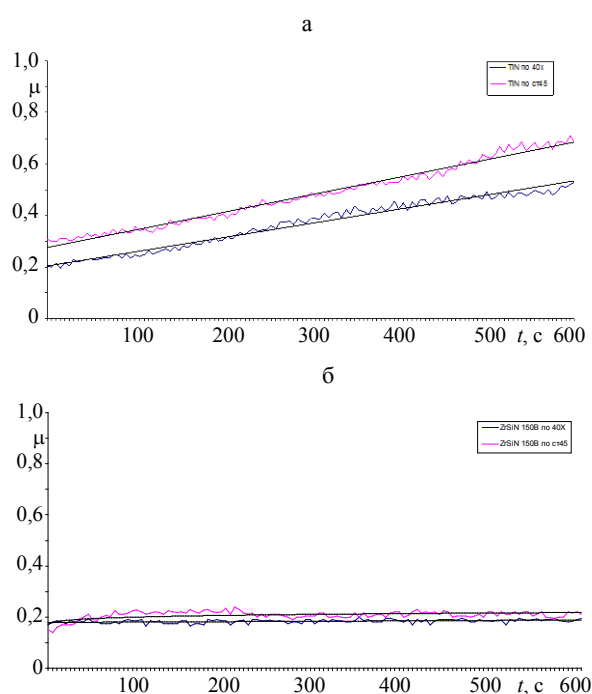


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения инструментальной стали по стали 45 и 40X от времени испытания: а – покрытие TiN; б – покрытие ZrSiN ( $U_{\text{очн}} = -150$  В)

Покрyтия TiSiN и ZrSiN, осаждаемые при  $U_{\text{очн}} = -70$  В и имеющие конусообразную зернистую структуру, не обеспечивают постоянную величину коэффициента трения в течение времени испытания. Коэффициент трения данных покрытий выше, чем при трении индентора без покрытия. Поверхность трения с покрытием ZrSiN ( $U_{\text{очн}} = -70$  В) по стали 45 узкая черного цвета, через 300 с от начала измерения происходит схватывание с материалом диска. При трении по закаленной стали 40X поверхность

имеет коричневый цвет, схватывание происходит через 420 с.

Покрyтия ZrSiN, имеющие послойную структуру, дают наилучшие показатели по измеряемой величине (рис. 3б). Величина коэффициента трения индентора с покрытием ZrSiN ( $U_{\text{очн}} = -150$  В) не меняется в течение времени проведения испытаний и равна 0,22 при трении по незакаленной стали 45 и 0,2 – по закаленной стали 40X. Поверхность трения узкая и имеет черный цвет. При взаимодействии индентора с покрытием TiSiN ( $U_{\text{очн}} = -150$  В) с незакаленной сталью 45 коэффициент трения увеличивается. Через 30 с после начала испытаний наблюдается схватывание индентора с материалом вращающегося диска. Поверхность трения узкая, серого цвета. При трении покрытия TiSiN ( $U_{\text{очн}} = -150$  В) по закаленной стали 40X коэффициент трения не изменяется ( $\mu = 0,25$ ). Поверхность трения серого цвета самая узкая по ширине.

## ВЫВОДЫ

1. При относительно низких значениях ускоряющего потенциала ( $U_{\text{очн}} = 0-100$  В) формирование покрытий металл – кремний – азот происходит в условиях отсутствия химических реакций образования нитридов. Азот накапливается по границам растущих зерен покрытия. Увеличение  $U_{\text{очн}}$  до  $-(150-250)$  В ведет к росту концентрации азота на фронте кристаллизации, что изменяет термодинамические условия роста зерен покрытия и способствует выделению обогащенного азотом слоя в виде прослоек. Повышение давления технологического газа (азота или аргона) способствует увеличению шероховатости поверхности осаждаемых покрытий.

2. Наибольший эффект от покрытий получен при использовании закаленного контртела из стали 40X. При применении в качестве контртела (диска) более вязкого материала (из незакаленной стали 45) наблюдается рост коэффициента трения. Наименьшей и наиболее стабильной величиной коэффициент трения (0,22 – при трении по незакаленной стали 45 и 0,2 – по закаленной стали 40X) обладает инструментальное покрытие ZrSiN, осаждаемое при  $U_{\text{очн}} = -150$  В и имеющее послойную структуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Плазменно-вакуумные** покрытия / под общ. ред. Ж. А. Мрочка. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 369 с.
2. **Microstructural** evolution during film growth / I. Petrov [et al.] // *Vac. Sci. Technol. A.* – 2003. – А 21 (5). – S. 117–126.
3. Султан, С. А. И. Технологические основы нанесения защитных покрытий в вакууме / С. А. И. Султан, И. А. Иванов // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – С. 302–304.
4. Мрочек, Ж. А. Основы технологии формирования многокомпонентных покрытий в вакууме / Ж. А. Мрочек,

Б. А. Эйзнер, Г. В. Марков. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 96 с.

5. Poitevin, J. M. Influence of substrate bias on the composition, structure and electrical properties of reactively D.C.-sputtered TiN films / J. M. Poitevin, G. Lemperiere, J. Tardy // *Thin Solid Films.* – 1982. – Vol. 97. – P. 69–77.

6. Кармажи, Х. Т. Е. Формирование структуры вакуумных электродуговых покрытий / Х. Т. Е. Кармажи, И. А. Иванов // Машиностроение и техносфера XXI века. – Донецк: ДонНТУ. – 2004. – С. 50–54.

Поступила 24.04.2006

УДК 621.867.2

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

*Лауреат Государственной премии Республики Беларусь,  
докт. техн. наук, проф. ПРУШАК В. Я.,  
канд. техн. наук МИРАНОВИЧ О. Л.*

*ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством»,  
Международный гуманитарно-экономический институт*

Ленточные конвейерные машины в настоящее время – наиболее эффективный и высокопроизводительный вид конвейерного транспорта для комплексной механизации и автоматизации добычи руд, угля и нерудных ископаемых. Создание и внедрение названных машин позволяет использовать поточную и циклично-поточную технологии, обеспечивающие возможность повышения пропускной способности, производительности труда, комплексной механизации и полной автоматизации транспортных процессов, снижения себестоимости получаемой продукции, а также обеспечивающие улучшение условий и повышение безопасности труда в соответствии с техническими и экономическими параметрами горных машин. Эффективность использования ленточных конвейеров зависит от показателей надежности последних, т. е. от совершенствования барабана, ленты, роликовых опор, роликов и т. д.

Конструкции элементов ленточных конвейеров (роликовые опоры, ролики и лента) определяются условиями работы конвейерной машины и зависят от физических свойств и гранулометрического состава транспортируемого груза. При перемещении тяжелых сыпучих грузов, состоящих из крупных кусковых частиц, применяются ленты со значительным количеством прокладок и большей толщиной рабочей обкладки, используются ролики с большим наружным диаметром и диаметром оси и т. д. Однако проблему обеспечения долговечности этих элементов нельзя считать полностью решенной, так как на практике они часто преждевременно выходят из строя. Известны случаи, когда срок службы роликов конвейеров, транспортирующих крупнокусковую скальную породу, не превышал 40–50 ч [1]. Низкую долговечность роликов можно объяснить использованием роликовых опор, не приспособленных для этих случаев, а также недостаточным ана-