

Разработка пакета «ПроТерм» может открыть новые возможности для проектирования деталей сложной конфигурации, подвергающихся тепловым нагрузкам, что позволит уменьшить время проектирования прессформ и оптимизировать режимы термической обработки.

**Литература.** 1. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Яцкевич Ю.В. Компьютерная система «ПроТерм»: применение для управления процессом термической обработки деталей//ТЭО. –2002. -№1.-С.22-23 2. Чичко А.Н., Дроздов Е.А. Компьютерное моделирование термоупругости сплавов, кристаллизующихся в трехмерных пространственных структурах. // Доклады НАН Беларуси. –2002. -Т.46. -№1. -С.132-136 3. Чичко А.Н., Дроздов Е.А., Чичко О.И. Моделирование эволюций напряжений и деформаций для алюминиевого сплава, охлаждающегося в трехмерной пространственной структуре. //Литье и металлургия. –2002. -№1. -С.21-26

УДК 669.056.9:629.118.6

**В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич, Г.В. Макаревич**

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОКСИДОКЕРАМИКИ**

*Институт надежности машин НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

Как показали проведенные в ИНДМАШ НАН Беларуси исследования покрытия на основе оксидокерамики обладают высокой твердостью и износостойкостью. Как правило, их применение в деталях машин и механизмов позволяет на 50-70% облегчить конструкцию при значительном повышении работоспособности и надежности узлов трения, за счет высокой твердости покрытий, достигающей 22ГПа. При соответствующем поверхностном модифицировании их использование позволяет работать в условиях сухого и граничного трения. При этом, вследствие высокой твердости, попадание абразива между контактирующими поверхностями не вызывает интенсивного изнашивания и потери работоспособности узла. Вместе с тем, оксидокерамика - хрупкий фрикционный материал [1]. Поэтому для его применения, как правило, необходимы специальные технические решения [2]. Для их реализации в ИНДМАШ НАН Беларуси был проведен комплекс работ по созданию, исследованию и апробированию на практике технологий формирования многослойных композиционных металлокерамических систем типа «сплав алюминия – оксидокерамика – карбид хрома».

Целью исследований было создание покрытий для деталей, работающих в условиях многоциклового нагружения на изгиб, рабочие поверхности которых взаимодействуют с ответными поверхностями в условиях трения скольжения, например, зубчатых передачах.

Для формирования оксидокерамических покрытий методом анодно-катодной микродуговой обработки использовалось специально разработанное ИНДМАШ НАН Беларуси оборудование терристорного типа, позволяющее управлять режимами обработки в широком диапазоне регулирования токов, напряжений и амплитудно-частотных параметров микродуговой обработки. Микродуговое оксидирование осуществлялось при напряжении 420-450В, плотности тока 25-50 А/дм<sup>2</sup> в модифицированном электролите, основными компонентами которого являлись растворенные в дистиллиро-

ванной воде жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  с модулем 3-3,4, плотностью 1,4-1,5 г/см<sup>3</sup> (ГОСТ 13078-81) – 4-6 г/л и гидроксид калия КОН марки “ч” (ГОСТ 9285-78) - 3 г/л.

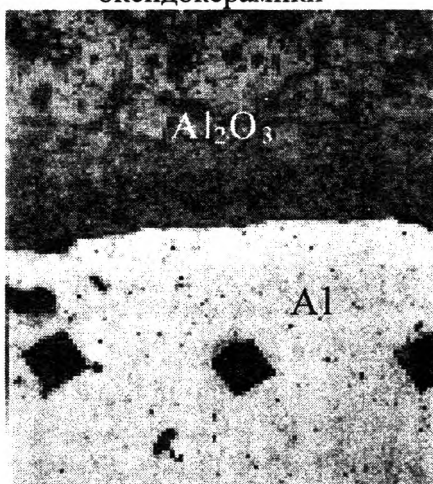
Осаждение парообразного карбида хрома на поверхность оксидокерамики осуществлялось совместно со специалистами Института радиационных физико-химических проблем НАН Беларуси. Режимы процесса были подобраны таким образом, чтобы его реализация обеспечила проникновение паров карбида хрома в трещины и поры поверхностного слоя оксидокерамики, обеспечивая высокую прочность сцепления слоев и прочностные свойства покрытия в целом. Твердость покрытия из пиролитического хрома на оксидокерамической подложке составляла 10-16 ГПа.

Слой пиролитического карбида хрома толщиной до 10-12 мкм формировался в вакуумной камере пиролизом хроморганической жидкости “Бархос” при давлении паров в камере 7-9 Па. В процессе его осаждения температура подложки поддерживалась на уровне 420-430°C. Перед формированием покрытия на оксидокерамике ее поверхность предварительно обрабатывалась.

Структура оксидокерамической поверхности после ее формирования и с осажденным слоем карбида хрома показана на рис. 1.

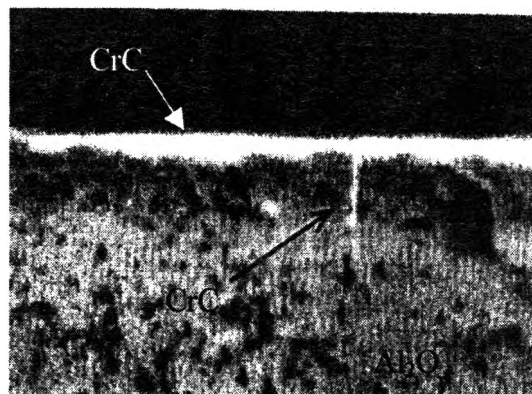
По результатам предварительно проведенных исследований было установлено, что в деталях приводов зацеплением целесообразны толщины слоев из карбида хрома 8-15 мкм при толщине подложки из металлокерамики 120-180 мкм. Как показал анализ их результатов, чрезмерная толщина покрытия из карбида хрома на слое оксидокерамики ведет к росту внутренних напряжений, приводящих к отслаиванию слоя карбида хрома и разрушению оксидокерамической подложки. Кроме того, это приводит к образованию внутренних дефектов при многоцикловом нагружении с созданием значительных изгибных напряжений.

Поверхностный слой оксидокерамики



а

Наружный слой карбида хрома, сформированный с заполнением поверхностных пор и трещин



б

Рис. 1

Изучение микроструктуры сформированных многослойных покрытий показало, что они имеют неоднородное по глубине строение и состав. В покрытии достаточно четко выделяется зона перехода от сплава алюминия основы до слоя оксидокерамики, наиболее твердый компактный слой оксидокерамики и ее более мягкий и рыхлый поверхностный слой. В композите виден переходной, «армированный» карбидом хрома слой, создающий, как показали результаты проведенных исследований, значительные остаточные сжимающие напряжения. Область оксидокерамики с наивысшей твердостью 14...16 ГПа, косвенно свидетельствует о наличии в ней твердофазных растворов

компонентов алюминиевого сплава с окислами  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Поверхностный слой оксидокерамики имел твердость 10,5-12 ГПа.

Исследования триботехнических и прочностных характеристик образцов с многослойными покрытиями проводились на стандартизованном оборудовании с использованием соответствующих методик.

Материал, из которого было изготовлено контртело, в общих случаях был сталь 45 твердостью 45...50 HRC. Его шероховатость составляла  $R_a = 0,63 \dots 0,32$ .

Испытания проводились при комнатной температуре. Определение моментов (коэффициентов трения) при разных нагрузках проводилось методом ступенчатых нагрузжений (через 50 Н).

Износ образцов определялся методом искусственных баз, для чего перед испытаниями на покрытие наносили отпечатки алмазной пирамидой (на твердомере Виккерса) и измеряли диаметр отпечатков до и после испытаний.

На первом этапе триботехнических испытаний оценивалась износостойкость оксидированных напыленных покрытий в условиях сухого трения скольжения при нормально приложенной нагрузке на образцы величиной в 10 Н и скорости скольжения 0,2 м/с.

Результаты проведенных исследований<sup>1</sup> приведены в таблице 1.

Табл. 1

Состав поверхностного слоя	Режим трения			
	сухое	граничное	со смазкой	смазка+УДА
	Коэффициенты трения			
Оксидокерамика	0,5-1,4	0,2-0,4	0,08-0,16	0,008-0,01
Оксидокерамика + карбид хрома	0,3-0,8	0,15-0,3	0,05-0,12	0,004-0,008
Оксидокерамика + смазка с УДА	0,1-0,2	0,05-0,1	0,008-0,01	0,002-0,006
Оксидокерамика+дисульфид молибдена	0,05-0,08	0,05-0,1	0,008-0,01	0,003-0,008

Их анализ показывает, управление триботехническими свойствами сопряжений с многослойными композиционными покрытиями в основном достигается путем изменения характера взаимодействия трущихся поверхностей (обеспечения режимов сухого, граничного или жидкостного трения скольжения), а также реализации достаточно известного в настоящее время подхода - применения смазочных материалов со специальными антифрикционными присадками.

Исследования прочностных характеристик показали следующее.

Наличие оксидокерамики с трещинами и порами на поверхностном слое обусловило снижение долговечности образцов при многоцикловом изгибном нагружении с созданием растягивающих напряжений в 1,4-1,8 раза по сравнению с долговечностью аналогичных образцов из материала основы без покрытий, испытываемых в идентичных условиях нагружения.

Относительно тонкий поверхностный слой пиролитического карбида хрома незначительно повышает прочность композиционной системы при воздействии статической локализованной нагрузки. Однако, благодаря создаваемым им внутренним сжимающим остаточным напряжениям существенно улучшаются прочностные характеристики при циклическом нагружении с созданием симметричных растягивающе-сжимающих напряжений. Долговечность образцов с многослойными покрытиями «сплав

<sup>1</sup> В таблице приведены обобщенные результаты независимых исследований, проведенных в ИНДМАШ НАН Беларуси авторами статьи, а также к.ф.-м.н Комаровой В.И., к.ф.-м.н. Кукареко В.А., к.т.н. Жорником В.И., к.т.н. Леванцевичем М.А., инженерами Комаровым А.И., Калиновским Д.А., Кирейцевым М. В., Максимченко Н.Н. и др.

алюминия – оксидокерамика – карбид хрома» в 1,7-3 раза превышала долговечность 2,3 имели аналогичных образцов из материала основы, выполненных без покрытий.

В целом проведенные в ИНДМАШ НАН Беларуси исследования в области создания и использования многослойных композиционных покрытий на основе металло-керамических систем на деталях, работающих в условиях многоциклового нагружения с созданием растягивающе-сжимающих изгибных напряжений и интенсивного изнашивания, показали перспективность использования разработанных подходов для значительного повышения ресурса их работоспособности и улучшения служебных характеристик узлов и изделий в целом.

**Литература.** 1. Мардосевич Е.И. Создание и использование металлокерамических покрытий на деталях приводов зацеплением.// Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. – 736с. 2. Басинюк В.Л., Белоцерковский М.А., Г.В.Макаревич. Новые композиционные материалы и покрытия для трущихся сопряжений вибромашин.//Периодический сборник научных трудов «Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, материалы, оборудование». Выпуск №10.- Одесса: НПО «ВОТУМ», 2000.- с.43-46.

УДК 624.793:621.797

М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус, В.Л. Басинюк

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ И ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ

*Институт надёжности машин НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

### **Введение**

Для снижения материалоемкости, веса конструкций и уменьшения шума при работе исполнительных механизмов в промышленности широко используют полимерные материалы, обладающие малой удельной массой и высокой способностью гасить виброакустические колебания [1,2]. Однако, низкие механические свойства не позволяют их широко применять при изготовлении опор скольжения и виброизолирующих элементов. Очевидно, что наиболее эффективным путем повышения механических свойств поверхности лобного материала является формирование на ней покрытий с требуемым уровнем служебных характеристик.

Среди методов нанесения защитных покрытий в последнее время широкое распространение получили газотермические [1]. Их основные достоинства: нанесения различных материалов (полимеров, металлов, сплавов, керамики) и их сочетаний на поверхности различной формы и размеров, а также получение покрытий с заданными функциональными эксплуатационными характеристиками.

### **Состояние вопроса**

В настоящее время параллельно с технологией нанесения покрытий развивается технология создания композиционных материалов, формируемых из дисперсных полимеров [2]. В частности, ряд процессов получения слоистых композиций, например, металлополимерных систем, основывается на технических приемах, используемых в технологии покрытий. Наиболее экономичным и эффективным путем решения проблем,