

В.М.Юров, В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru)

Трибологические свойства ионно-плазменных композиционных покрытий

Измерены коэффициенты трения скольжения покрытий, полученных ионно-плазменным методом. В первом случае при осаждении покрытий использовались многофазные катоды. Во втором случае осуществлялась генерация многокомпонентных плазменных потоков при одновременном распылении многофазных и титановых катодов. Нанесение покрытий осуществлялось в атмосфере аргона и азота. Во всех случаях величина коэффициента сухого трения лежит в пределах 0,1–0,3. Это значительно меньше коэффициентов сухого трения одноименных пар большинства металлов. Учитывая, что исследованные покрытия обладают значительной твердостью и износостойкостью, можно рекомендовать их в качестве пар трения в вакуумных устройствах.

Ключевые слова: сухое трение, композиты, покрытия, микротвердость, коэффициенты трения, ток дуги, давление, температура.

Введение

Интенсивное развитие приборостроения в космонавтике, ракетной технике и ряде других областей выдвигают задачу обеспечения надёжной работы подвижных узлов исполнительных механизмов приборов в экстремальных условиях (вакуум, высокая температура, интенсивное излучение, высокие контактные нагрузки и т.д.).

Проблема повышения надёжности исполнительных механизмов приборов в таких условиях тесно связана с вопросами триботехники, с исследованиями контактного взаимодействия взаимно перемещающихся твёрдых тел, в результате которого в зоне контакта возникают силы трения.

По данным исследований, проведенных КБ «Салют», ГКНПЦ им. М.В.Хруничева, ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов», Институтом металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, фирмой Glacier (Англия) и др., более высокие антифрикционные свойства покрытий поверхностей космических элементов достигаются при использовании ионно-плазменного метода нанесения покрытий.

Антифрикционные характеристики узлов трения определяются свойствами поверхностного слоя деталей. Поэтому экономически и технически оправданным является подход к выбору материала катодов, при котором их механическая прочность определяется свойствами конструкционного материала, а специальные свойства поверхности обеспечиваются формированием на ней тонких слоёв покрытий толщиной, близкой к величине максимально допустимого износа. Нанесение износостойких антифрикционных многослойных покрытий не только увеличивает надёжность и долговечность узлов, но и снижает затраты на дефицитные и дорогостоящие материалы, уменьшает расходы на обслуживание и ремонт оборудования.

Использование обычных смазок в узлах трения, работающих в условиях космического вакуума, неприемлемо. Вследствие высокой упругости паров большинство жидкостей и смазок в вакууме испаряется и теряет свои смазывающие свойства. Действие температуры еще более усугубляет этот процесс. Работу узлов трения без смазки в вакууме следует рассматривать как взаимодействие поверхностей при сухом трении. В этом случае, в отличие от узлов жидкостного трения, контактирующие поверхности не разделены искусственно созданной масляной пленкой, частично или полностью устраняющей контакт между ними. Однако нельзя считать, что не смазанные маслом поверхности вступают в непосредственный контакт друг с другом. В реальных условиях поверхность узлов трения может быть покрыта окисной пленкой, которая возникает при их изготовлении, примесью чужеродных металлов, структурными дефектами и т.д. В космосе начинает играть роль модификация поверхности за счет облучения частицами высокой энергии.

Боуден с сотрудниками измерили коэффициенты для чистых металлов. С их поверхности атомы воздуха и окисные пленки были удалены нагреванием в вакууме [1]. Полученные коэффициенты трения колебались от 1 до 5, а для некоторых пар достигали 10 и выше, тогда как в обычных условиях они составляли менее 1.

Это указывает на то, что для уменьшения коэффициента трения в вакууме необходимо модифицировать поверхность узлов трения и, в частности, использовать специальные покрытия, полученные также в условиях вакуума. Процесс модификации поверхности должен заканчиваться образованием на поверхностях трения тонких слоев вторичных структур, предохраняющих материал от схватывания и задигов, а также равновесной шероховатости, необходимой для обеспечения стабильного значения коэффициента трения. В этой области наукой еще не вполне раскрыты механизмы самоорганизации в зоне контакта и пути воздействия на способность пар трения к самоорганизации, когда система сама формирует оптимальную микрогеометрию поверхностей, защитные пленки, перестраивает структуру поверхностных слоев металла, меняет твердость в целях сохранения нормального функционирования [2].

Объекты и методика эксперимента

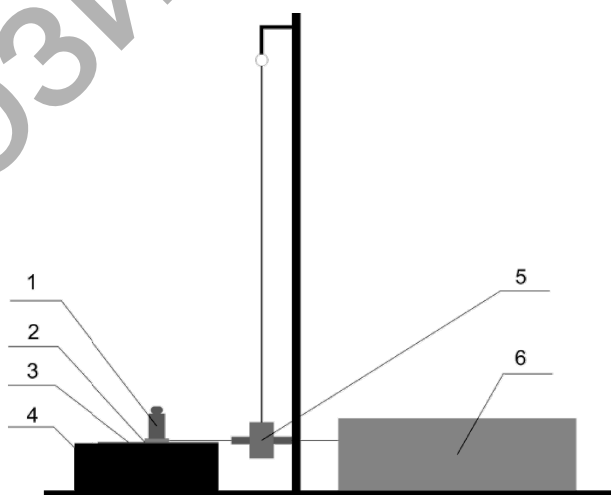
В настоящей работе использовались композиционные катоды Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al, Zn–Cu–Al и Mn–Fe–Cu–Al. С помощью этих катодов наносились покрытия на установке ННВ-6.6И1 на стальную подложку при различных технологических режимах. Количественный анализ элементного состава покрытий проводился на электронном микроскопе JEOL JSM-5910. Исследование микротвердости композиционных покрытий проводилось на микротвердомере ISOSCAN OD. Для исследования поверхности покрытий в наномасштабе нами использовался атомно-силовой микроскоп NT-206. Контроль качества покрытий производился на установке ПККП-1К методом анодно-поляризационного инициирования дефектов (АПИД).

Нами использовалось осаждение многофазных покрытий в условиях ионного ассистирования. Перед нанесением покрытий в вакуумной камере производилась очистка подложек сначала тлеющим разрядом, для этого на подложку подавалось напряжение 1–3 кВ в течение 5–10 мин, затем — ионная очистка.

Информационно-измерительная система для трибологических исследований предложена в [3] и состоит из двух основных компонентов: экспериментальной установки и программного обеспечения верхнего информационного уровня. Экспериментальная установка для определения коэффициентов трения построена по принципу модульности. Общая схема установки для определения коэффициентов трения представлена на рисунке 1.

Блок-схема устройства для определения коэффициентов трения изображена на рисунке 2.

Как видно из блок-схемы, устройство для определения коэффициентов трения состоит из следующих основных модулей: блока питания, датчика усилия и аналого-цифрового преобразователя, двигателя и схемы управления им, датчика тока двигателя, датчика угловой скорости, основного контроллера и интерфейса связи с программным обеспечением верхнего информационного уровня.



1 — известный прижимной вес; 2 — образец; 3 — поверхность скольжения; 4 — измерительный стол; 5 — датчик силы; 6 — блок электроники и привод

Рисунок 1. Общая схема установки для определения коэффициентов трения

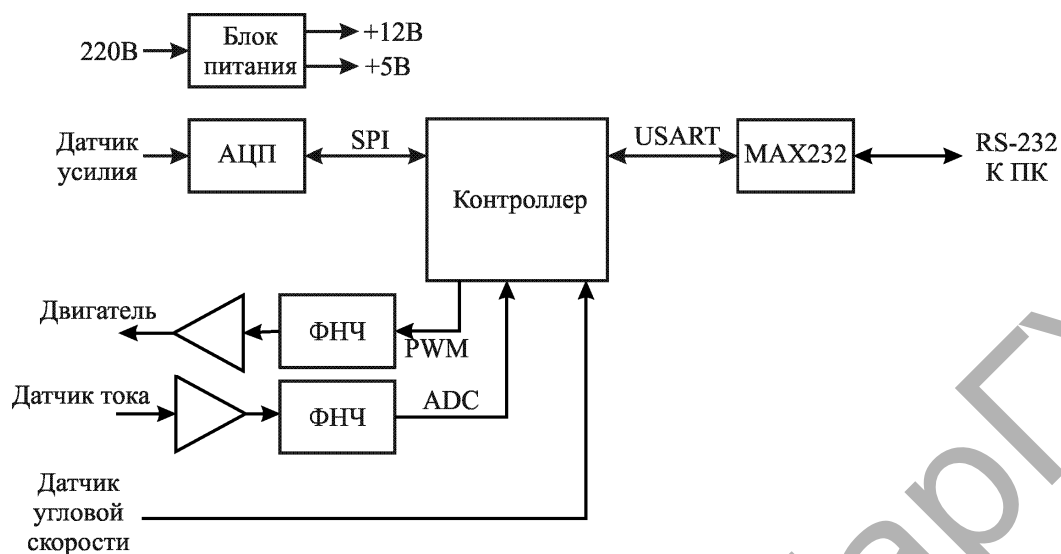


Рисунок 2. Блок-схема установки для определения коэффициентов трения

Основной принцип работы установки для определения коэффициентов трения покоя и скольжения заключается в измерении силы трения покоя и скольжения небольшого исследуемого образца материала, при перемещении его по поверхности подложки из другого материала с известным коэффициентом трения. Полученные мгновенные значения силы трения передаются программному обеспечению верхнего информационного уровня для их обработки.

Измерение производится в два этапа. На первом этапе производится постепенное натяжение нити и соответственно увеличение силы трения. Данный этап продолжается до начала движения образца. После начала движения образца стабилизируется скорость движения и производится измерение силы трения скольжения. Результаты второго этапа измерений усредняются, и рассчитывается коэффициент трения.

По команде оператора программного обеспечения начинается измерение силы трения.

На первом этапе производится измерение силы трения покоя, для чего через двигатель пропускается линейно возрастающий ток. При этом непрерывно производится измерение силы трения.



Рис. 3. Внешний вид графического представления результатов исследования с помощью системы

Когда датчик угловой скорости обнаруживает начало движения исследуемого образца, начинается второй этап, на котором производится измерение силы трения скольжения. Для этого ток через двигатель увеличивается до тех пор, пока не будет достигнута заданная скорость вращения. После этого запускается алгоритм фазовой автоподстройки частоты, в процессе которого происходит синхронизация фазы сигнала фотодатчика и внутреннего образцового генератора, в результате чего час-

тоты этих сигналов становятся точно равными. Это обеспечивает строго равномерное движения исследуемого образца и исключает погрешности измерения, связанные с ускорением или наличием вязкого трения. Результаты измерения выводятся в специализированной графической форме программного обеспечения системы. Выводится усредненное значение силы трения скольжения, среднеквадратическое отклонение, коэффициент трения, сила трения покоя. Внешний вид формы представлен на рисунке 3.

Программное обеспечение позволяет также выполнять такие команды, как перемещение образца, медленное равномерное движение образца, измерение текущей силы на датчике силы, автоматизированное проведение измерения с выводом результатов в графическом виде, а также производить интерпретацию и усреднение измеренных значений и вывод результатов измерений.

Многофазные покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al

Результаты РФЭС-анализа исследованных покрытий приведены в таблице 1, а АСМ-изображение и фрактальная структура — на рисунках 4, 5.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета стехиометрии компонентов

Покрытие	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	Химическая формула по данным анализа
Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al	1	4,32	4,64	5,26	18,39	67,85	$\text{CrMn}_{4,32}\text{Si}_{4,64}\text{Cu}_{5,26}\text{Fe}_{18,39}\text{Al}_{67,85}$

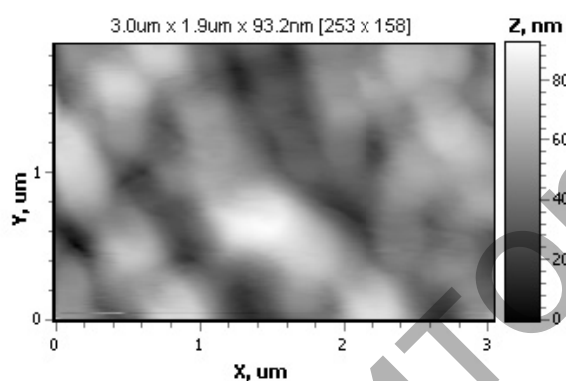


Рисунок 4. АСМ-изображение покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al

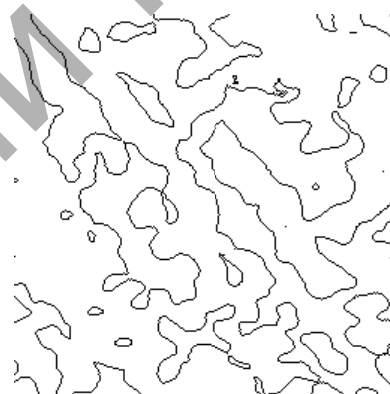


Рисунок 5. Фрактальная структура покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al

Мы исследовали также покрытия, возникающие при одновременном распылении катода Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al и титанового катода в атмосфере аргона и азота. В процессе одновременного распыления различных катодов ионы металлов перемешиваются в плазме и после осаждения формируют покрытие. Такой подход является «вынужденным», поскольку получение многофазных композиционных катодов с заданным числом компонент представляет собой сложную задачу, связанную с получением многокомпонентных сплавов, термодинамические свойства компонент которых могут значительно различаться.

На рисунке 6 показано электронно-микроскопическое изображение покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al + Ti в среде аргона. Отчетливо видны зерна титана с размером от 1 до 10 мкм в диаметре. Материалы с таким размером зерен принято называть крупнокристаллическими [4].

Результаты количественного РФЭС-анализа показали, что содержание Mn, Si, Cu и Al менее 1 масс. %. В среде азота структура покрытия резко изменяется (рис. 7) благодаря образованию нитрида титана. В этом случае средний размер зерен составляет 100–150 нм. Такие покрытия называют субмикрокристаллическими [4].

В таблицах 2 и 3 приведены результаты трибологических исследований указанных выше покрытий.

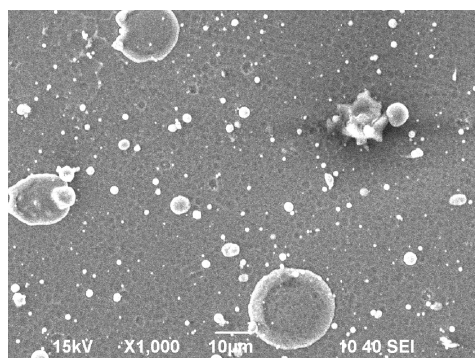


Рисунок 6. Электронно-микроскопическое изображение покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al + Ti в среде аргона

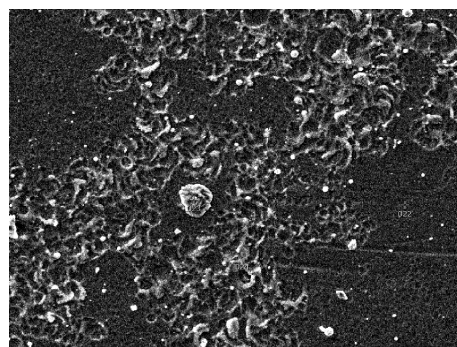


Рисунок 7. Электронно-микроскопическое изображение покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al + Ti в среде азота

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты трения покрытий (Эл. № 2 — Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al) при нагрузке 100 г

Наименование образцов	Коэффициент трения	
	Алюминиевая пластина	Медная пластина
Эл. № 2, обр. 2, (25 мин)	0,153	0,242
Эл. № 2 + Ti в газ. среде аргона, обр. 2, (30 мин)	0,387	0,374
Эл. № 2 + Ti в газ. среде азота, обр. 2, (30 мин)	0,453	0,259
Эл. № 2 + Ti в газ. среде аргона, обр. 1, (15 мин)	0,235	0,236
Эл. № 2 + Ti в газ. среде азота, обр. 1, (15 мин)	0,250	0,265

Т а б л и ц а 3

Коэффициенты трения покрытий (Эл. № 2 — Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al) при нагрузке 50 г

Наименование образцов	Коэффициент трения	
	Алюминиевая пластина	Медная пластина
Эл. № 2, обр. 2, (25 мин)	0,219	0,256
Эл. № 2 + Ti в газ. среде аргона, обр. 2, (30 мин)	0,365	0,426
Эл. № 2 + Ti в газ. среде азота, обр. 2, (30 мин)	0,273	0,269
Эл. № 2 + Ti в газ. среде аргона, обр. 1, (15 мин)	0,265	0,349
Эл. № 2 + Ti в газ. среде азота, обр. 1, (15 мин)	0,268	0,234
Эл. № 2, обр. 1, $I_{и} = 30$ А	0,227	0,215
Эл. № 2, обр. 2, $I_{и} = 50$ А	0,171	0,224
Эл. № 2, обр. 3, $I_{и} = 70$ А	0,173	0,179

Бинарные катоды Fe–Al и Zn–Al

Результаты РФЭС-анализа исследованных покрытий приведены в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

Результаты расчета стехиометрии компонентов

Покрытие	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	Химическая формула по данным анализа
Zn–Al	1	65,45					$ZnAl_{65,45}$
Al–Fe	1	43,04					$AlFe_{43,04}$

На рисунках 8 и 9 показаны АСМ-изображения поверхности покрытий Zn–Al и Al–Fe, полученных в режиме латерально-силовой микроскопии (одновременно с контактной статической АСМ). В таблицах 5 и 6 показаны результаты трибологических измерений.

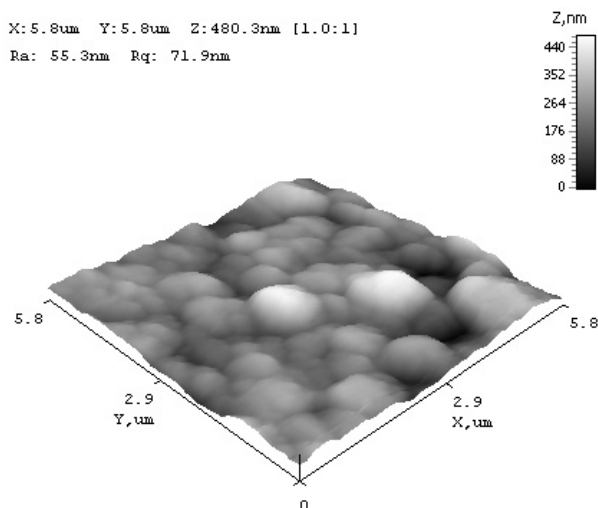


Рисунок 8. АСМ-изображение поверхности покрытия Zn–Al

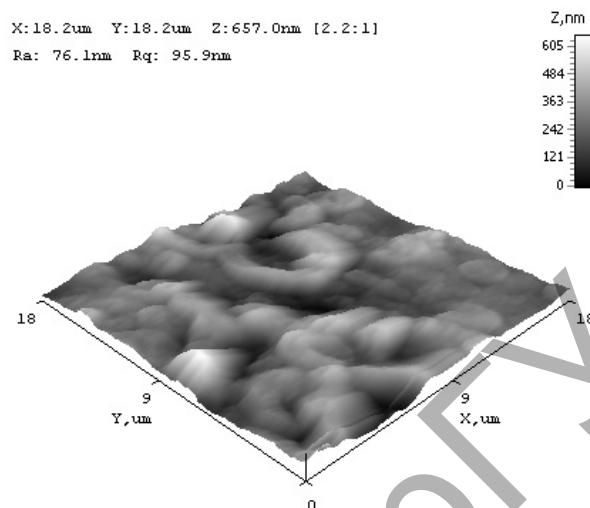


Рисунок 9. АСМ-изображение поверхности покрытия Fe–Al

Из рисунка 8 видно, что покрытие Zn–Al формируется в виде «глобулярной» структуры, имеющей определенное упорядочивание. Структура покрытия Fe–Al (рис. 9) резко отличается от структуры покрытия Zn–Al. В этом случае мы наблюдаем незамкнутые наноструктуры. Подобные наноструктуры были обнаружены и описаны в работе [5]. Причина таких отличий обсуждалась нами в работе [6].

Таблица 5

Коэффициенты трения покрытий (Эл. А–Fe–Al) при нагрузке 50 г

Наименование образцов	Коэффициент трения	
	Алюминиевая пластина	Медная пластина
Эл. А + Ti в газ. среде аргона, обр. 1, (15 мин)	0,344	0,255
Эл. А + Ti в газ. среде аргона, обр. 2, (30 мин)	0,276	0,326
Эл. А + Ti в газ. среде азота, обр. 1, (15 мин)	0,317	0,350
Эл. А + Ti в газ. среде азота, обр. 2, (30 мин)	0,374	0,461

Таблица 6

Коэффициенты трения покрытий (Эл. № 3–Zn–Al) при нагрузке 50 г

Наименование образцов	Коэффициент трения	
	Алюминиевая пластина	Медная пластина
Эл. № 3 Zn–Al + Ti в газ. среде аргона, обр. 1, (15 мин)	0,349	0,256
Эл. № 3 Zn–Al + Ti в газ. среде аргона, обр. 2, (30 мин)	0,321	0,432
Эл. № 3 Zn–Al + Ti в газ. среде азота, обр. 1, (15 мин)	0,249	0,274
Эл. № 3 Zn–Al + Ti в газ. среде азота, обр. 2, (30 мин)	0,366	0,450

На структуру покрытия Fe–Al значительное влияние оказывает величина тока дуги. Увеличение тока разряда дуги приводит к увеличению толщины покрытия, однако при возрастании тока свыше 130 А снижается совершенство структуры и резко повышается количество капельной фазы, которая является причиной снижения прочности сцепления подложки с покрытием.

При малой мощности разряда (ток дуги < 20–30 А) из-за уменьшения коэффициента ионизации плазмы в пленку «замуровываются» нейтральные частицы реакционного газа и катода, что способствует повышению концентрации дефектов покрытия. Экспериментально нами определен оптимальный ток — 90 А.

В случае бинарных катодов при распылении различных катодов ситуация несколько иная. Средний размер титановой фазы в покрытии Fe–Al + Ti в среде аргона меньше, чем в покрытии Cr–Mn–

Si–Cu–Fe–Al + Ti. В среде азота также наблюдаются меньшие размеры кристаллитов нитрида титана. Покрытие Fe–Al без титана соответствует основной массе покрытия Fe–Al + Ti. В целом закономерность формирования сферических кристаллитов титана такая же, как и в случае Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al + Ti.

Обсуждение результатов эксперимента

Чтобы проанализировать полученные результаты, рассмотрим коэффициенты трения одноименных и разноименных пар металлов (табл. 7 и 8). Сравнение таблиц 2, 3 и 5, 6 показывает, что коэффициенты трения полученных нами покрытий значительно меньше, чем для одноименных пар трения наиболее распространенных материалов и в 2 раза меньше, чем для разноименных пар трения. Наименьшим коэффициентом трения обладает покрытие Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al (табл. 2). При одновременном распылении катодов коэффициенты трения покрытий увеличиваются, но при этом возрастает их микротвердость.

Таблица 7

Коэффициенты сухого трения для одноименных пар наиболее распространенных материалов [7]

Комбинации материалов		Коэффициент сухого трения
Алюминий	Алюминий	1,05–1,35
Медь	Медь	1,0
Сталь	Сталь	0,8
Железо	Железо	1,0
Кадмий	Кадмий	0,5
Хром	Хром	0,41
Графит	Графит (в вакууме)	0,5–0,8
Магний	Магний	0,6
Никель	Никель	0,7–1,1
Платина	Платина	1,2
Серебро	Серебро	1,4
Цинк	Цинк	0,6

Таблица 8

Коэффициенты сухого трения для разнородных пар наиболее распространенных материалов [7]

Комбинации материалов		Коэффициент сухого трения
Алюминий	Низкоуглеродистая сталь	0,61
Латунь	Сталь	0,35
Кадмий	Хром	0,41
Медь	Низкоуглеродистая сталь	0,53
Никель	Низкоуглеродистая сталь	0,64

Физические свойства металлического покрытия в значительной мере определяются средним размером зерен. Наилучшим механическим свойствам почти всегда соответствует мелкозернистая структура, как, например, на рисунке 7. Действительно, проведенные нами предварительные измерения микротвердости покрытия Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al + Ti показали значение микротвердости около 70 ГПа. Это значительно превышает значение микротвердости традиционных нитрид-титановых покрытий (около 40 ГПа) и не так сильно отличается от микротвердости алмаза (100 ГПа). Таким образом, полученное нами покрытие можно отнести к сверхтвердым. Практическое использование полученного результата обусловлено необходимостью упрочнения инструментальных сталей режущего инструмента, сверл, вырубных штампов и т.д., качество которых в последние годы заметно снизилось. Производственные испытания покрытий Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al + Ti начаты на Карагандинском турбомеханическом заводе. В сочетании с низким коэффициентом сухого трения эти покрытия перспективны для использования в авиационной и космической технике.

Покрытия на основе бинарных сплавов алюминия обладают неплохой коррозионной стойкостью и могут быть использованы при изготовлении пар трения, работающих в агрессивных средах.

Заклучение

Меня технологические параметры нанесения ионно-плазменных покрытий (ток дуги, давление реакционного газа, температура детали и т.д.), можно довольно в широких пределах изменять их механические свойства [8].

Другим направлением изменения свойств покрытий (в том числе и трибологических) является формирование покрытий сложного элементного состава, реализуемых путем послойного или одно-временного осаждения на подложку в атмосфере реакционных газов потоков от двух источников: ионных [9], магнетронных [10], вакуумно-дуговых [11] и их комбинации [12].

Работа выполнена по программе МОН РК 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований». Контракт № 58.

References

- 1 Bouden F.P., Teybor D. Friction and greasing of firm bodies. — Moscow: Mechanical engineering, 1968. — 543 p.
- 2 Frolov K.V. Modern tribology: Results and prospects. — Moscow: Nauka, 2008. — 480 p.
- 3 Kolesnikov V.A., Bajsgov J.Z., Jurov V.M. The information-measuring device for definition of factor of a sliding friction // Basic researches. — 2011. — № 12. — Part 1. — P. 121–124.
- 4 Reshetnjak E.N., Strelitsky V.E. Synthesis of strengthening nanostructural coverings // Questions of a nuclear science and techniques. — 2008. — № 2. — P. 119–130.
- 5 Psachye S.G., Zolnikov K.P., Konovalenko I.S. Synthesis and properties of nanocrystals and substructural materials. — Tomsk, 2007. — 264 p.
- 6 Jurov V.M., Vertjagina E.N., Guchenko S.A. Influence of an ionic irradiation on properties of nanostructural coverings Zn–Al and Fe–Al // Modern high technologies. — 2011. — № 5. — P. 63–68.
- 7 Kragelskij I.V., Vinogradova I.E. The factor of a friction. — Moscow: Mechanical engineering, 1962. — 220 p.
- 8 Jurov V.M., Vertjagina E.N. et al. Influence of technological parameters on properties of composite coverings Mn–Fe–Cu–Al // The Bulletin of development of science and education. — 2011. — № 2. — P. 18–23.
- 9 Watanabe H., Sato Y. et al. The mechanical properties and microstructure of Ti–Si–N nanocomposite films by ion plating // Surf. and Coat. Technol. — 2003. — Vol. 169–170. — P. 452–455.
- 10 Carvalho S., Ribeiro E. et al. Effect of morphology and structure on the elastic behavior of (Ti, Si, Al)N nanocomposites // Surf. and Coat. Technol. — 2003. — Vol. 174–175. — P. 984–991.
- 11 Flink A., Larson T. et al. Influence of Si on the microstructure of are evaporated (Ti, Si)N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability // Surf. and Coat. Technol. — 2005. — Vol. 200. — P. 1535–1542.
- 12 Li Z.G., Mori M. et al. Structure and properties of Ti–Si–N films prepared by ISP assisted magnetron sputtering // Surf. and Coat. Technol. — 2005. — Vol. 193. — P. 345–349.

В.М.Юров, В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая

Ионды-плазмалық композитті жабулардың трибологиялық қасиеттері

Ионды-плазмалық әдіспен алынған жабулардың сырғанау кезіндегі үйкеліс коэффициенті өлшенді. Бірінші жағдайда жабуларды жасау кезінде көпфазалы катодтар қолданылды. Екінші жағдайда көпфазалы және титандық катодтарды бір мезгілде балкыту кезінде көп компонентті плазмалық ағындар генерациясы жүзеге асырылды. Жабылулар аргон және азот атмосфераларында жасалды. Әрбір жағдайда құрғақ үйкеліс коэффициентінің шамасы 0,1–0,3 аралықтарына сәйкес келеді. Бұл шама металдардың басым көбі үшін сәйкес келетін құрғақ үйкеліс коэффициенттерінің шамаларынан төмен. Зерттелінген жабулардың қатандығы мен тозу төзімділігінің жоғарылығын ескеріп, оларды вакуумдық құрылғыларда үйкелесетін қос жұп ретінде ұсынуға болады.

V.M.Jurov, V.Ch.Laurinas, O.N.Zavatskaya

The tribological properties of ionic-plasma composite coverings

Factors of a sliding friction of the coverings received by an ionic-plasma method are measured. In the first case at sedimentation of coverings multiphase cathodes were used. In the second case generation of multi-component plasma streams was carried out at simultaneous dispersion of multiphase and titanic cathodes. Drawing of coverings was carried out in argon and nitrogen atmosphere. In all cases the size of factor of a dry friction lays within 0,1–0,3. It is much less factors of a dry friction of the pairs the majority of metals with the same name. Considering, that the investigated coverings possess considerable hardness and wear resistance, it is possible to recommend them in quality of pairs a friction in vacuum devices.