

1. Комбалов, В. С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей / В. С. Комбалов. – М.: Наука, 1983. – 213 с.
2. Маталин, А. А. Технология механической обработки / А. А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1977. – 462 с.
3. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
4. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – Введ. 1988 – 03 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1988. – 21 с.
5. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 3452. Расчет технологических условий токарной обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные показатели деталей / В.Ф. Безъязычный, Т.Д. Кожина, С.А. Волков; организация-разработчик: Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева. – Зарегистрировано в Отраслевом фонде алгоритмов и программ 21.04.04 – 1 с.
6. Лицов, А. Е. Разработка расчетного метода определения технологических условий концевой фрезерования маложестких сложнопрофильных деталей с учетом их деформаций: автореферат дис. ... канд. техн. наук / А.Е. Лицов. – Рыбинск, 2005. – 16 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613415. Расчет режимов плоского шлифования периферией круга по заданным величинам параметров качества поверхностного слоя деталей машин / В.Ф. Безъязычный, М.А. Прокофьев, А.Н. Сутягин; правообладатель: Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева. – Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 17.08.08 – 1 с.

УДК 539.4:621.891

**СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ
ДОПИРОВАННОГО ФУЛЛЕРЕНАМИ МДО-ПОКРЫТИЯ
ПРИ ФРИКЦИОННОМ КОНТАКТЕ СО СТАЛЬЮ
БЕЗ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

А.И. Комаров

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск

Введение. К числу перспективных материалов триботехнического назначения относится керамическое покрытие (КП), полученное микродуговым оксидированием (МДО) сплавов алюминия и обладающее уникальным комплексом свойств. Применение КП для упрочнения поверхностей элементов трибопар, работающих в среде смазочных материалов (СМ),

обеспечивает заметное повышение их ресурса. Однако широкое использование КП, особенно в узлах трения, эксплуатируемых в условиях без СМ, сдерживается вследствие их недостаточной прочности. Перспективным направлением повышения эксплуатационных свойств материалов является модифицирование их поверхностей наноразмерными компонентами. Среди них значительный интерес представляют фуллерены, которым присущи высокие упругость и прочность. Имеющиеся сведения по эффективности использования фуллеренов в качестве покрытий, твердых смазок и наполнителей неоднозначны [1]. Цель работы – изучение особенностей структурообразования поверхностей трения под воздействием фуллеренов, включенных в КП, установление на этой основе механизма его изнашивания в режиме фрикционного взаимодействия без СМ со сталью.

Методы исследования. МДО-покрытие формировали на сплаве Д16 на установке микродугового оксидирования, обеспечивающей анодно-катодную поляризацию, по методике [2]. Наполнение КП фуллереном C_{60} с концентрацией 0,2 и 1,2 % (здесь и далее мас.%) проводили пропиткой керамики раствором этого вещества в толуоле. Исследование триботехнических характеристик выполняли в условиях трения без СМ при скорости скольжения 0,1 м/с и давлении $p = 5$ МПа. Структуру изношенных поверхностей изучали РСА на дифрактометре ДРОН-3М, сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) SUPRA 55 фирмы «Carl Zeiss». Элементный состав поверхностных слоев исследовали методом МРСА с применением энергодисперсионной приставки InCa 350 Cambridge Instrument GB.

Результаты и их обсуждение. *Структура слоя переноса.* Полученные результаты показали, что трение КП по стали сопровождается переносом продуктов износа на поверхность керамики, приводящим к формированию на ней слоя переноса (СП), ранее наблюдаемого для других керамик [3]. Установлено, что СП, формируемый на КП, в процессе испытания подвергается периодическому разрушению, чередующемуся с его регенерацией. При этом соотношение скоростей образования $v_{об}$ и разрушения v_r слоя переноса является важным фактором, определяющим характер процесса изнашивания КП. Выполненный анализ позволил заключить, что соотношение этих скоростей определяется исходным состоянием КП. Особенность фрикционного контакта исходной керамики со сталью заключается в достаточно длительном периоде накопления продуктов переноса на поверхности КП ($v_{об} > v_r$). Слой переноса является рыхлым (рис. 1, а) и представлен оксидами железа – $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (50 %), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (50 %). При включении в керамику C_{60} (0,2 %) доминирующим по продолжительности явля-

ется период уменьшения количества продуктов изнашивания на поверхности КП. Последнее указывает, что включение относительно малых количеств фуллерена C_{60} в КП подавляет процесс переноса продуктов с контртела на его поверхность и интенсифицирует разрушение СП на ней – здесь $v_{об} < v_p$.

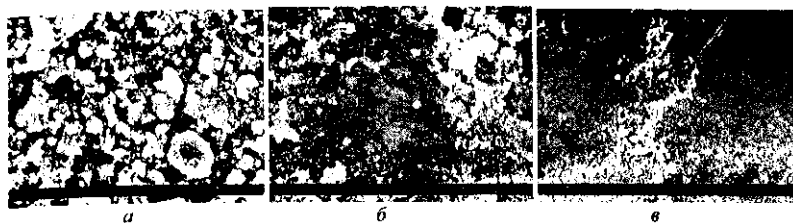


Рис. 1. Морфология поверхности немодифицированного КП (а) и содержащего 0,2 (б), 1,2 % (в) C_{60} после трения без СМ при $p = 5$ МПа

Из данных РСА следует, что включение в покрытие фуллерена C_{60} приводит также к изменению соотношения фаз в СП. При концентрации 0,2 % C_{60} в продуктах массопереноса регистрируется углерод (2,3 %), а содержание $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ возрастает до 58 %. Процессы передеформирования при трении, происходящие в достаточно тонких слоях, в модифицированном КП приводят к уплотнению структур переноса на поверхности керамики (рис. 1, б).

Рост концентрации C_{60} в КП до 1,2 % сопровождается при ее фрикционном нагружении выравниванием скоростей образования и разрушения слоя переноса на поверхности покрытия ($v_{об} \approx v_p$). В этом случае для поверхности керамики после трения по стали характерны более глубокие изменения, проявляющиеся в уплотнении СП (рис. 1, в), возрастании (до 61 – 65 %) в нем оксида $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и углерода (до 6,7 %). Достаточно глубокие борозды на поверхности СП, ориентированные в направлении движения индентора, свидетельствуют о высоких деформациях в зоне фрикционного контакта, развиваемых под воздействием фуллеренов. Такая концентрация C_{60} оказывает значительное воздействие на структуру поверхности трения КП.

Триботехнические характеристики МДО-покрытия. Как следует из сравнительного анализа результатов проведенных испытаний, интенсивность изнашивания I образцов МДО-покрытия существенно различается между собой. Наибольшее значение I ($2,58 \cdot 10^{-4}$ мг/м) регистрируется для

образца, не содержащего фуллерены, минимальное ($I = 1,30 \cdot 10^{-4}$ мг/м) соответствует КП, наполненному C_{60} с концентрацией 1,2 %. Промежуточное значение I , равное $1,80 \cdot 10^{-4}$ мг/м, регистрируется для КП, включающего 0,2 % C_{60} . Таким образом, модифицирование фуллеренами поверхности МДЮ-покрытия обеспечивает повышение его износостойкости в зависимости от концентрации C_{60} в 1,4 – 2,0 раза.

При трении без СМ керамики по индентору наблюдается достаточно высокий (1,05 – 1,10) коэффициент трения f (рис. 2). Из анализа данных изменения f пары КП – сталь следует, что его зависимость от пути трения также определяется исходной структурой КП. Во всех случаях на ранних стадиях испытания ($L = 50 - 150$ м) регистрируется резкое возрастание f .

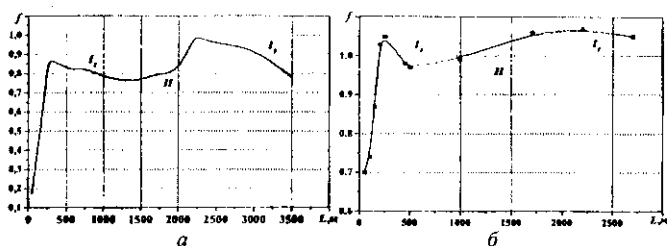
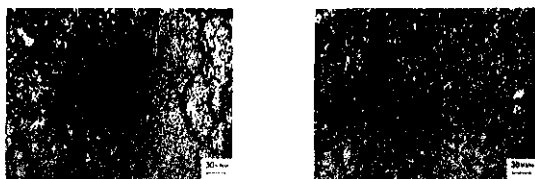


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от пути трения керамики с различной концентрацией фуллеренов: а – без C_{60} ; б – 1,2 %

Затем ход кривых характеризуется немонотонным, почти периодическим изменением коэффициента трения во времени, что может быть связано со следующим. Согласно [3] наличие плотного сплошного СП на поверхности трения керамики способствует понижению уровня напряжений на ней и, как следствие, снижению I и f . При почти полном отсутствии СП на поверхности КП создаются условия, приводящие к возникновению высоких напряжений, вызывающих появление системы трещин, способствующих интенсивному изнашиванию поверхностей и высокому коэффициенту трения. Таким образом, временная зависимость коэффициента трения может служить индикатором процессов, происходящих на поверхности трения, что непосредственно вытекает из полученных результатов.

При детальном анализе полученных зависимостей (см. рис. 2) нетрудно заметить, что на всех этих кривых после стадии начального роста f регистрируются два участка I_1 , I_2 , соответствующие снижению коэффициента трения, и участок II, отвечающий его возрастанию. Полученные данные позволяют заключить, что периоды I_1 , I_2 обусловлены образованием

СП на поверхности керамики, а период II – его разрушением. Можно ожидать, что последнее определяет механизм разрушения керамического покрытия при трибоконтакте со сталью (рис. 3). Видно, что на поверхности трения немодифицированной керамики формируется система параллельных квазипериодических микротрещин (рис. 3, *а*), вызывающих разрушение КП. Присутствие в трибоконтакте фуллеренов меняет характер повреждения его поверхности при трении. В этом случае в тонких поверхностных слоях формируются ячеистые структуры (рис. 3, *б*), что способствует повышению износостойкости МДО-покрытия. Можно предположить, что это связано со следующим. Выходя из пор покрытия и попадая в зону трибоконтакта, наночастицы фуллеренов, обладая высокой реакционной способностью, оказывают интенсивное воздействие на структурообразование поверхностных слоев, создавая условия для формирования самоорганизующихся дисперсных структур.



а *б*
Рис. 3. Микроструктура поверхности трения КП:
а – без фуллеренов; *б* – 1,2 % C_{60}

Заключение. Установлено, что трибоконтакт КП со сталью приводит к массопереносу на его поверхность. Фуллерены, введенные в керамическую матрицу, оказывают значительное влияние на структуру СП, структурообразование поверхности трения КП, формируя в тонких поверхностных слоях ячеистые структуры, обеспечивающие повышение износостойкости МДО-покрытия в 1,4 – 2,0 раза.

Литература

1. Sublimed C_{60} films for tribology / В. Bhushan [at all] // *Appl. Phys. Letters.* – 1993. – № 25. – P. 3253 – 3255.
2. Витязь, П.А. Триботехнические свойства оксидокерамического покрытия в режиме граничного трения в контакте со сталью / П.А. Витязь, А.И. Комаров, В.И. Комарова // *Трение и износ.* – 2008. – Т. 29. – № 5. – С. 447 – 452.
3. Effect of speed and presser on dry sliding interactions of alumina against steel / A. Ravikiran [at all] // *J. Am. Ceram. Soc.* – № 2. – P. 356 – 364.

ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ С УМЕНЬШЕННОЙ ГЛУБИНОЙ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

А.В. Дудан

УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк

Увеличение тепловложения при различных способах наплавки снижает износостойкость наплавленного металла из-за охрупчивания матрицы, увеличения степени неоднородности структуры, угара легирующих составляющих и укрупнения износостойких фаз [1]. Поэтому для создания благоприятных условий и предотвращения потерь легирующих элементов при получении композиционных слоев целесообразно применять процессы с низкой удельной энергией.

Одним из методов уменьшения погонной энергии наплавки является расплавление тонкого слоя основного металла и металла матрицы с подачей тугоплавких композиций в их расплав. Высокая прочность сцепления слоя с основным металлом обуславливается образованием зоны взаимной диффузии металлов, а необходимые износостойкие характеристики покрытия – практически полным переходом легирующих элементов порошковых композиций в наплавленный металл.

Как показали исследования, одними из наиболее перспективных источников тепла, необходимого для получения ванны жидкого металла, являются электрошлаковая ванна и электрическая дуга.

Разработан новый способ горизонтальной электрошлаковой наплавки, при котором в жидкий металл вводится порошковый присадочный материал (ППМ) на основе тугоплавких карбидов [2]. Решение задачи таким методом благоприятствует снижению тепловложения в основной металл благодаря интенсивному охлаждающему действию ППМ.

Были проведены наплавки на плоские образцы из стали Ст3 размером 360×120×12 мм. Предварительно, по всей длине образца фрезеровалась канавка шириной 50 мм и глубиной 1 – 2 мм, которая впоследствии заправлялась. Использовался флюс АН-8. В качестве присадочного металла применялся порошок ФХ-800 фракции 0,2 – 0,8 мм. Источник питания – выпрямитель ВДУ-1201 с использованием жесткой характеристики и прямой полярности тока. Процесс начинался с «твердого старта» путем наведения шлаковой ванны графитовым неплавящимся