

УДК 621. 9.048.4

**Чигринова Н. М.**, д-р техн. наук, проф., **Чигринов В. Е.**, ст. преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,  
Тел. +375-17-293-95-81, E-mail: chygrynova@ya.ru

## ЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ИЗ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*В статье анализируются сравнительные результаты изменения основных показателей поверхности и трибологических характеристик литейных алюминиевых сплавов с функционально-адаптированными покрытиями на основе керамико-подобных слоев, формируемых методом анодного микродугового оксидирования (АМДО), и металло-полимерных систем, полученных методом газотермического напыления. Сравнение изученных пар трения показывает бесспорное влияние состава и свойств контактных поверхностей на их износостойкость и трибологические характеристики. Структура предложенных пар трения алюминиевый сплав оксидо-керамическое покрытие и алюминиевый сплав-металло-полимерное покрытие, высокая износостойкость в сочетании с низким коэффициентом трения позволяют рекомендовать их в качестве эффективных материалов для изделий машиностроительного комплекса.*

**Ключевые слова:** литейные алюминиевые сплавы, АМДО, газотермическое напыление, оксидная керамика, металло-полимерные системы, трибологические параметры, коэффициент трения.

**N. M. Chigrinova, V. E. Chigrinov**

### EFFECTIVE FRICTION PAIR FOR MACHINERY OF CAST ALUMINUM ALLOYS

*The article analyzes the comparative results of changes in the main surface parameters and tribological characteristics of cast aluminum alloys with functionally adapted coatings based on ceramic-like layers formed by the method of anodic microarc oxidation (AMDO), and metal-polymer systems obtained by gas-thermal spraying. Comparison of the studied friction pairs shows the undeniable influence of the composition and properties of the contact surfaces on their wear resistance and tribological characteristics. The structure of the proposed friction pairs aluminum alloy-oxide-ceramic coating and aluminum alloy-metal-polymer coating, high wear resistance combined with low coefficient of friction allow us to recommend them as effective materials for engineering products.*

**Keywords:** casting aluminum alloys, AMDO, gas-thermal spraying, oxide ceramics, metal-polymer systems, tribological parameters, coefficient of friction, wear resistance.

#### 1. Введение

Основной тенденцией развития такой важнейшей отрасли народного хозяйства любого государства, как машиностроение, всегда было стремление к увеличению качества и производительности машин. Поэтому повышение износостойкости материалов, деталей и узлов машин – главная и всегда актуальная задача.

В настоящее время все более серьезное внимание уделяется проблемам упрочнения и инженерии поверхностей материалов, из которых изготавливают комплектующие для изделий машиностроительного комплекса.

Эффективным средством совершенствования структуры и свойств применяемых в машиностроении материалов, может быть использование упрочняющих технологий, связанных прежде всего с таким перспективным направлением, как формирование в критических зонах узлов и механизмов функционально-адаптированных покрытий, обеспечивающих улучшение рабочих характеристик изделий.

Как правило, в двигателях внутреннего сгорания большинство комплектующих изготовлены из литейных алюминиевых сплавов и функционируют в условиях трения и механического износа. Поэтому поиск технологий упрочнения и разработка составов

покрытий на их поверхности, обладающих повышенной износостойкостью в сочетании с улучшенными характеристиками для работы в условиях трения, представляет существенный интерес. При этом, как известно [1, 2], наилучшими характеристиками износостойкости обладают материалы с повышенной твердостью, такие, например, как оксидные керамики, а покрытия со сниженным коэффициентом трения обычно содержат в своем составе полимер.

Существует множество приемов формирования указанных покрытий: это различные виды электрофизической и электрохимической обработки материалов, газотермическое напыление, доводочные операции, и обработка специальными пастами и др. В статье рассматриваются два метода, наиболее часто используемые для совершенствования структуры и свойств литейных алюминиевых сплавов за счет создания на их поверхностях функциональных покрытий: метод анодного микродугового оксидирования (АМДО) для формирования оксидо-керамического покрытия и метод газотермического напыления (ГТН) для получения металло-полимерных слоев [3].

В статье в качестве исследуемых пар трения рассматриваются две композиции: литейный алюминиевый сплав-покрытие на основе оксидной керамики и литейный алюминиевый сплав-покрытие на базе металло-полимера. Выбор именно этих композиций обусловлен возможностью получения в их рабочих зонах разветвленной пористости для задержания смазки и эффективной работы в условиях трения.

При выборе режимов формирования функциональных покрытий указанными методами, определяющими их свойства, состав и конечный рельеф, учитывали, что, для создания работоспособных пар трения, функционирующих в условиях интенсивного механического износа и трения, требуется обеспечить стабильное поведение создаваемых композиций металл-покрытие в течение длительного периода эксплуатации. Такое поведение в значительной мере обусловлено шероховатостью поверхности созданного покрытия [4, 5]. Поэтому финишную операцию обработки назначают так, чтобы шероховатость этой поверхности трения была близка к равновесной, длительно сохраняющейся шероховатости, которая, как правило, обеспечивается либо за счет специальных доводочных операций, либо путем продолжительной приработки. Если бы удалось сразу обработать поверхность трения до равновесной шероховатости, приработка была бы не нужна. Однако сделать это практически невозможно. Если конечная шероховатость поверхности трения будет отличаться от равновесной, по крайней мере, на два класса, независимо от того, в какую сторону - чище или грубее, износостойкость пары существенно снижается. Грубо шероховатые поверхности трения контактируют на малых площадках, где локализуются высокие давления. Это увеличивает износ и вероятность схватывания. Гладкие поверхности, обычно плохо адсорбируют смазку и склонны к заеданию [6].

В связи со сказанным целью настоящего исследования является выбор режимов получения и отработка оптимальных составов пар трения с равномерным рельефом поверхности и требуемой износостойкостью без применения дополнительных доводочных операций.

## **2. Материалы и оборудование, методики исследования и экспериментов**

Для достижения цели настоящего исследования были изготовлены две группы экспериментальных образцов из литейного сплава Al 25 с оксидной керамикой и со слоем металло-полимерного материала на рабочей поверхности.

Создание композиционного материала «алюминиевая подложка – керамикоподобный слой» осуществляли на серийных установках, содержащих трехфазный источ-

ник питания, формирующий импульсы выпрямленного напряжения частотой 150Гц и амплитудой до 540В, повышающий трансформатор и силовой блок. Процесс АМДО проводился в электролитической ванне из нержавеющей стали, стенки и дно которой являются катодом, в стандартном для таких сплавов составе электролита (табл. 1) и диапазоне электрофизических параметров процесса, обеспечивающем получение на поверхности оксидируемого образца за технологически оправданное время (не более 10-15 мин) покрытия толщиной не менее 60 мкм [7].

Таблица 1. – Состав электролита, марка оксидируемого сплава, ГОСТ 1583-93

Основа электролита	Тип и марка оксидируемого сплава
2,5 г/л NaOH+5 г/л SiO <sub>2</sub> .10H <sub>2</sub> O	Al 25

Электрические характеристики фиксировали с помощью цифрового осциллографа. Расчет расхода энергии на образование покрытия толщиной 1 мкм определяли по формулам:

$$P_i = U_i \cdot I_i,$$

где  $P_i$  – мощность за измерительный цикл ( $Bm$ );

$U_i$  – эффективное напряжение за один измерительный цикл ( $B$ );

$I_i$  – эффективный ток за один измерительный цикл ( $A$ );

$$A_i = P_i \cdot t_i,$$

где  $A_i$  – энергия (работа) за измерительный цикл ( $Дж$ ).

Тогда

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N P_i * \frac{\Delta t}{N},$$

где  $A$  – энергия (работа) за время протекания процесса ( $Дж$ );  $\Delta t = t_2 - t_1$  – длительность процесса ( $c$ );  $t_1$  – время начала процесса;  $t_2$  – время окончания процесса;  $N$  – количество измерительных циклов.  $t_i = \Delta t/N$  – средняя длительность измерительного цикла ( $c$ );

Расчет скорости роста покрытия выполняли в соответствии с равенством:

$$V_{мкм} = h / \Delta t,$$

где  $V_{мкм}$  – скорость роста покрытия ( $мкм/мин$ );  $h$  – толщина покрытия ( $мкм$ ).

Эксперименты по формированию оксидных керамик проводили на базе ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» в г. Минске.

Полимеризацию алюминиевых образцов выполняли на базе научно-исследовательской лаборатории концерна FORD в г. Дирборн (США) и вели с учетом обеспечения требуемой адгезии металло-полимерного покрытия с алюминиевой подложкой. Металло-полимерный материал - это полуфабрикат, состоящий из полимеров и металлов, соединенных между собой неподвижно атомно-молекулярными силами или механически, и предназначенный для изготовления деталей, узлов и конструкций. В качестве порошковой смеси для формирования методом ГТН покрытия, обладающего улучшенными триботехническими характеристиками и необходимой износостойкостью, использовали металло-полимерные композиции INCONEL+TUFTON / Polyethylene-Ketone (PEEK) polymer с изменяющейся концентрацией полимера в смеси от 0,2

до 1,5 г на 1 кг порошковой смеси. Составы и содержание металлических и полимерных элементов в указанных металло-полимерных системах соответствуют существующим в стране стандартам.

Технологически полимеризацию осуществляли газо-термическим методом с использованием оборудования марки «TAF-A-twin-wire arc (TWA) gun».

Формирование металло-полимерного слоя на алюминиевой подложке методом газо-термического напыления происходило при изменяющихся составах и количествах подаваемого в камеру полимера и давления газа в потоке в диапазоне 55, 60, 65 г/с. Напряжение процесса 30 В, ток 230–250 А, давление воздуха 0.4 МПа. Среда – воздух.

Исследование структуры и поведения созданных слоистых композиций также выполняли на базе научно-исследовательской лаборатории концерна FORD посредством:

- изучения топографии поверхности созданных композиций;
- анализа параметров их рельефа посредством оценки шероховатости;
- контроля микротвердости и пористости;
- измерения коэффициента трения и величины износа в принятых условиях эксперимента.

Режимы обоих методов подбирали таким образом, чтобы на поверхности алюминиевой подложки были получены покрытия одинаковой и при этом работоспособной толщины, как показано в наших предыдущих исследованиях [7,8], на уровне 60–80 мкм.

Анализ топографических особенностей полученных слоистых композиций производили с помощью светового микроскопа Mef-3 и Polyvar фирмы "Buehler-Met" в диапазоне увеличений  $\times 100$  –  $\times 1500$  с применением средств, улучшающих разрешение и контраст изображения (оптимальное диафрагмирование, съемка в светлом поле и в интерференционном контрасте) для более четкой фиксации различных фаз, а также с применением сканирующих электронных микроскопов.

Элементный состав оксидной керамики определяли на поверхности образцов методом микрорентгеноспектрального анализа с применением спектрометра по дисперсии энергии SED на анализаторе AN 10000 фирмы Link Analytical, установленном на сканирующем электронном микроскопе CamScan, Кэмбридж; анализы выполняли по программам полуколичественного и количественного (ZAF-4) анализов на 3-х полях каждого образца.

Определение величины и характера износа выполняли с помощью специального лазерного профилометра фирмы UBM.

Микротвердость измерялась согласно методу Кнуппа на микротвердомере «Micromet II» фирмы «Buehler Met» с индентором Виккерса с изучением полученных отпечатков методом СЭМ с МРСА.

Методически измерение пористости осуществлялось посредством количественного стереологического анализа образцов на аттестованном автоматическом анализаторе изображения «Mini-Magiscan» фирмы "Joyce Loebel", Англия, по программе «Genias 26». Принцип работы анализатора основан на выделении объектов анализа по пороговому значению интенсивности. Загрузка изображения в программный комплекс анализа и обработки изображений происходит либо из уже существующего графического файла (\*.bmp, \*.jpg, \*.im), либо при помощи цифровой видеокамеры и оптического микроскопа «Jenavert».

Определение пористости образцов по зонам включало следующие этапы:

а) калибровка изображения – производится с помощью стандартного тест-объекта для задания масштаба;

б) фиксация изображения – преобразование изображения в электрический сигнал, пригодный для цифровой обработки и запоминания;

в) сегментирование – «отделяет» исследуемые объекты (поры, частицы) от фона. В результате формируется двоичное изображение, каждый элемент которого может находиться только в одном состоянии – исследуемое или фоновое. Для дополнительной корректировки изображения в ручном режиме используется операция редактирования.

г) выбор необходимых измерений. Из десяти возможных параметров выбирали в качестве основных геометрических характеристик пористость-процент интересующей фазы – отношение общей детектируемой площади к площади поля.

Обработку результатов анализа изображения проводили по программе, которая дает возможность статистического анализа результатов по любому из заданных измерений и строит гистограммы по любому из измеренных параметров с желаемым шагом. Для определения пористости покрытия выбирали по 2 – 3 образца каждого вида покрытий.

Трибологический тест производили при испытаниях с чистым скольжением в условиях ограниченной смазки без поворота коротких образцов на установке «Falex block-on-ring», эксплуатируемой в соответствии со специализированной методикой ASTM G 77, называемой TIMKEN-методом, при котором контактное взаимодействие изучали в одно- и разноименном сочетании пар трения. В качестве катящихся образцов использовали короткие образцы легированной высокотвердой стали с твердостью  $HV_{0.5}$  более 7500 МПа – для композиции с металло-полимерным покрытием и керамические диски из  $\alpha-Al_2O_3$  для испытаний композиции с керамическим слоем. В качестве длинных образцов применяли образцы алюминиевой подложки с оксидной керамикой, а также образцы алюминиевой подложки с металло-полимерным покрытием на поверхности.

Постоянную фиксацию величины нагрузки осуществляли в процессе испытания с помощью установленного в приборе датчика нагрузки.

Уровень износа в каждом тесте рассчитывали с соответствием со специальной компьютерной программой, в которой использовалось равенство:

$$V/L = 1/12 \cdot d \cdot \omega^3 / R^2 \cdot t,$$

где  $R$  – внешний радиус кольца;  $d$  – ширина кольца, мм;  $I$  – ширина полосы износа, мм;  $\omega$  – угловая скорость кольца, измеряемая как  $2/60 \cdot \Pi$ ;  $t$  – время испытания, мин и  $L$  – полная длина скольжения, мм.

При этом принимали, что ширина кольца превышает длину направляющей блока.

Величину износа в паре трения измеряли в определенные промежутки времени через 100, 300, 500, 800 и 1000 циклов.

Рельеф поверхности и шероховатость изучаемых покрытий до и после трибологических испытаний оценивали с помощью специального лазерного профилометра фирмы UVM.

Для изучения качественных характеристик поверхности сформированных покрытий выполняли предварительную подшлифовку их поверхности абразивом SiC на бумажной основе зернистостью P600 и P320 для исключения влияния имеющихся неровностей на параметры рельефа в процессе создания покрытия.

Перед проведением исследований образцы подвергали ультразвуковой очистке в специальном растворе, промывке проточной водой и сушке.

### 3. Основное содержание и результаты работы

При формировании оксидной керамики методом АМДО на поверхности алюминиевой подложки формируется сложное соединение, основой которого являются наиболее термодинамически стабильные оксиды алюминия в сочетании со шпинельными образованиями. Основные показатели поверхности, определяемые режимами АМДО-обработки [1, 7], приведены в табл. 2.

Таблица 2. – Основные показатели поверхности оксидо-керамического покрытия

Химическое соединение или элемент в покрытии	Содержание элемента вес.% в	Толщина керамического покрытия h, мкм	Микротвердость Н $\mu$ , МПа	Шероховатость Ra,	Пористость, ср.,%
				мкм	
Al	20,0	75	13500	1,25–2,5	15–35
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,0001				
Муллит	13,6				
NaAlSiO	22,1				
SiO <sub>2</sub>	12,3				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0				

При нанесении металло-полимерной композиции на поверхность алюминиевых образцов варьировали концентрацию полимера в 1 кг данной порошковой смеси от 0,2 г до 1,5 г, после чего проводили замеры основных показателей сформированных покрытий (табл. 3).

Следует подчеркнуть, что в табл. 2 и 3 указаны средние значения показателей и микротвердости и пористости на поверхности сформированных покрытий, а также диапазон величин шероховатости получен при контроле выбранного фрагмента поверхности с рельефом, наиболее характерным для поверхности всей пары трения.

Таблица 3. – Некоторые характеристики поверхности металло-полимерного покрытия

Состав покрытия	Толщина покрытия h, мкм	Микротвердость Н $\mu$ ср., МПа	Шероховатость Ra, мкм	Пористость, ср. %
INCONEL+TUFTON/ Polyethylene-Ketone (PEEK) с 0,2 г/кг порошковой смеси	75	8820	1,25–1,6	35–40
INCONEL+TUFTON/ Polyethylene-Ketone (PEEK) с 1,5 г/кг порошковой смеси	75	8750	0,8–1,25	32–36

Различная микротвердость созданных покрытий обусловлена их составом: самые высокие показатели Н $\mu$  реализованы на поверхности оксидо-керамического слоя, в

композиции с металло-полимерным покрытием микротвердость в зависимости от содержания полимера в смеси изменяется незначительно.

Контроль пористости показал, что в композиции с оксидо-керамическим покрытием, помимо внутренней пористости, характерной для любой керамики, на поверхности также содержится небольшое количество пор небольших размеров (рис. 1,а), структурно связанных с внутренней пористостью согласно алгоритму формирования оксидных керамик [9] (рис. 1,б).

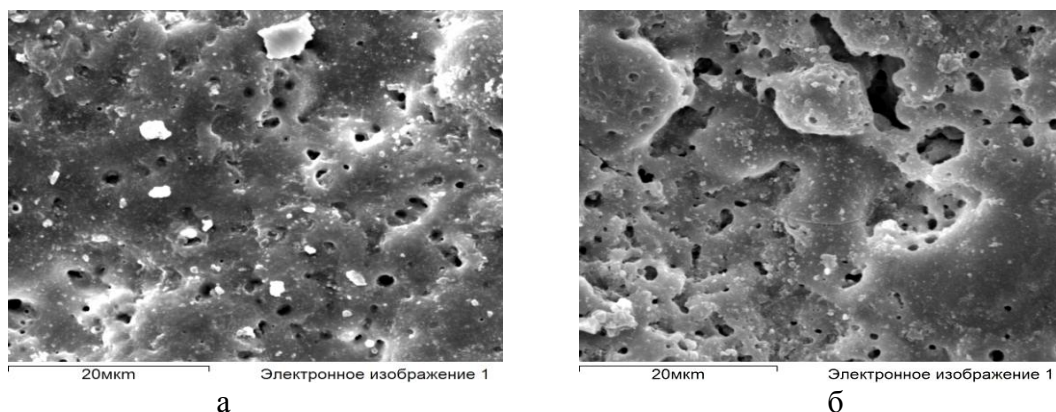


Рисунок 1. Пористость на поверхности оксидо-керамического покрытия

В металло-полимерном слое пористость преимущественно поверхностная, разветвленная с порами больших размеров (рис. 2).

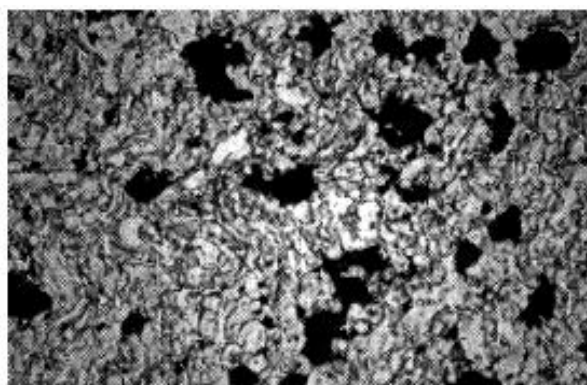


Рисунок 2. Пористость на поверхности покрытия на основе металло-полимерной системы РЕЕК (б)

Контролируя шероховатость поверхностей сформированных покрытий принимали во внимание то, что различные характеристики данного параметра определяют многие функциональные свойства поверхности [5–7]: качество сопряжения (посадки), износостойкость, контактную прочность, светоотражательную способность, теплопередачу, удержание смазки, адгезию и т.д. При этом для обеих групп образцов идентификацию неровностей, которые характеризуют оцениваемый профиль, проводили на базовой длине 0,25 мм (отсечка шага), длина трассирования составляла 1,750 мм. Таким образом, элементы профиля слишком большой длины при оценке поверхности не учитывали. Сравнительная оценка этих параметров (табл.4) может дать представление об условиях протекания физико-химических взаимодействий в системе металл-покрытие,

позволит прогнозировать рабочие свойства полученной поверхности в различных условиях эксплуатации.

Таблица 4. – Параметры шероховатости исследуемых поверхностей

Параметр шероховатости исследуемой поверхности	Обозначение	Численный показатель параметра шероховатости исследуемой поверхности	
		оксидная керамика	металло-полимерная система
Среднее арифметическое отклонение профиля, мкм	Ra	0.905	0.999
Среднее квадратическое отклонение профиля, мкм	Rq	1.151	1.299
Средняя максимальная высота неровности профиля (DIN, ISO), мкм	Rz	5.69	6.99
Средняя максимальная высота элементов профиля (JIS), мкм	RzJ	3.10	3.54
Максимальная высота редуцированных выступов, мкм	Rpkx	1.83	2.05
Средняя максимальная высота выступа профиля (ASME), мкм	Rpm	2.81	2.94
Наименьший коэффициент профиля неровностей материала основы, %	Mr1	9.6	9.3
Наибольший коэффициент профиля неровностей материала основы, %	Mr2	83	91
Полная высота профиля, мкм	Rt	7.10	8.86
Плотность выступов, 1/см	Rpc (0.1, -0.1)	352	360
Средняя ширина неровностей профиля, мкм	RSm	35	47
Средний шаг местных выступов профиля, мкм	S	25	23
Максимальная глубина неровности профиля, мкм	Rx	7.13	9.74

Как показали проведенные замеры, амплитудные параметры профиля поверхности, такие как  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rz$ ,  $RzJ$ ,  $Rp$ ,  $R3z$ ,  $Rt$ , в обоих случаях являются малоинформативными. Их величина характеризует рельеф поверхности либо по средним элементам поверхности, либо описывается случайными функциями, либо зависит от используемого определения параметра, приводящего к разбросу его значений, что не позволяет сделать вывод об особенностях рельефа исследуемой поверхности и, значит, о качестве этой поверхности и ее способности обеспечивать низкий коэффициент трения. Сочетание отдельных амплитудных параметров, таких как  $Rpm$  и  $Rz$ , полезно для определения неравномерности профиля и, как следствие, опорных или скользящих свойств. Так, по данным протокола исследования, образец № 2 с металло-полимерным покрытием имеют большую асимметричность профиля, чем образец с оксидной керамикой – № 1. Этот вывод подтверждает шаговый параметр, характеризующий плотность выступов  $Rpc$ , а также параметры, определяющие средний шаг выступов профиля  $S$ , суммарную ширину  $Ar$  и среднюю глубину  $R$  элементов шероховатости.

Сравнение всех данных, представленных в табл. 4, показало, что оксидо-керамический слой, полученный в оптимальном диапазоне параметров методом АМДО



на поверхности алюминиевого образца, имеет более низкие показатели практически всех изученных параметров шероховатости, что свидетельствует не только о более высоком качестве сформированного покрытия, но и является гарантией получения более низкого коэффициента трения. Сниженные показатели плотности выступов рельефа на поверхности оксидо-керамического покрытия, а также средней ширины неровностей профиля указывают на более сглаженный и равномерный характер рельефа, но при этом не являются показателями супергладкой, полированной поверхности. Подтверждение сказанному – достаточно низкие, но все же определяемые в процессе измерения значения максимальной глубины неровности профиля.

Трибологические испытания изучаемых композиций показали, что в результате контактного взаимодействия образцов под нагрузкой, плавно возрастающей в процессе испытаний, и взаимного перемещения контактирующих поверхностей друг относительно друга, на поверхности появляются следы трения (рис. 3).

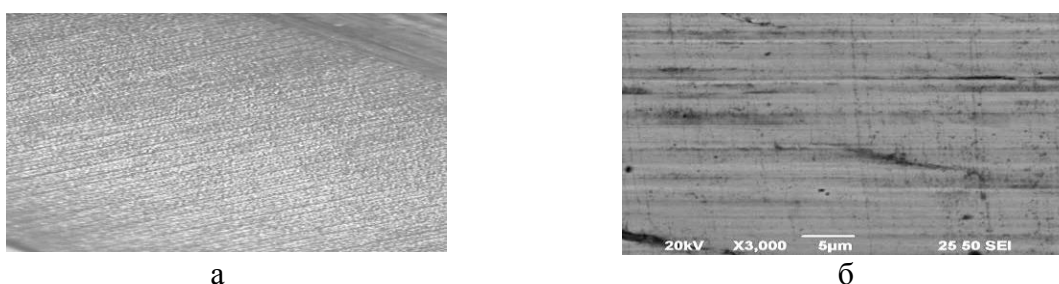


Рисунок 3. Дорожки трения на поверхности металло-полимерного покрытия (а) и оксидо-керамического слоя (б)

Сравнение полученных в одинаковых условиях испытаний профилограмм указывает на более интенсивный износ композиции с металло-полимерным покрытием. (рис. 4, 5).

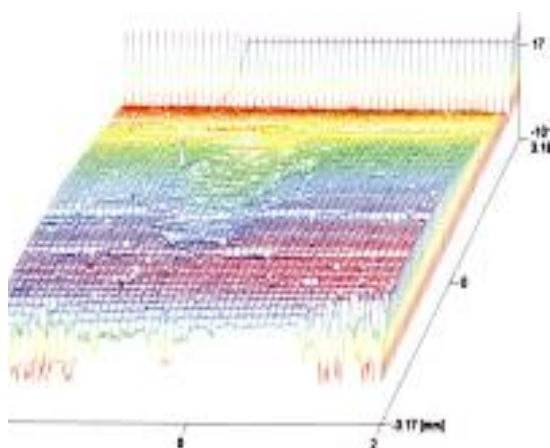


Рисунок 4 – Профиль поверхности износа образца с металло-полимерным покрытием

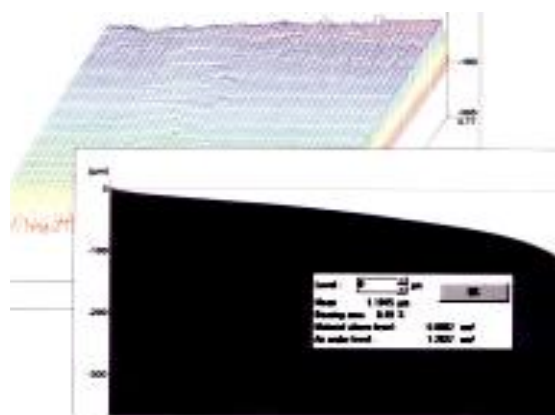


Рисунок 5 – Профиль поверхности износа образца с керамико-подобным покрытием

Кривая, отображающая численное значение глубины профиля дорожки износа, дополняющая схему износа композиции алюминиевая подложка – оксидо-керамическое покрытие, демонстрирует монотонное и плавное снижение скорости износа с течением времени, свидетельствуя о ее более высокой износостойкости и твердости в течение продолжительного периода времени.

Этот вывод подтверждается отсутствием трещин на поверхности трения после ее испытания и то, что глубина канавки износа не превышает 100 мкм, в то время, как глубина канавки износа в композиции металл-металло-полимерный слой превышает 150 мкм.

Сравнивая кривые изменения величины износа во времени в условиях ограниченной смазки по длине дорожки скольжения при проведении трибологических испытаний изучаемых композиций (рис.6) удалось зафиксировать некоторое преимущество в качестве трущейся поверхности материала с оксидо-керамическим слоем (кр. 1) по сравнению с композицией, содержащей на поверхности трения металло-полимерное покрытие (кр. 2).

Интенсивность изнашивания, м/м  $10^{-8}$

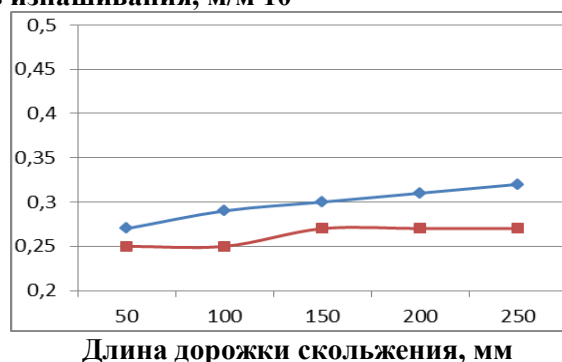
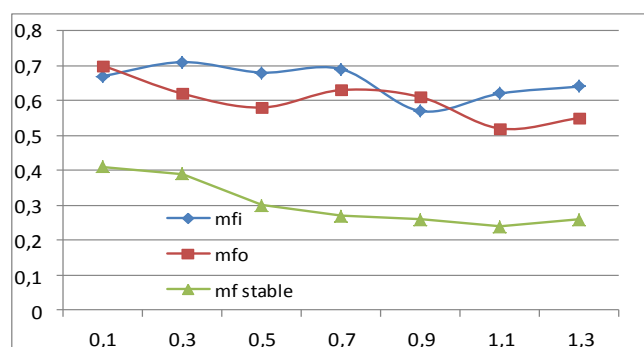


Рисунок 6. Характер износа композиции алюминий-металло-полимерное покрытие (верхняя кривая) и алюминиевый сплав-оксидо-керамическое покрытие (нижняя кривая).

Из представленного рисунка видно, что износ обеих композиций подчиняется одним законам и имеет плавный монотонный, с небольшим возрастанием во времени характер. При этом пара трения с оксидо-керамическим покрытием изнашивается несколько меньше, что объясняется более высокой износостойкостью оксидной керамики. В обоих вариантах пар трения величина износа на выбранном отрезке не превышает

$\mu_f$



Концентрация полимера в порошковой смеси, г/кг

Рисунок 7. Изменение  $\mu_f$  в материале с металло-полимерным покрытием при изменяющейся концентрации полимера

$0,32 \cdot 10^{-8}$  м/м, что подтверждает целесообразность использования алюминиевых изделий с данными композициями на поверхности в условиях интенсивного трения.

Изучали также величину и скорость изменения коэффициента трения в паре литейный алюминиевый сплав-металло-полимерное покрытие с разной концентрацией полимера в покрытии. Рис. 7 иллюстрирует изменение коэффициента трения в начальной стадии ( $\mu_{fi}$ ) испытаний, перед выходом на стабильный режим ( $\mu_{fo}$ ) и изменение триботехнических характеристик при работе материала в стабильном режиме –  $\mu_{f\ stable}$ .

Из данного графика следует, что величина коэффициента трения в данной композиции зависит от концентрации полимера в металло-полимерной смеси на всех стадиях проведения испытаний: в начальной стадии  $f_i$  коэффициент трения изменяется хаотично, и установить закономерность влияния состава металло-полимерной смеси, определяющей толщину и равномерность формируемого покрытия на поверхности алюминиевого образца, в процессе его формирования с помощью оборудования марки «TAWA-twin-wire arc (TWA) gun» весьма затруднительно.

Такие неподконтрольные изменения коэффициента трения предположительно могут быть обусловлены перераспределением разного количества полимера в металлической матрице металло-полимерной порошковой смеси под действием сильного турбулентного движения внутри газовой струи при нанесении металло-полимерной смеси на алюминиевую подложку, что является причиной неомогенности состава и толщины сформированного антифрикционного слоя.

Немного более стабильно коэффициент трения изменяется в зависимости от содержания полимера в покрытии при выходе на стабильный режим испытаний –  $f_o$ .

Характер изменения  $\mu_f$  при работе материала в стабильном режиме –  $\mu_{f\ stable}$  свидетельствует о произошедшей приработке поверхности трения изучаемой композиции во всех ее вариантах – т.е. с различным количеством полимера в составе покрытия. Объяснить это можно достаточно равномерным перераспределением мелких капель полимера по поверхности трения в процессе приработки.

При этом ход кривых, описывающих изменение коэффициента трения, позволяет определить оптимальное количество полимера в порошковой смеси: в данном исследовании при заданном изменении концентрации полимера от 0,2 до 1,5 г/кг оптимальным является содержание полимера от 0,95 до 1,1 г/кг.

#### **Заключение.**

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Показать, что эффективным средством совершенствования узлов и механизмов в машиностроении является формирование в их критических зонах функционально-адаптированных покрытий, обеспечивающих улучшение рабочих характеристик.

2. Разработать и оптимизировать составы пар трения и подготовить две группы композиционных материалов: литейный алюминиевый сплав-покрытие на основе оксидной керамики, полученный методом анодного микродугового оксидирования, и литейный алюминиевый сплав-покрытие на базе металло-полимера, созданный методом газо-термического напыления.

3. Установить необходимость создания в работоспособных парах трения покрытий с равномерным рельефом поверхности и разветвленной пористостью для задержания смазки и эффективной работы в условиях трения.

4. Сделать вывод, что для создания работоспособных пар трения на основе литейных алюминиевых сплавов, функционирующих в условиях интенсивного механического износа и трения, выбор режимов формирования функциональных покрытий указанными методами, определяющими их свойства, состав и конечный рельеф, должен обеспечить стабильное поведение создаваемых композиций металл-покрытие в течение длительного периода эксплуатации.

5. Доказать посредством изучения топографии поверхности созданных покрытий, анализа параметров их рельефа, контроля микротвердости и пористости, измерения коэффициента трения и величины износа в принятых условиях эксперимента, что выбранные для изучения пары трения эффективны для изделий машиностроительного комплекса при их работе в условиях интенсивного механического износа и трения.

6. Показать высокую работоспособность предложенных композиций в условиях ограниченной смазки с перспективой сохранения сниженного коэффициента трения и небольших величин износа.

7. Утверждать, что оптимизация параметров получения таких материалов позволит не только улучшить свойства изделий из них, но обусловит появление новых легких и дешевых композиций для изделий машиностроительного комплекса.

8. Отметить, что изменение состава поверхности трения и режимов ее формирования дает возможность влиять на условия эксплуатации, дизайн узлов и механизмов, изготовленных из исследованных композиций.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чигринова, Н. М. Механизм управления технологией анодного микродугового оксидирования для получения покрытий заданной толщины и качества / Н. М. Чигринова // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Минск, 25–27 марта 2009 г. – Минск, 2009. – С.115–117.

2. Чигринова, Н. М. Новые перспективные материалы для узлов трения / Н. М. Чигринова, А. Ф. Ильющенко, Н. А. Шипица, М. А. Андреев // Проблемы космической триботехники «Космотриб–2004»: материалы семинара, Гомель, 26–28 августа 2004 г. – Гомель, 2004. – С. 14–19.

3. Витязь, П. А. Теория и практика газотермического напыления / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манойло. – Минск: Беларуская навука, 1993.

4. Артемова, С. Ю. Формирование микроплазменными методами защитных оксидных покрытий из водных электролитов различного химического состава и степени дисперсности: С.Ю. Артемова, Автореф. дис. канд. хим. Наук.–М., 1996.–22 с.

5. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов // Международный опыт: под ред. канд. техн. наук Н. А. Табачниковой. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.

6. Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay. ASME B46.1–2002–IDT.

7. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электрохимическим воздействием: дис. ... д-ра техн. наук / Н. М. Чигринова. – Минск, 2010.– 310 с. с приложениями на 265 с.

8. Чигринова, Н. М. Разработка и оптимизация технологических приемов формирования композиционных покрытий на основе порошковых смесей и оксидной керамики с использованием микроплазменных воздействий и компьютерного моделирования / Н. М. Чигринова, В. В. Чигринов // The Fourth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulations of Materials Technologies, Ariel, Israel, 11–15 September, 2006. – Ariel, 2006. – Pp. 43–48.

9. Снежко, Л. А. Энергетические параметры процесса получения силикатных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда / Л. А. Снежко, В. И. Черненко // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 2. – С. 25–28.

Поступила в редколлегию 30.04.2019 г.