

готовлении манекенов. Изгиб полуформы на участке h_1 , согласно формуле (6) составил всего 0,007 мм, поэтому этой величиной можно пренебречь.

Используя разработанную методику прочностного расчёта послойных полуформ и традиционный алгоритм рационального выбора пластмасс [1] определено, что для изготовления слоев полуформы следует использовать полистиролы, что позволяет изготавливать полуформы по технологии послойного синтеза с гарантированным запасом прочности для любых видов промышленных манекенов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Каменев Е.И., Мясников Г.Д., Платонов М.П. Применение пластических масс: Справочник. – Л.: Химия, 1985. – 448 с.

УДК 691.9.048.4

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭФФЕКТ В ТЕХНОЛОГИИ АНОДНОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ (АМДО)

Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев
(НИИ порошковой металлургии, г. Минск)

Возросшие требования к различным узлам машин и агрегатов, постоянный рост цен на сырьевые и энергоресурсы, необходимость дополнительных затрат для воспроизводства изнашиваемых комплектующих и т.д. приводят к необходимости поиска новых решений по обеспечению качества и повышению ресурса рабочего времени данных изделий наряду со снижением их себестоимости. Логично, что продление срока службы изделий и сокращение стоимостных затрат может быть обеспечено за счет более долговременной эксплуатации комплектующих путем нанесения специальных защитных покрытий [1].

К таким покрытиям относятся покрытия на основе оксидно-алюминиевой керамики, которая в настоящее время наносится различными методами.

Наиболее перспективным методом, гарантированно обеспечивающим требуемое качество покрытия при малой энергоемкости метода, является анодное микродуговое окисление (АМДО) /2/.

В НИИ порошковой металлургии (НИИ ПМ) разработана технология формирования указанным методом функциональных керамических покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов различной номенклатуры, позволяющая повысить уровень служебных свойств изделий, продлить срок их службы, обеспечив тем самым экономию материальных, энергетических и трудовых затрат на производство новых изделий. Процесс АМДО позволяет формировать на поверхности любых конструктивных форм керамические покрытия с регулируемым коэффициентом объемного и линейного расширения, что уменьшает уровень внутренних напряжений в системе покрытие - подложка. Кроме того, диффузионная природа формируемых при АМДО покрытий гарантирует их высокие адгезионные свойства /3/.

Процесс АМДО осуществляется на стандартном оборудовании МДО-2, включающем силовой трансформатор, формирующий на анодном выходе импульсное напряжение частотой 150 Гц с регулируемой амплитудой импульсов от 0 до 540 В, установку МДО, состоящую из силового блока и блока управления.

Нанесение покрытий проводили в электролитической ванне из нержавеющей стали, стенки и дно которой являлись одновременно катодом. Кроме того, с целью перемешивания электролита ванна оборудована специальным устройством для воздушного барботирования электролита. С целью охлаждения электролита электролитическая ванна помещена в металлический кожух с принудительным охлаждением проточной водой.

Цель работы - получение работоспособных покрытий с требуемыми свойствами на алюминиевых сплавах различной номенклатуры с одновременным снижением ресурсозатрат процесса АМДО. Данная цель решалась в 2 этапа:

1. Разработка эффективного состава электролита для формирования на подложках из литейных и деформируемых алюминиевых сплавов сплошного керамического слоя требуемой толщины с высокими характеристиками тепло- и износостойкости в диапазоне температур от 20 до 400° С.

2. Изучение влияния электрофизических параметров процесса на кинетику формирования покрытия и энергоемкость процесса.

Были проведены исследования особенностей процесса АМДО в электролитах на основе кремниевокислого натрия с различными добавками:

Состав 1: Na_2SiO_3 ;

Состав 2: $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$;

Состав 3: $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_4\text{Ba}_2\text{O}_7$; Состав 4: $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$.

Режим проведения процесса - гальваностатический, плотность тока - 4 $\text{A}/\text{дм}^2$, время нанесения покрытия - 60 минут.

В качестве экспериментальных образцов были подготовлены пластины размером 15x30 см и толщиной 1 мм, изготовленные из литейного сплава АК9М2.

В процессе проведения экспериментов контролировались: напряжение U ; анодный ток I , толщина покрытия h ; время формирования покрытий t , которое во всех случаях составляло 60 мин. Значения I и U фиксировали по показаниям амперметра и вольтметра, смонтированных на блоке управления установки (БУ). Толщина сформированного слоя h измерялась с помощью специальной мерительной скобой с ценой деления индикаторной головки - 1 мкм. Время t отслеживалось по показаниям таймера, также установленного на БУ.

Анализ полученных данных показал, что в электролите 1 анодный ток на 40 минуте практически стабилизировался, а рост покрытия прекратился, что свидетельствует о невозможности получения в составе 1 покрытий на сплаве АЛ-25 толщиной более 30 мкм. Введение в состав 1 кремниевой кислоты (состав 2) позволило несколько сократить время нарастания толщины покрытия, однако для получения необходимой толщины покрытия (80-120 мкм) необходимо не менее 2 часов, что делает данный вариант не пригодным с экономической точки зрения. Бура, как показали исследования, оказывает влияние лишь на процесс пассивации оксидной пленки, а при достижении толщины покрытия 50 мкм последнее отслаивается, т.е. использование состава 3 также нецелесообразно, так как не обеспечивает возможности получения покрытий требуемой толщины. Наиболее эффективным для решения поставленной задачи является электролит состава 4, который позволяет формировать на подложках из литейных алюминиевых сплавов покрытия толщиной до 70 мкм с заданными свойствами, однако замечено, что при толщине покрытия свыше 70 мкм наблюдается рост муллитной фазы по краям образца.

Таким образом, на основании полученных данных и с учетом составов исследованных электролитов был разработан окончательный вариант электролита - состав 5, сочетающий основные ингредиенты электролита 4 в определенном со-

отношении с добавками небольших количеств специальных химических ингредиентов для предотвращения образования муллитных фаз.

При исследовании влияния электрофизических параметров ведения процесса нанесения покрытий проводили в гальваностатическом режиме (ГР) и потенциодинамическом режиме (ПР). Особенностью ГР является заданность первоначальной плотности тока при постепенном нарастании анодного напряжения до величины, необходимой для начала процесса искрения и выхода на режим АМДО. а ПР отличается от ГР тем, что первоначально задается рабочее напряжение, а плотность тока уменьшается по мере роста оксидного слоя.

При проведении АМДО в ГР первоначальную плотность тока, j изменяли в пределах 1-6 А/дм² с периодичностью нарастания 1 А/дм², так как ранее было установлено, что при значениях $j < 1$ А/дм² выход на режим искрения значительно затруднен, а при $j > 6$ А/дм² ведение процесса нецелесообразно ввиду того, что при таких значениях плотностей тока электролит сильно нагревается, что приводит к необходимости принудительного прекращения процесса через 10-12 минут вследствие отрицательного влияния на качество формируемых слоев.

При проведении АМДО в ПР задаваемое напряжение изменялось в диапазоне 210 - 360 В. Выбор данного диапазона также обусловлен критическими значениями напряжения искрения и обеспечения стабильного протекания процесса АМДО.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в ГР нанесения покрытий, независимо от величины первоначальной плотности тока, напряжение с течением времени растет по экспоненциальной зависимости.

Также было замечено, что изменение величины первоначальной плотности тока не влияет на величину напряжения искрения $U_{и}$, которое для всех образцов было равным 270 В (рис. 1)

Однако, продолжительность процесса АМДО и качество формируемых покрытий в указанном режиме в значительной степени зависит от величины первоначальной плотности тока. Установлено, что при первоначальной плотности тока $j = 1-2$ и 5-6 А/дм² проведение процесса АМДО нецелесообразно. Это обусловлено тем, что при плотностях тока 1-2 А/дм² значительно увеличивается время проведения процесса (только выход на режим искрения составляет порядка 40-45 минут) и, кроме того, толщина покрытия ограничена в пределах не более

5 мкм, что подтверждается как теоретическими расчетами, так и практически полученными результатами.

Зависимость изменения напряжения формирования покрытия
от времени АМДО

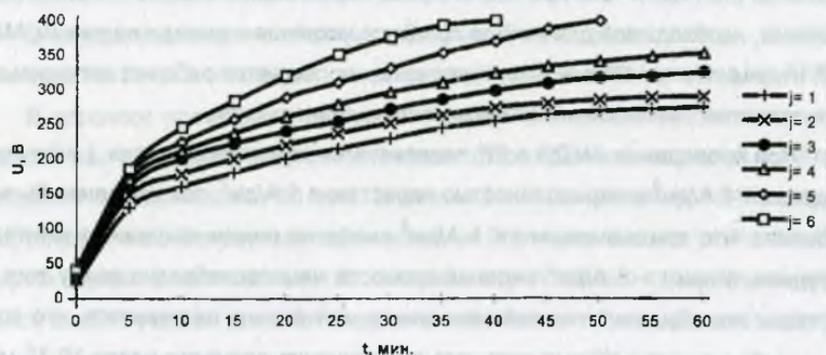


Рис. 1

Числовые данные к рис. 1

Время	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6
0	20	30	30	35	40	40
5	130	148	160	170	180	185
10	160	178	200	211	224	245
15	180	200	222	237	257	283
20	200	220	240	260	288	319
25	215	237	254	278	310	350
30	230	252	272	296	330	375
35	245	264	286	310	353	393
40	255	275	299	324	370	400
45	265	281	310	334	388	
50	270	286	318	341	400	
55	273	290	320	348		
60	275	291	326	353		

При j равном 5-6 А/дм^2 , несмотря на быстрый выход процесса на режим микродугового оксидирования (порядка 10-15 мин.), формирование равнотолщинного сплошного покрытия - не менее 45 мкм толщиной затруднительно вследствие интенсивного разогрева электролита (его температура достигает 85-90 °С) и высокой напряженности электрического поля. Это чревато срывом микрораз-

рядов в дуги, что приводит к возникновению локальных зон пробоя сформированного покрытия, а следовательно, к ухудшению качества сформированного слоя, потере внешнего вида и снижению рабочих свойств.

Покрытия, сформированные в указанном режиме, как правило, высокопористы, значительно гидратированы и содержат в своем составе от 10 до 20 % анионов электролита, встроенных в структуру покрытия. При эксплуатации таких покрытий составляющие электролита и вода удаляются из структуры оксидного слоя, что приводит к его разрыхлению и снижению заданных свойств [4].

Наиболее приемлемые результаты были получены при $j = 3-4 \text{ А/дм}^2$. При этом выход на режим искрения составил порядка 25-30 минут, а дальнейший рост оксидируемого слоя по истечении времени проведения эксперимента (60 мин.) доказывает целесообразность нанесения покрытий на экспериментальные образцы именно при таких значениях плотностей тока.

Полученные покрытия имели фазовый состав на основе корундоподобной оксидной керамики с высокими характеристиками сплошности и плотности, обладали однородным светло-серым цветом без признаков растравливания и вспучиваний, микроструктурой, гарантирующей получение стабильной износостойкости, высокой адгезией к материалу основы, толщина покрытия составляла 35-45 мкм.

Проведение процесса АМДО в ПР обусловлено тем, что скорость процесса формирования покрытия требуемой толщины заметно выше, чем при ГФ. Это является немаловажным фактором с точки зрения снижения себестоимости покрытия, так как уменьшение времени образования слоя требуемой толщины обуславливает заметное сокращение энергозатрат.

Как было отмечено выше, при проведении исследований диапазон задаваемых напряжений ограничивался 210 - 360 В, т.к. ниже 210 В выход на режим микро-дугового оксидирования сплава АМг-2 не наблюдался, а выше 360 В микро-разряды, минуя стадию АМДО, срываются в дугу. Всего было проведено 6 серий экспериментов, при этом первоначально задаваемое значение напряжения изменялось дискретно с шагом 30 В.

Анализ полученных данных показал, что в ПР анодный ток с течением времени снижается по экспоненциальной зависимости (рис. 2).

При этом для диапазона 210-270 В характерно резкое снижение величины анодного тока в течение 5-10 мин., после чего ток практически не изменяется. В

результате выход на режим АМДО составляет порядка 50 и более минут, за которые электролит успевает нагреться до температуры кипения.

Зависимость анодного тока от времени от времени АМДО
в потенциодинамическом режиме

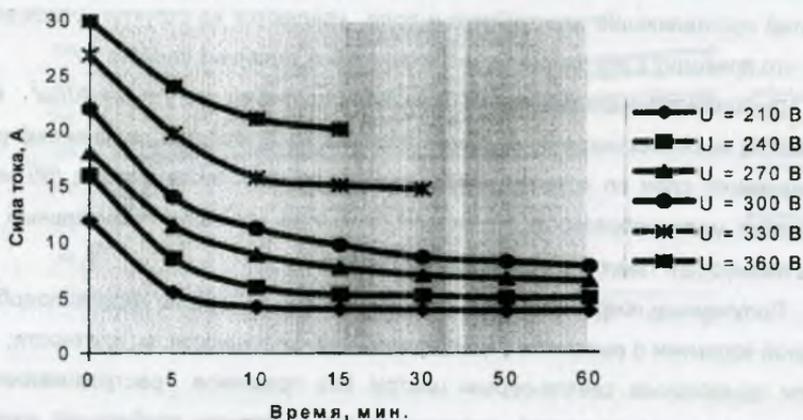


Рис. 2

Числовые данные к рис. 2

	U = 210 В	U = 240 В	U = 270 В	U = 300 В	U = 330 В	U = 360 В
0	12	16	18	22	26.9	30
5	5.6	8.6	11.5	14	19.7	24
10	4.2	6	9	11.2	15.7	21
15	4	5.3	8	9.7	15	20
30	3.9	5.2	7.3	8.6	14.6	
50	3.8	5	6.7	8.2		
60	3.8	5	6.5	7.8		

При значениях $U > 300$ В, процесс АМДО ограничен временным интервалом, выделенным на рис. 4 жирной линией, после чего происходит срыв разряда в дугу, чреватый образованием на обрабатываемой поверхности прожогов и очагов последующего питтинга.

Толщина покрытий, сформировавшихся во время искрения, во всем указанном интервале напряжений не превышает 10 мкм.

Таким образом, при нанесении покрытий в ПР оптимальными являются значения 270 и 300 В. Полученные при таких напряжениях покрытия характеризуются

ются 100 % сплошностью и высоким уровнем адгезии к основе, имеют приятный серый цвет, толщина покрытий составляет 40-55 мкм.

Оценивая энергосберегающий эффект при формировании покрытий методом АМДО в его различных вариантах посредством анализа зависимости затраченной мощности от времени нанесения покрытия можно сделать вывод, что в ПР уровень энергозатрат в 5-10 раз ниже, чем в ГР, однако при этом снижается плотность самого покрытия. Поэтому при выборе того или иного режима необходимо исходить из конкретных требований к покрытию.

Так, при нанесении покрытий методом АМДО на поршни дизельных двигателей внутреннего сгорания минимальная толщина покрытия ограничена 60 мкм, поэтому целесообразно применять ПР. При этом обеспечивается не только требуемая толщина покрытия, но и происходит сближение коэффициента термического расширения (КТР) покрытия с КТР основы, что имеет большое значение, учитывая условия эксплуатации поршней.

При нанесении покрытий на ролики шпуляльника для вытягивания стекловолокна целесообразно, напротив, применять ГР, так как в основе требований к таким покрытиям лежит их минимальная толщина при минимально возможной пористости.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Каракозов Э.С., Чавдаров А.В., Барыкин Н.В. Микродуговое оксидирование - перспективный процесс получения керамических покрытий. // Сварочное производство, 1993, № 6. С.20-24.
2. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодным электролизом. - Л.: Химия, 1991, 181 с.
3. Научно-технический отчет / Разработать и освоить технологию формирования методом анодного микродугового оксидирования керамических термостойких покрытий на рабочих поверхностях поршней высокофорсированных двигателей. Чигринова Н.М. и др. // № гос. регистрации 19972504, НИИ ПМ с ОП, Минск, 1998. 161 с.
4. Тимошенко А.В. и др. Микродуговое оксидирование сплава Д16Т на переменном токе в щелочном электролите // Защита металлов, Т.27, №3, 1991. С. 417-424.