

Применение барьерных слоев при получении наноструктурированных электроискровых покрытий повышенной толщины на алюминиевых сплавах

В. И. Юрченко^a, Е. В. Юрченко^a, *А. И. Дикусар^{a, b}

^aПриднестровский госуниверситет им. Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь

^bИнститут прикладной физики,

г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, *e-mail: dikusar@phys.asm.md

Рассматривается возможность получения электроискровых наноструктурированных покрытий повышенной толщины на алюминиевых поверхностях при использовании обрабатываемого электрода из сплава Al-Sn с помощью нанесения промежуточных барьерных слоев разного химического состава. Показано, что при нанесении толстостенных наноструктурированных электроискровых покрытий из сплава Al-Sn путем многослойного нанесения в качестве барьерных слоев можно использовать сплавы Al-Ni, Al-Fe, Al-Si при содержании легирующих элементов ~ 20%.

Ключевые слова: электроискровое легирование, алюминиевые сплавы, наноструктурированное покрытие повышенной толщины, барьерный слой.

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.5281/zenodo.1345710

Восстановление и упрочнение изношенных деталей машин многие годы не теряют своей актуальности, а в современных условиях, когда возникли значительные ограничения в использовании финансовых и материальных ресурсов, тема восстановления изношенных деталей приобретает особое значение. Уменьшение затрат на ремонт путем восстановления изношенных деталей является одним из основных путей снижения себестоимости ремонта техники и оборудования.

В современных машинах различного назначения все шире применяются детали из алюминиевых сплавов. Только за последние 10 лет применение алюминиевых сплавов, например в сельскохозяйственном машиностроении, увеличилось более чем в 3 раза [1]. В автомобильном транспорте применяются десятки наименований деталей, выполненных из алюминиевых сплавов, которые выходят из строя в результате износа: головки и блоки цилиндров двигателей, картеры рулевых механизмов, корпуса водяных насосов и компрессоров, картеры сцепления, поршни двигателей, крышки генераторов, кронштейны, радиаторы двигателей и кондиционеров и т.д.

Расширяющееся применение алюминиевых сплавов обусловлено их преимуществами [2]: малым удельным весом, высокой удельной прочностью, хорошей коррозионной стойкостью, высокой тепло- и электропроводностью. Большое значение имеет и способность алюминиевых сплавов к формоизменению: они хорошо льются, прокатываются, штампуются, обрабатываются резанием. При этом сырьевые ресурсы для производства алюминия практически не

ограничены, так как алюминий является самым распространенным металлом в природе [3]. Поэтому можно предположить, что в будущем его применение станет только расширяться.

Увеличению сферы использования алюминиевых сплавов для изготовления пар трения препятствуют невысокие эксплуатационные свойства – низкая твердость и износостойкость поверхности. Устранение этих недостатков связано с улучшением состава и качества поверхностных слоев изделий путем применения современных методов упрочнения за счет поверхностной обработки алюминиевых сплавов.

До недавнего времени самыми распространенными способами ремонта изношенных алюминиевых деталей являлись различные способы наплавки и сварки, из которых чаще всего использовалась аргонно-дуговая сварка. Недостатком этого и других подобных способов наплавки является значительная мощность установок (5 кВт и более), что приводит при осуществлении процесса наплавки к значительному тепловложению в деталь, которое вызывает коробление и необходимость последующей механической обработки.

В настоящее время разрабатываются новые способы и технологии нанесения покрытий, в том числе и на алюминиевые сплавы. Для повышения износостойкости деталей получают все большее развитие технологии нанесения покрытий, использующие высококонцентрированные источники энергии [4]. Применительно к алюминиевым сплавам – это упрочнение поверхностей ионной имплантацией кислородом, электроискровым легированием, ионно-плазмен-

Привес (или унос) при нанесении покрытия повышенной толщины на сплав Д1 электродами Al-Sn

Материал образца (подложка)	Материал электрода	Режим работы («Alier-31»)	Количество слоев	Масса привеса (уноса) $\times 10^{-3}$ г	Примечания
Д1	АО20-1 (Al-Sn)	Р6 А0,5 К1 (режим 6, амплитуда вибрации 0,5, коэффициент энергии 1)	1 слой	+3	Слои наносятся последовательно один на другой.
			2 слой	+5	
			3 слой	+2	
			4 слой	+2	
			5 слой	+7	
			6 слой	-4	
Д1	АО20-1 (Al-Sn)	Р6 А0,5 К1 (режим 6, амплитуда вибрации 0,5, коэффициент энергии 1)	1 слой	+9	Слои наносятся последовательно один на другой.
			2 слой	+5	
			3 слой	+7	
			4 слой	+1	
			5 слой	-12	
			4 слоя	-12	Взвешивание проводится после нанесения подряд четырех слоев.

ным напылением, микродуговым оксидированием, излучением оптических квантовых генераторов, оксидированием в плазме тлеющего разряда, анодированием и т.п. Из всех перечисленных способов наиболее простым, надежным и удобным для применения в ремонтном производстве является электроискровое легирование (ЭИЛ), которое обеспечивает высокую сцепляемость покрытия с деталью, возможность локального нанесения покрытия без сложной предварительной подготовки поверхности, получение покрытия с заданными функциональными свойствами. Оборудование для нанесения электроискрового покрытия простое, легкое и компактное, [5], допускающее в некоторых случаях ремонт деталей даже в полевых условиях. ЭИЛ позволяет получать на поверхности алюминиевых деталей покрытия из различных материалов довольно простым способом как в технологическом отношении, так и в аппаратном оформлении, что является его большим преимуществом.

Одним из недостатков способа ЭИЛ является малая толщина получаемого покрытия – $0,05 \div 0,2$ мм [5], что обусловлено возникновением в процессе ЭИЛ внутренних напряжений, приводящих к разрушению покрытия [6].

В то же время статистика ремонта машин, в том числе сельскохозяйственных, показывает, что четверть деталей, поступающих в ремонт, имеет износ более 0,2 мм, а в некоторых случаях износ достигает $0,4 \div 0,5$ мм. Поэтому получение покрытий повышенной толщины с помощью ЭИЛ является важной как научной, так и практической задачей.

Ранее было установлено [7, 8], что при нанесении на образцы из алюминиевого сплава

покрытия из алюминиевого сплава АО20-1 (Al-Sn) износостойкость его возрастала на порядок и часто превышала износостойкость закаленной стали. Основная причина такой особенности получаемого покрытия состояла в том, что покрытия подобного рода являются наноструктурированными композитами. В алюминиевую матрицу при электроискровом легировании были внедрены нано- и микронити SnO_2 [8]. Однако получить покрытия повышенной толщины оказалось затруднительно, так как при нанесении 4÷5 слоев, то есть при повышении удельного времени обработки более 180 с/см^2 , согласно [9], начиналось хрупкое разрушение ранее нанесенного покрытия (см. таблицу).

Очевидно, что накапливающиеся при электроискровом легировании в покрытии внутренние напряжения и их превышение определенного критического уровня на 5÷6 слое приводят к разрушению уже полученного покрытия [6]. Именно такое положение заставляет искать способы увеличения толщины покрытия при ЭИЛ алюминиевых сплавов. Многочисленными исследованиями определены способы получения покрытий повышенной толщины с помощью ЭИЛ.

Наиболее полно эти способы отражены в работах [11, 12]. Однако все указанные способы относятся к покрытиям на стальных и чугунных деталях. Детали из алюминиевых сплавов имеют особенности [12], которые не дают возможности в полной мере применить указанные способы. Кроме того, к особенностям алюминиевых сплавов относятся:

- низкая температура плавления: 660°C ;
- высокая теплопроводность: $236 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$;
- низкая плотность: $2,7 \text{ т/м}^3$;

- низкое электросопротивление: $2,6 \times 10^8$ Ом \times м;
- высокий коэффициент линейного расширения: 24×10^{-6} °С;
- наличие на поверхности деталей трудноудаляемой окисной пленки с температурой плавления более 2000°С.

Большая часть способов, указанных в работе [11], требует дополнительного оборудования, что нежелательно, так как удорожает процесс нанесения покрытия. Поэтому из известных способов [11] было выбрано периодическое нанесение промежуточных (барьерных) слоев, которые позволили бы получать многослойное покрытие заданной толщины. Предполагалось, что и на алюминиевых сплавах можно подобрать такие барьерные слои, которые позволят наносить покрытия многократно без привлечения дополнительного оборудования.

Анализ микроструктур и диаграмм состояния показал, что такие сплавы, как Al-Zn, Al-Ni, Al-Si, Al-Fe, Al-Cu, при содержании ~ 20% легирующего элемента образуют твердые растворы, которые по структуре в значительной степени отличаются от матрицы-сплава Д1. Твердые растворы, образуемые при сплавлении этих металлов с Al, могли бы быть изоляторами предыдущих слоев и способствовать нанесению покрытий повышенной толщины.

Цель данной работы – исследование возможности получения электроискровых наноструктурированных покрытий повышенной толщины на алюминиевых поверхностях при использовании обрабатывающего электрода из сплава Al-Sn, с помощью получения промежуточных барьерных слоев разного химического состава.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для нанесения покрытия применялась установка для электроискрового легирования «Alier-31» фирмы Scinti (Молдова). При этом использовались режимы (P) 3÷6, амплитуды колебаний (A) 0,5÷1,0, коэффициенты энергии (K) 0,6÷1,0.

В качестве электрода для получения наноструктурированного покрытия использовался электрод из Al-Sn диаметром $d = 4$ мм. Для получения барьерных слоев применялись специально отлитые для этой цели стержни диаметром $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $50 \cdot 10^{-3}$ м из сплавов Al-Fe, Al-Ni, Al-Si, Al-Zn, Al-Cu с содержанием легирующих элементов ~ 20%.

Технология изготовления обрабатывающих электродов для электроискрового легирования содержала следующие операции:

- подготовка шихтовых материалов;
- плавка сплава в индукционной печи;

– заливка сплава в изложницу центробежной машины;

– отрезка прибылей, зачистка, обточка конца электрода до получения радиуса $r = 2$ мм.

Например, сплав Al-Fe заданного химического состава расплавлялся в графитовом тигле индуктора высокочастотной установки ВЧИ-10У, а затем разливался в специальную изложницу центробежной машины с вертикальной осью вращения при скорости вращения 800 об/мин.

Элементы (Al и Fe) вводились в расплав алюминия в виде лигатур (50% Al+50% Fe), остальная часть элементов Al вводилась в чистом виде.

Состав шихты на 100 г расплава Al-Fe: 40 г лигатуры Al-Fe состава 50% Al+50% Fe; 60 г чистого Al марки А1.

После затвердевания и охлаждения от стержней отделялась прибыль, стержни зачищались абразивной бумагой, а конец стержней затачивался с радиусом при вершине $r \sim (1 \div 2) \cdot 10^{-3}$ м.

Электроды из других алюминиевых сплавов (Al-Ni, Al-Si, Al-Zn, Al-Cu и др.) изготавливались по этой же методике.

Угар элементов во время плавки не учитывался, так как время расплавления сплава не превышало 50 с. Емкость плавильного тигля – 100 г.

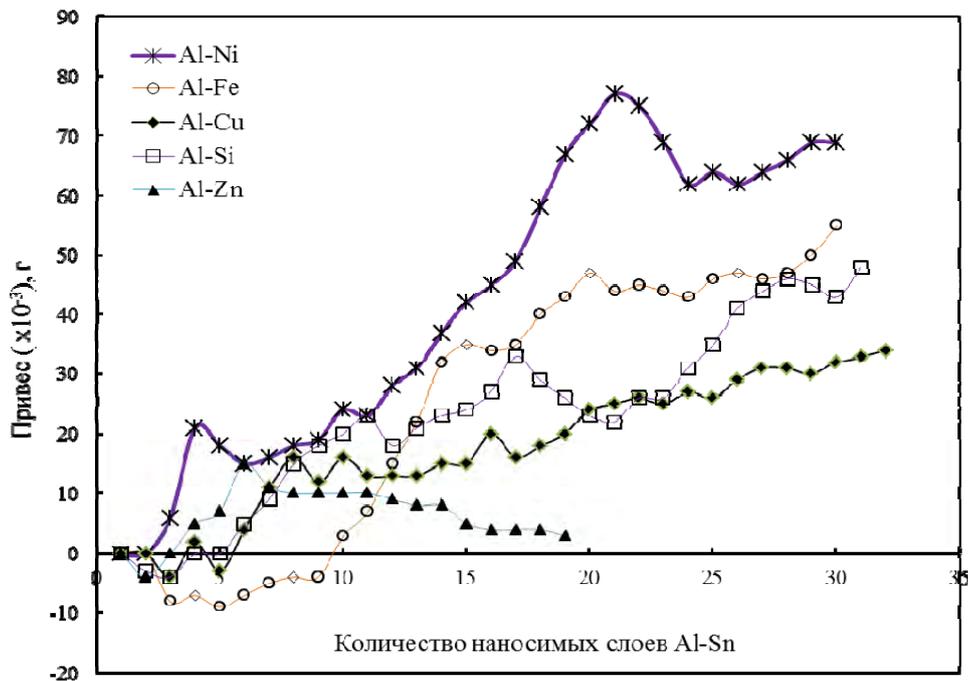
Обрабатывающие электроды из сплавов Al-Sn(АО20-1) изготавливались по методике, изложенной в [7, 8].

Покрытия наносились на пластины из сплава Д1 (ГОСТ 4784) размером 25×25×3 мм. Скорость нанесения покрытия составляла 5 см²/мин. В процессе ЭИЛ определялся привес катода путем взвешивания образцов до и после нанесения каждого слоя покрытия на весах ВЛР100.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для выбора оптимального состава электродов при создании барьерного слоя в условиях нанесения покрытия обрабатывающим электродом из сплава Al-Sn на подложку из сплава Д1 было проведено несколько серий экспериментов с изменением режимов работы электроискровой установки «Alier-31».

Эксперименты были направлены на то, чтобы, применяя вышеуказанные сплавы Al, получить сплавы алюминия с ~ 20% легирующих элементов и определить оптимальный химический состав сплава, используемого в качестве барьерного слоя. Предварительно было показано, что наиболее эффективным режимом для нанесения барьерных слоев оказался режим б (энергия импульса (ЭИ) = 1,58 Дж, длительность



Зависимость привеса образцов из сплава Д1 от количества наносимых слоев электродом из сплава Al-Sn с использованием промежуточных барьерных слоев (Al-Cu, Al-Ni, Al-Si, Al-Zn).

импульса 500 мкс, амплитуда тока 175 А, частота импульсов 100 Гц).

Результаты этой серии экспериментов приведены на графике (см. рисунок).

Анализ рисунка показывает, что указанные в таблице сплавы по эффективности действия «барьерных» слоев можно разделить на следующие группы:

- сплавы Al-Ni, Al-Fe, Al-Si;
- сплав Al-Zn;
- сплав Al-Cu занимает промежуточное положение.

Судя по результатам экспериментов, сплавы первой группы могут служить «барьерными» слоями при нанесении покрытий сплавом Al-Sn на подложку из алюминиевого сплава Д1. Сплавы первой группы (Al-Ni, Al-Fe, Al-Si) отличаются друг от друга степенью эффективности. Наиболее эффективен в качестве «барьерного» слоя сплав Al-Ni, который обеспечивает многократное нанесение покрытий из сплава Al-Sn с общим привесом $72 \cdot 10^{-3}$ г.

Технология использования барьерных слоев заключается в следующем: обычно при нанесении сплава Al-Sn в 4÷5 слоев наступает унос уже полученного покрытия. В этот момент необходимо нанести барьерный слой из сплава Al-Ni, после чего можно наносить еще от 4 до 10 наноструктурированных слоев сплава Al-Sn, увеличивая общую толщину покрытия. Таким же образом в качестве барьерного слоя можно применять сплав Al-Fe. Оба сплава обеспечивают привес и относительно равномерное нанесение покрытия.

На практике при ремонте алюминиевой детали «крышка насоса» при нанесении покрытия из сплава Al-Sn и применении барьерного слоя Al-Ni удалось получить покрытие толщиной 0,5 мм на сторону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведенных экспериментов, можно заключить, что при нанесении толсто-стенных наноструктурированных электроискровых покрытий из сплава Al-Sn путем многослойного нанесения возможно использование технологии «барьерных» слоев. Показано, что в качестве таковых целесообразно использование обрабатывающих электродов из сплавов Al-Ni, Al-Fe, Al-Si при содержании легирующих элементов ~ 20%. Сплавы Al-Zn и Al-Cu в качестве барьерных слоев применять нецелесообразно.

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования АН Молдовы (проект №15.817.02.05.A) и Приднестровского госуниверситета им. Т.Г. Шевченко, а также европейского проекта H2020 Smartelectrodes (778352).

ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий В.М., Кривов Г.А. *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*. Киев: Коминтех, 2005. 156 с.
2. Арзамасов П.Л. *Материаловедение. Справочник*. М.: изд. МГТУ, 2002. 653 с.
3. Фетисов Г.П. и др. *Материаловедение и технология металлов*. М.: Высшая школа, 2001. 421 с.

4. Белый А.В., Макушок Е.М., Поболь И.Л. *Поверхностная и упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии*. Минск: «Навука і тэхніка», 1990. 79 с.
5. Бурмукулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В. и др. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)*. Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с.
6. Гитлевич А.Е., Парканский И.Я., Игнатьков Д.А. *ЭОМ*. 1986, (3), 25–30.
7. Юрченко Е.В., Юрченко В.И., Дикусар А.И. *Наноинженерия*. 2013, (2), 12–24.
8. Yurchenko V.I., Yurchenko E.V., Fomichev V.M., Varanov S.A. et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2009, **45**(4), 259–264.
9. Абрамчук А.П., Михайлов В.В., Бовкун Г.А., Ткаченко Ю.Г. *ЭОМ*. 1990, (2), 20–22.
10. Величко С.А., Сенин П.В., Иванов В.И. и др. *ЭОМ*. 2016, **52**(5), 13–20.
11. Иванов В.И. *Труды ГОСНИТИ*. 2013, **113**, 429–434, 450–455.
12. Михайлов В.В., Абрамчук А.П. *ЭОМ*. 1986, (2), 36–41.

Поступила 10.04.18

Summary

A capability of obtaining electrospark nanostructured coatings of increased thickness on aluminum surfaces using a tool electrode manufactured from Al-Sn alloy via forming intermediate barrier layers of different chemical compositions is considered. It is shown that Al-Ni, Al-Fe, and Al-Si alloys with the content of alloying elements ~ 20% may be used as barrier layers in the process of applying thickened nanostructured electrospark coatings of Al-Sn alloy by a multilayer deposition.

Keywords: electrospark alloying, aluminum alloys, nanostructured coating of increased thickness, barrier layer.