

# Толстослойные наноструктурированные электроискровые покрытия алюминия и его сплавов

В. И. Юрченко<sup>a</sup>, Е. В. Юрченко<sup>a</sup>, \* А. И. Дикусар<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь  
<sup>b</sup>Институт прикладной физики Молдовы, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова,  
 \*e-mail: [aidikusar@gmail.com](mailto:aidikusar@gmail.com)

Поступила 30.05.2019  
 После доработки 04.06.2019  
 Принята к публикации 04.06.2019

Показано, что в условиях электроискрового легирования поверхности алюминиевого сплава (Д1) электродом-инструментом из сплава Al-Sn (20%Sn) при высокой плотности импульсного тока и двухфазной технологии формирования многослойного покрытия (нанесение – оплавление) возможно получение наноструктурированных слоев повышенной толщины (до 2 мм), пригодных для восстановления изношенных поверхностей деталей из алюминиевых сплавов.

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, алюминиевые сплавы, режимы электроискровой обработки, покрытия повышенной толщины, плотность импульсного тока.

УДК 621.9.047.7

DOI: 10.5281/zenodo.3522301

## ВВЕДЕНИЕ

За последние 10 лет количество деталей из алюминиевых сплавов, применяемых, в частности, в сельскохозяйственном машиностроении, возросло более чем в 2 раза. Эта тенденция сохраняется не только в сельскохозяйственном, но и других отраслях машиностроения: автомобильной, текстильной и др. Соответственно выросло количество деталей из алюминиевых сплавов, требующих ремонта и восстановления размеров, изменившихся в результате износа.

Европейский стандарт ИСО22628:2002 [1] предписывает восстанавливать все изношенные детали, в том числе и алюминиевые, независимо от величины износа, так как эта операция позволяет значительно экономить трудовые затраты при производстве аналогичных деталей. Рекомендуется на восстановленных деталях обеспечивать механические свойства (например, износостойкость), улучшающие свойства новой детали, но со стоимостью 60% и менее от стоимости новой.

В настоящее время для восстановления алюминиевых деталей применяются различные способы, включающие разного рода наплавки (аргонодуговая, электродуговая, плазменная и другие виды). Эти способы отличаются тем, что при наплавке детали к узлу подводится большое количество тепла, что ведет к короблению деталей и необходимости проведения дополнительных операций (правка, механическая обработка и т.д.), что удорожает производство. Кроме того,

получение на детали в месте износа в качестве покрытия тонких износостойких слоев толщиной 0,1–0,3 мм путем наплавки практически невозможно. Для этих целей наиболее подходящими являются износостойкие покрытия, полученные с помощью электроискрового легирования (ЭИЛ) [2–4].

Применение ЭИЛ для обработки алюминиевых сплавов описано в [5–11].

В работах [12–16] показано, что при нанесении электроискровых покрытий электродом из Al-Sn (20%Sn) на алюминиевые детали, в частности из сплава Д1, в поверхностном слое образуются микро- и нанонити оксида олова (рис. 1), которые способствуют существенному повышению (в среднем на порядок) износостойкости поверхностного слоя. Повышение износостойкости объясняется тем, что оксиды олова имеют исключительно высокую твердость – HV 1200 ед., что и увеличивает износостойкость всего нанесенного слоя.

Однако толщина этого покрытия, как правило, не превышает 0,2 мм, что недостаточно для восстановления и ремонта алюминиевых деталей. Попытка получения более толстых покрытий (толщиной 0,5–1 мм) путем многослойного нанесения (четырёх и более слоев) приводила при использовании стандартных режимов работы электроискровой установки ALIER31 (SCINTI, Молдова) к разрушению уже нанесенного слоя, как это было показано, в частности в [17].

Анализ литературы выявил одно из перспективных направлений получения покрытий повышенной толщины на стальных деталях с помощью

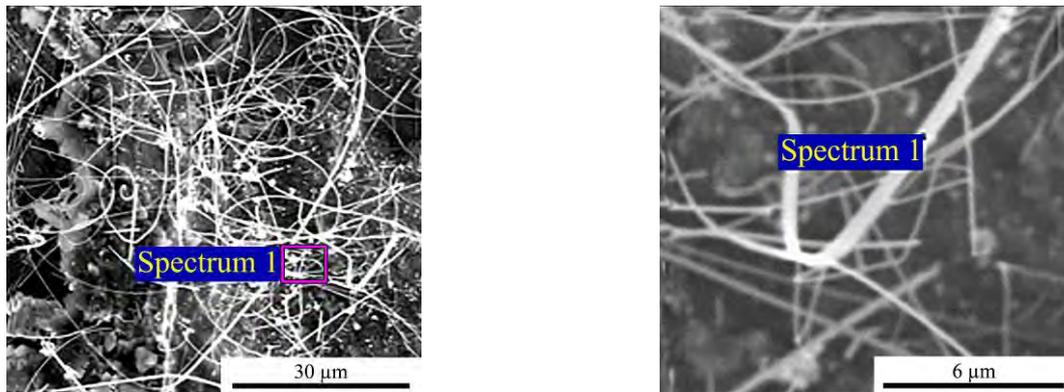


Рис. 1. Поверхность фрагмента образца после электроискрового легирования обрабатываемым электродом Al-Sn (20%Sn) [12].

метода, описанного в [3]. Сущность его заключается в том, что на стальной образец электроискровым легированием (ЭИЛ) наносится покрытие высокой шероховатости предельной толщины, а затем наиболее напряженные верхушки выступов покрытия удаляются, их остатки оплавляются и разравниваются мощными электроискровыми импульсами (рис. 2).



Рис. 2. Схема технологии получения покрытия повышенной толщины.

При многократном повторении на стальных деталях образуется покрытие толщиной 10 мкм и более. Сведения о применении такой технологии восстановления изношенных алюминиевых деталей отсутствуют.

Статистика показывает [18, 19], что при ремонте изношенных деталей около 25–30% имеют износ более 0,3 мм, а в некоторых случаях износ алюминиевых деталей может достигать 1 мм на сторону. Поэтому цель данной работы – изучение возможности получения утолщенных (толщиной 1–2 мм), наноструктурированных и износостойких покрытий на алюминиевых сплавах типа Д1 и разработка технологии с определением оптимальных технологических параметров при использовании электроискровой установки ALIER31 (SCINTI, Молдова).

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

– выявление влияния основных технологических параметров работы электроискровой установки ALIER31 на толщину получаемых покрытий;

– выявление влияния основных технологических параметров работы электроискровой установки ALIER31 на процесс удаления верхушек выступов, оплавление и разравнивание до необходимых параметров оставшейся части покрытия, а также определение оптимального химического состава и диаметра обрабатываемого электрода для осуществления этой процедуры.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Источником питания для ЭИЛ служила электроискровая установка ALIER31 (SCINTI, Молдова), технологические параметры работы которой приведены в табл. 1.

Использовались следующие параметры работы установки ALIER31:

- режимы P2, P4, P6, P7;
- коэффициенты энергии (процент от номинальной частоты импульса на данном режиме);  $K = 0,4(40\%)$ ;  $0,6(60\%)$  и  $1,0(100\%)$ ;
- амплитуды вибрации электрода  $A = 0,5$  и  $A = 1,0$  (при росте  $A$  увеличивалась амплитуда вибрации, ее точное значение не фиксировалось, поскольку определялось многими трудно контролируемыми параметрами).

Использовались электроды из сплава Al-Sn (AO20-1) диаметром  $\varnothing 3$ ,  $\varnothing 5$ ,  $\varnothing 8$  мм.

В качестве образцов были взяты пластины из алюминиевого сплава Д1 размером  $40 \times 20 \times 2$  мм.

В качестве обобщенного параметра, характеризующего скорость и толщину получаемого покрытия, выбрана удельная производительность легирования (УПЛ), которая определялась по формуле:

$$G = \Delta m / (S \cdot T),$$

где  $\Delta m$  – привес (унос) образца после электроискровой обработки, мг;  $S$  – площадь образца,  $\text{см}^2$ ;  $T$  – время обработки, мин.

Время обработки для всех образцов было одинаково. Каждый эксперимент при изменении какого-либо параметра проводился 5 раз.

**Таблица 1.** Параметры технологических импульсов генератора установки ALIER-31

№ п/п	Режим	Длительность импульса, мкс ( $\pm 10\%$ )	Амплитуда тока импульса, А ( $\pm 20\%$ )	Энергия импульса, Дж
1	P1	16	125	0,036
2	P2	31	125	0,07
3	P3	62	175	0,20
4	P4	125	175	0,39
5	P5	250	175	0,79
6	P6	500	175	1,58
7	P7	1000	175	3,15

**Таблица 2.** Влияние технологических параметров работы электроискровой установки ALIER-31 на УПЛ ( $G$  мг/(см<sup>2</sup> мин)) при нанесении покрытия электродами из сплава Al-Sn на пластины из алюминиевого сплава

Коэффициент энергии	$K = 0,2$			$K = 0,6$			$K = 1,0$		
	Диаметры электродов, мм								
Энергия импульса, Дж	8	5	3	8	5	3	8	5	3
Амплитуда вибрации электрода $A = 0,5$									
$G$ мг/(см <sup>2</sup> мин)									
0,07	1,4	3,4	7,2	3,4	6,2	6,5	4,8	7,4	8,4
0,39	3,0	4,2	7,4	4,0	7,6	7,7	6,2	13,0	14,6
1,58	4,2	4,8	7,6	4,6	8,6	13,2	7,4	14,8	16,1
3,15	3,8	5,6	7,2	5,4	9,8	13,8	8,8	17,6	19,6
Амплитуда вибрации электрода $A = 1,0$									
$G$ мг/(см <sup>2</sup> мин)									
0,07	6,4	4,6	6,2	4,0	6,4	4,6	4,6	9,0	11,8
0,39	6,4	6,0	6,4	4,6	8,6	8,4	6,6	13,6	23,2
1,58	6,6	8,0	7,0	5,8	10,4	13,6	7,6	15,6	40,8
3,15	9,2	7,6	6,8	6,6	11,4	14,6	9,0	18,6	47,2

Толщина покрытия является производной от удельной производительности легирования и определяется путем деления удельной производительности легирования на плотность покрытия.

Износостойкость покрытия определялась согласно методике, изложенной в работе [12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные проведенных экспериментов приведены в табл. 2, из которой видно изменение УПЛ в зависимости от переменных технологических параметров работы электроискровой установки ALIER31.

### *Влияние на УПЛ режима работы установки ALIER31*

С повышением номера режима работы электроискровой установки увеличивается количество энергии, подаваемой в электроискровой промежуток (рис. 2), что, естественно, ведет к росту УПЛ, однако при этом выявляются некоторые особенности технологии электроискрового легирования, важные для практического применения процесса ЭИЛ.

Б.Р. Лазаренко, разработавший способ электроискрового легирования, считал, что при

нанесении электроискровых покрытий привес образца должен быть пропорционален энергии одного импульса и количеству импульсов на единицу площади:

$$Y = \kappa E n,$$

где  $Y$  – привес катода, мг/см<sup>2</sup>;  $E$  – энергия импульса, дж;  $\kappa$  – коэффициент пропорциональности;  $n$  – число импульсов, шт.

Считается, что коэффициент пропорциональности при одних и тех же условиях легирования должен сохраняться неизменным, однако в данном случае это условие не соблюдается. Исследование показало, что при электроискровом легировании алюминиевых сплавов пропорциональность между энергией импульса и УПЛ, характеризующей привес, нарушается: в то время как УПЛ показывает почти линейную зависимость от номера режима, зависимость между номером режима и энергией импульса резко нелинейная (рис. 3, 4).

Расчеты показали (табл. 3), что с увеличением энергии импульса растет разница между расчетной УПЛ и полученной экспериментально.

В некоторых случаях (например, режим 7 – табл. 3) только примерно 10% энергии импульса расходуется на образование покрытия, остальная часть энергии рассеивается в окружающую среду.

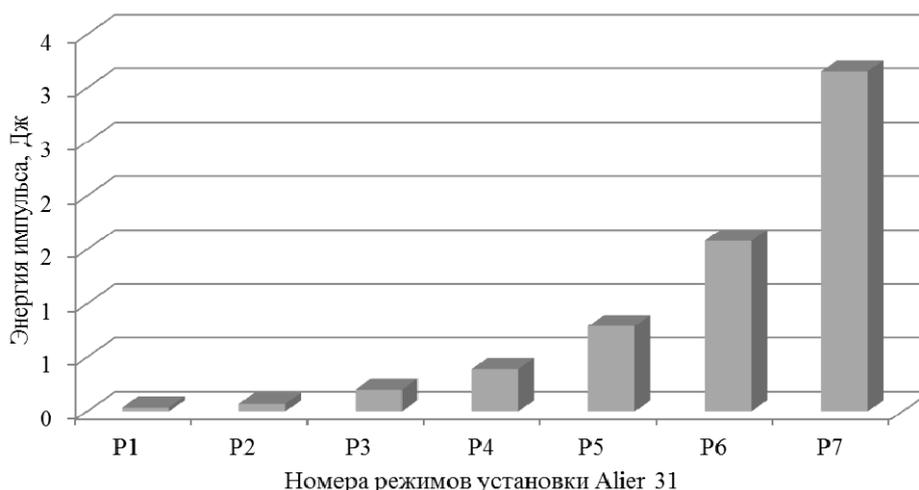


Рис. 3. Зависимость энергии импульса от режима работы электроискровой установки.

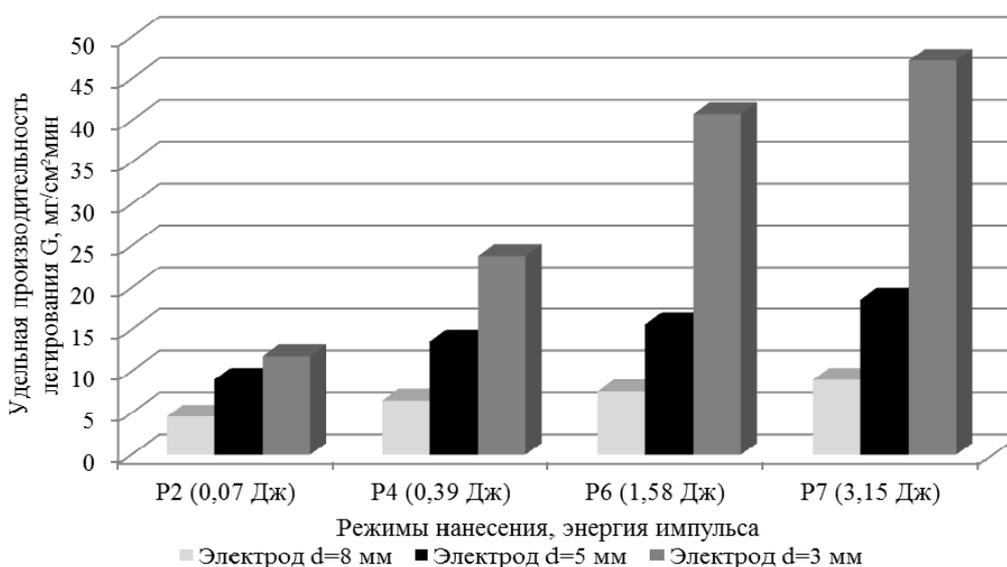


Рис. 4. Зависимость УПЛ от режима работы электроискровой установки и диаметра обрабатываемого электрода.

Таблица 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по изменению УПЛ ( $\text{мг}/\text{см}^2 \text{ мин}$ ) в зависимости от энергии импульса

Номер режима	Энергия импульса, Дж	Прирост энергии, N раз	УПЛ по расчету, $\text{мг}/(\text{см}^2 \text{ мин})$	УПЛ по факту, $\text{мг}/(\text{см}^2 \text{ мин})$	Отношение расчетных и фактических данных
2	0,07	–	4,6 / 11,8	4,6 / 11,8	–
4	0,39	5,6	26,7 / 66,0	6,5 / 23,8	4,1 / 2,7
6	1,58	22,6	104,0 / 226,0	7,6 / 40,8	13,7 / 5,5
7	3,15	45,0	207,0 / 531,0	9,0 / 47,2	23,0 / 11,3

Примечание. В числителе – данные при использовании обрабатываемого электрода диаметром 8 мм, в знаменателе – диаметром 3 мм.

Следует отметить еще один интересный факт, заключающийся в том, что с уменьшением диаметра электрода-анода с 8 до 3 мм эффективность использования энергии импульса возрастает (табл. 3) примерно в 2 раза. Можно предположить, что при применении электродов еще меньшего диаметра при использовании электроискровой установки ALIER31 эффективность использования энергии импульса будет возрастать. Однако изготовление электродов из

сплавов Al-Sn диаметром (0,5–2) мм вызывает существенные технологические затруднения из-за высокой вязкости и пониженной жидкотекучести расплава Al-Sn.

Таким образом, для получения максимальной УПЛ, а следовательно, привеса и толщины покрытия образцов необходимо применять P6–P7 режимы, близкие по энергии искрообразования к максимальным.

**Таблица 4.** Расчет плотности импульсного тока в зависимости от диаметра обрабатываемого электрода при параметрах установки ALIER31: режим P7, коэффициент энергии  $K = 1,0$ , амплитуда вибрации 1,0

№ п/п	Диаметр электрода-анода, $d$ , мм	Площадь сечения электрода, $S$ , мм <sup>2</sup>	Амплитуда импульса тока, А	Плотность тока искрового разряда, А/мм <sup>2</sup>
1	8	50,2	175	3,4
2	5	19,6	175	8,9
3	3	7,1	175	24,6

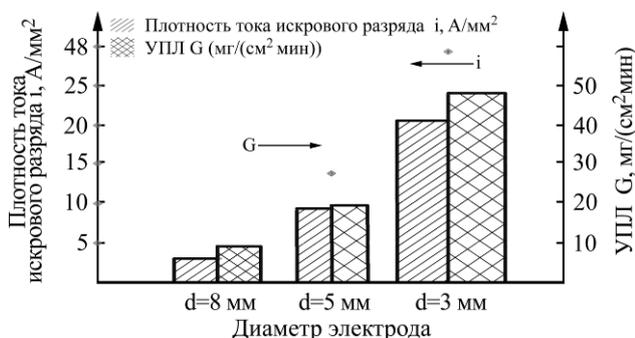
#### Влияние на УПЛ диаметра электрода-анода

Влияние диаметра электрода на УПЛ хорошо видно на рис. 4: с уменьшением диаметра электрода с 8 до 3 мм УПЛ (а значит, и привес) увеличивается в ~ 5 раз при одной и той же энергии импульса (режим P7,  $E = 3,15$  Дж). Естественно предположить, что в этом случае значительную роль играет плотность импульсного тока, то есть величина импульсного тока, приходящаяся на единицу площади сечения обрабатываемого электрода:

$$i = I / S,$$

где  $i$  – плотность импульсного тока, А/мм<sup>2</sup>;  $I$  – величина импульсного тока, А;  $S$  – площадь сечения обрабатываемого электрода, мм<sup>2</sup>.

В табл. 4 приведен расчет плотности импульсного тока в зависимости от диаметра обрабатываемого электрода при параметрах работы электроискровой установки ALIER31.



**Рис. 5.** Зависимость УПЛ от диаметра электрода и плотности импульсного тока при параметрах P7,  $A = 1$ ,  $K = 1,0$ .

Показатели плотности импульсного тока и УПЛ (рис. 5) весьма близки к пропорциональности, что говорит о преимущественном влиянии плотности импульсного тока на УПЛ и на привес образца. Следовательно, такой параметр, как плотность тока, можно рассматривать более широко – как универсальный, характеризующий технологический процесс электроискрового легирования. При нанесении покрытий из сплава Al-Sn на алюминиевые сплавы с плотностью тока 25 А/мм<sup>2</sup> на разных электроискровых установках должны получаться близкие по результатам значения толщины покрытия и УПЛ. В случае применения электро-

искровой установки ALIER31 для получения покрытий повышенной толщины необходимо использовать электроды-аноды диаметром 3 мм и менее при плотности тока импульса более 25 А/мм<sup>2</sup>.

Исходя из вышеприведенного, можно утверждать, что с уменьшением диаметра обрабатываемого электрода его эрозия увеличивается за счет ухудшения теплоотвода от рабочей поверхности электрода. Это приводит к повышенному нагреву электрода и, как следствие, повышенному массообмену [20].

#### Влияние на УПЛ амплитуды вибрации электрода-анода

Установка ALIER31 позволяет изменять амплитуду вибрации обрабатываемого электрода от 0% ( $A = 0$ ) до 100% ( $A = 1,0$ ). Увеличение амплитуды вибрации электрода-анода применяется, как правило, в тех случаях, когда электрод-анод прилипает к поверхности электрода-катода (обрабатываемой детали), что нарушает процесс электроискрового легирования. Вопреки ожиданиям, оказалось, что амплитуда вибрации значительно влияет на УПЛ (см. рис. 6): с увеличением амплитуды вибрации обрабатываемого электрода УПЛ увеличивается тем значительнее, чем меньше диаметр электрода и, следовательно, больше плотность тока искрового разряда. При большом диаметре электрода-анода с увеличением амплитуды вибрации изменения УПЛ практически не происходит. При уменьшении диаметра электрода с 8 до 3 мм с увеличением амплитуды вибрации электрода-анода с 0,5 до 1,0 УПЛ увеличивается в ~ 2,5 раза. Исходя из этих данных, можно предположить, что такое увеличение УПЛ объясняется, наряду с увеличением амплитуды вибрации, увеличением длительности импульса тока разряда. Поэтому для получения максимальной УПЛ и повышенной толщины покрытия необходимо использовать повышение амплитуды вибрации обрабатываемого электрода.

#### Влияние на УПЛ коэффициента энергии

Коэффициент энергии позволяет при заданном режиме уменьшать энергию импульса тока за счет снижения частоты (табл. 5) при

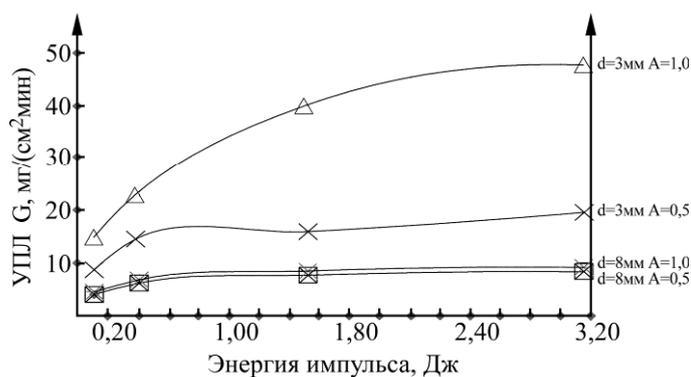


Рис. 6. Зависимость УПЛ от энергии импульса, амплитуды вибрации электрода и диаметра электрода.

Таблица 5. Зависимость энергии и частоты импульса тока от коэффициента энергии электроискровой установки ALIER31 и номера режима

Режим, №	Энергия (числитель, Дж) и частота импульсов тока (знаменатель, Гц) при коэффициенте энергии $K$				
	$K = 1,0$	$K = 0,8$	$K = 0,6$	$K = 0,4$	$K = 0,2$
P1	0,036 / 3200	0,029 / 2560	0,022 / 1920	0,014 / 1280	0,007 / 640
P2	0,07 / 1600	0,056 / 1280	0,042 / 960	0,028 / 640	0,014 / 320
P3	0,20 / 800	0,16 / 640	0,12 / 480	0,08 / 320	0,04 / 160
P4	0,39 / 400	0,31 / 320	0,23 / 240	0,16 / 160	0,08 / 80
P5	0,79 / 200	0,63 / 160	0,47 / 120	0,32 / 80	0,16 / 40
P6	1,58 / 100	1,26 / 80	0,95 / 60	0,63 / 40	0,32 / 20
P7	3,15 / 50	2,52 / 40	1,89 / 30	1,26 / 20	0,63 / 10

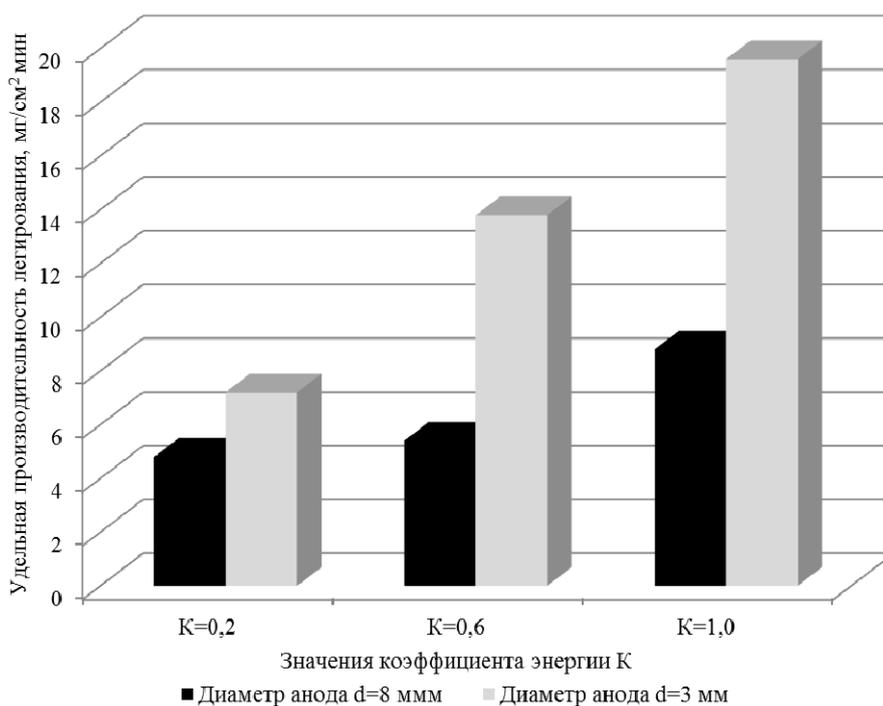


Рис. 7. Зависимость энергии импульса тока и УПЛ от коэффициента энергии при режиме работы P7 установки ЭИЛ ALIER 31,  $A = 0,5$ .

пропорциональном изменении как длительности действия электроискрового разряда, так и длительности паузы.

Это несколько расширяет диапазон применяемых режимов работы электроискровой установки ALIER31. На рис. 7 показана зависимость УПЛ от коэффициента энергии при диаметре электрода  $\varnothing 8$  и  $\varnothing 3$  мм. Видно, что при большем диаметре электрода при увеличении

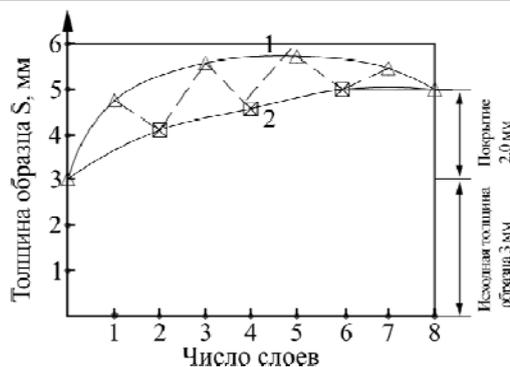
коэффициента энергии УПЛ изменяется незначительно, в то время как при уменьшении диаметра до  $\varnothing 3$  мм УПЛ существенно возрастает. Отсюда следует вывод, что для получения максимальной УПЛ и толщины покрытия из сплава Al-Sn на алюминиевых сплавах типа Д1 необходимо применять близкие к максимальному коэффициенты энергии  $K = 1,0$  или  $K = 0,8$ .

**Таблица 6.** Результаты уноса материала покрытия из сплава Al-Sn при использовании электродов из материалов разного химического состава

Материал электрода	$G$ , (мг / (см <sup>2</sup> мин)) с каждого слоя				Сумма $G$ , (мг / (см <sup>2</sup> мин))
	1 слой	2 слой	3 слой	4 слой	
Ni	19	17	31	20	87
Cu	49	32	43	28	152
Fe	5	2	3	1	11
Zn	4	6	1	3	14
Si	5	3	1	0	9
Графит	59	41	28	32	154

**Таблица 7.** Изменение толщины покрытия на сплаве Д1, полученном с помощью ЭИЛ электродом из сплава АО20-1 и последующей обработкой графитовым электродом

№ слоя покрытия	Толщина образца мм	Прирост (АО20-1) мм	Убыль (графит) мм	Примечание
До покр.	3,00			
1	4,90	+1,90		
2	4,01		-0,89	
3	5,56	+1,55		
4	4,56		-1,00	
5	5,77	+1,21		
6	5,00		-0,77	
7	5,49	+0,49		
8	5,09		-0,40	
Итого прирост		+2,09		



**Рис. 8.** Получение покрытия повышенной толщины путем применения разработанной технологии с нанесением покрытия высокой шероховатости (кривая 1) и удалением дефектной части покрытия (кривая 2).

Проведенные исследования позволяют определить оптимальные технологические параметры работы электроискровой установки (в рассматриваемом случае ALIER31) для получения покрытий повышенной толщины на алюминиевых сплавах типа Д1 с помощью электродов из сплава Al-Sn:

- режим работы P7;
- амплитуда вибрации  $A = 1,0$ ;
- коэффициент энергии  $K = 1,0$ ;
- диаметр электрода  $\varnothing 3$  мм;
- плотность импульсного тока 24 А/мм<sup>2</sup>.

Приведенные далее результаты предназначены для изучения влияния электродов разного химического состава и технологических режимов работы электроискровой установки ALIER31 при их использовании для удаления части дефектного покрытия, а также оплавления и выравнивания оставшейся части. Для решения этой задачи

сначала была сделана попытка установить требования к материалу электрода-анода, который наиболее эффективно способствует удалению части выступов и последующему разравниванию оставшегося покрытия. Такой электрод должен обладать:

- высокой электро- и теплопроводностью, так как при этой технологии для удаления и оплавления выступов покрытия используются импульсные токи повышенной энергии и плотности;

– высокой стойкостью против эрозии, так как повышенная стойкость обеспечивает длительный срок службы;

– высокой температурой плавления, так как при оплавлении выступов покрытий из алюминиевых сплавов температура на конце электрода достигает 600–700°C;

**Таблица 8.** Результаты испытаний на износостойкость покрытий из сплава Al-Sn на образцах из сплава Д1

№ опыта	Суммарный износ покрытия, мг	Суммарный износ контртела, мг	Коэффициент $K_{изн}$
1	6,25	19,75	3,16
2	1,80	13,95	7,75

– высокой способностью удалять верхушки выступов покрытия из алюминиевого сплава, так как известно, что из-за разного электронного строения атомов различные химические элементы неодинаково реагируют с атомами алюминиевых сплавов;

– невысокой дефицитностью и относительной дешевизной.

Для поиска такого материала была проведена следующая серия экспериментов. На образцы из сплава Д1 электроискровым легированием были нанесены толстые покрытия высокой шероховатости из алюминиево-оловянного сплава по режимам, определенным в первой части работы, а затем при разных режимах работы установки ALIER31 сделаны попытки удаления дефектной части покрытия с помощью электродов из чистых металлов (табл. 6).

В результате проведенных экспериментов установлено, что наиболее эффективными материалами для удаления выступов и оплавления оставшейся части покрытий на алюминиевых сплавах являются графит и медь. Поэтому все последующие эксперименты, проводимые с целью получения покрытий повышенной толщины, были выполнены с применением электродов из графита и меди.

Для проверки разработанной технологии на практике была проведена серия экспериментов. Результаты одного из них приведены в табл. 7 (рис. 8).

Особенности разработанной технологии:

– при нанесении покрытия необходимо стремиться к наиболее плотному расположению выступов, в противном случае получение плотного и малопористого покрытия будет затруднено из-за сложности разравнивания и оплавления промежутков между выступами; для соблюдения этого условия необходимо применять высокую плотность тока искрового разряда не менее 24 А/мм<sup>2</sup>;

– удаление дефектного покрытия, его разравнивание и оплавление необходимо производить при максимально возможной (для данной электроискровой установки) плотности тока искрового разряда с помощью электродов из плотного графита или чистой меди; при удалении дефектного слоя (верхушек выступов) необходимо удалять не менее 50% нанесенного слоя, так как в противном случае создается возможность получения незаполненных пустот,

что увеличивает пористость покрытия и ухудшает его механические свойства.

Для определения износостойкости покрытий, полученных по разработанной технологии, были изготовлены образцы и проведены испытания на износ по методике, изложенной в работе [12]. Результаты испытаний приведены в табл. 8.

Износостойкость оценивалась коэффициентом  $K_{изн}$ :

$$K_{изн} = G_2 / G_1,$$

где  $G_1$  – износ покрытия в мг;  $G_2$  – износ контртела в мг. Контртело – сталь 45, закаленная до HRC 56–58 ед.

Результаты испытаний показали высокую износостойкость покрытий, полученных по описываемой технологии.

## ВЫВОДЫ

1. При увеличении энергии искрового разряда эффективность использования энергии, идущей на обеспечение образования покрытия, может уменьшаться вплоть до 10%.

2. Для получения покрытий повышенной толщины решающую роль играет плотность тока искрового разряда. С повышением плотности тока до 25 А/мм<sup>2</sup> можно получить покрытие на алюминиевых сплавах толщиной до 2 мм.

3. Установлено значительное влияние (более чем в 2 раза) амплитуды вибрации электрода на УПЛ.

4. При небольших значениях плотности тока (то есть при больших диаметрах электрода) коэффициент энергии практически не влияет на УПЛ, а следовательно, на привес и толщину покрытия. При увеличении плотности тока (до 24 А/мм<sup>2</sup> при диаметре электрода 3 мм) обнаруживается значительное влияние коэффициента энергии на УПЛ.

5. Эксперименты показали, что в качестве материала электрода для удаления дефектного покрытия из сплава Al-Sn можно использовать графит и медь.

6. Разработанная технология нанесения покрытия обрабатываемым электродом из сплава Al-Sn на образцы из сплава Д1 позволяет получить износостойкие покрытия толщиной до 2 мм.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках институционального проекта 15.817.02.05.А (Молдова),

проекта H2020 Smartelectrodes (№ 778357), а также бюджетного финансирования Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Standard ISO 22628:2002. Road transport. Recyclability and recyclability. Calculation method TC 22.* 14.03.2002, p. 15.
2. Бурумкулов Ф.Х., Лесин П.П., Сенин П.В. и др. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин (теория и практика)*. Саранск: Издательский дом Красный Октябрь, 2003. 504 с.
3. Иванов В.И. *Труды ГОСНИТИ*. 2013, **113**, 429–455.
4. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.И. и др. *Восстановление деталей машин*. Справочник. М.: Машиностроение, 2003. с. 672.
5. Михайлов В.В., Абрамчук А.П. *ЭОМ*. 1986, (2), 36–41.
6. Абрамчук А.П., Михайлов В.В., Полищук Д.Ф. и др. *ЭОМ*. 1988, (6), 12–13.
7. Абрамчук А.П., Бовкун Г.А., Михайлов В.В. и др. *Порошковая металлургия*. 1989, (7), 12–17.
8. Абрамчук А.П., Михайлов В.В., Бовкун Г.А. и др. *ЭОМ*. 1990, (2), 16–19.
9. Tsunekawa Y., Okumiya M., Mohri N. et al. *Mater Sci Eng*. 1994, **174**(2), 193–198.
10. Ahmed A. *Mater Manuf Process*. 2016, **31**(4), 467–474. DOI: 10.1080/10426914.2015.1025967.
11. Liew P.J., Yap C.Y., Nurlishafiq Z. et al. *J Adv Manuf Technol*. 2018, **12**(2), 133–146.
12. Yurchenko V.I., Yurchenko E.V., Fomichev V.M. et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2009, **45**(4), 259–264. DOI: 10.3103/S1068375509040012
13. Dikusar A.I. *Obtaining Nanowires under Conditions of Electrodischarge Treatment. Nanowires-Implementations and Applications*, Abbas Hashim, Ed. INTECH Org, 2011, PP. 357–374. DOI 10.5772/16939
14. Agafii V.I., Yurchenko V.A., Yurchenko V.I. et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(6), 488–492. DOI: 10.3103/S1068375511060020.
15. Agafii V.I., Petrenko V.I., Fomichev V.M. et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2013, **49**(3), 181–188. DOI: 10.3103/S1068375513030022.
16. Юрченко Е.В., Юрченко В.И., Дикусар А.И. *Наноинженерия*. 2013, (6), 12–24.
17. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Ю., Игнатьков Д.А. *ЭОМ*. 1981, (3), 25–29.
18. Молодюк Н.В., Целенин А.С. *Восстановление деталей машин*. М.: Машиностроение, 1989. С. 8.
19. Черноиванов В.И., Голубев И.Г. *Восстановление деталей машин*. М.: Росинформгротех, 2010. С. 77.
20. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А. *Упрочнение деталей комбинированными способами*. М.: Машиностроение, 1991. С. 144.

#### Summary

It is shown that it is possible to obtain nanostructured layers of increased thickness (up to 2 mm), suitable for the repair of worn surfaces of component parts made of aluminum alloys during electrospark doping of the surface of the aluminum alloy (D1) by electrode made of an Al-Sn alloy (20% Sn) with the use of high current density and two-phase technology for producing a multilayer coating (applying – melting).

*Keywords:* electrospark doping, aluminum alloys, modes of electrospark machining, thickened coatings, pulsed current density.