

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ Al-Cu И Al-Mg СПЛАВОВ

А.Д. Погребняк<sup>\*,\*\*</sup>, М.К. Кылышканов<sup>\*\*\*</sup>, С.Н. Братушка<sup>\*,\*\*</sup>, С.В. Плотников<sup>\*\*\*</sup>,  
В.В. Понарядов<sup>\*\*\*\*</sup>, Ю.Н. Тюрин<sup>\*\*\*\*\*</sup>, А.П. Шипиленко<sup>\*,\*\*</sup>

*\*Институт металлофизики НАН Украины имени Г.В. Курдюмова,  
отдел пучковой модификации поверхности (Сумы)  
Украина*

*\*\*Сумской институт модификации поверхности (Сумы)  
Украина*

*\*\*\*Восточно-Казахстанский государственный технический университет  
(Усть-Каменогорск) Казахстан*

*\*\*\*\*Белорусский государственный университет (Минск)  
Беларусь*

*\*\*\*\*\*Институт электросварки НАН Украины имени О.Е. Патона (Киев)  
Украина*

Поступила в редакцию 18.04.2008

В работе представлены результаты новых исследований по созданию защитных оксидных покрытий на основе  $Al_2O_3$  (Si, Mn) на сплавах алюминия с помощью электролитно-плазменного оксидирования. Анализ, проведенный с помощью растровой электронной микроскопии SEM с EDS (энергодисперсным микроанализом), рентгено-фазового анализа (XRD), резерфордского обратного рассеяния ионов (RBS) ионов  $^4He^+$  и протонов, показал, что формируются хорошего качества покрытия с высокой твердостью и стойкостью к износу, а также малой температуропроводности. Показано, что наряду с  $Al_2O_3$ , в покрытии находятся Si, Mn, C и Ca. Определена стехиометрия данного покрытия. Плотность и твердость покрытия близка по значениям к  $\alpha$ -фазе  $Al_2O_3$  в покрытии на подложке D-16, а на покрытии, осажденном на подложке S006, в 1,5 раза меньше.

### ВВЕДЕНИЕ

Сплавы типа дюралюминий, такие как D-1 и D-16, широко распространены в современной промышленности. Эти сплавы наряду с высокой прочностью (400 ÷ 500) МПа имеют небольшую плотность. Хотя по прочности алюминиевые сплавы и уступают сталям [1 – 3], но по удельной прочности (отношение временного сопротивления к плотности) значительно превосходят их, что обеспечило широкое применение алюминиевых сплавов в авиации и ракетной технике [1].

Защита поверхности изделия из алюминиевого сплава осуществляется теплостойким слоем из окиси алюминия, который формируется на основе сплава алюминия, титана, меди. Эти технологии характеризуются низкими затратами энергетических ресурсов и отличаются простотой оборудования. Они позволяют часть слоя из алюминиевого сплава окислить, сформировать в виде высокотем-

пературного окисла алюминия –  $\alpha-Al_2O_3$ . Целью настоящей работы было изготовление оснастки для микродугового оксидирования протяженных изделий из алюминиевых сплавов и отработка новых режимов, технологии осаждения оксида алюминия вместе с карбидом кремния и другими добавками.

Особенностью анодно-искрового процесса, или, как еще называют, микродуговое оксидирование (МДО), является то, что при обработке используется энергия электрических микрозарядов на обрабатываемой поверхности в электролите. Многочисленные исследования [4 – 6] описывают особенности образования оксидов при потенциалах, вызывающих микропробой сплошного материала. Толщина оксидных покрытий на поверхности сплошных материалов зависит от напряженности электрического поля и может быть 5 ÷ 1000  $\mu m$  [6 – 8]. В процессе электролиза на аноде выделяется кислород, кото-

рый активизируется электрическим разрядом и окисляет металл изделия. По мере увеличения оксидного слоя для сохранения электрического режима оксидирования необходимо увеличить напряженность электрического поля до тех пор, пока не наступит стабилизация микродуговых разрядов. Процесс оксидирования имеет затухающий характер, и для его возобновления необходимо повышение напряженности поля до величины, обеспечивающей пробой оксидного слоя и образования дуговых разрядов. Время существования разрядов варьируется в пределах  $0,1 \div 1 \cdot 10^{-3}$  с. Начало пробоя оксидного слоя носит массовый характер, что сопровождается резким броском электрического тока до  $10 \text{ А/см}^2$ . Угасание разрядов идет постепенно с течением времени и повышением толщины и электрической прочности оксидного покрытия. Обработка осуществлялась в течении (22 – 25) мин при плавном повышении электрического потенциала в межэлектродном зазоре от 150 до 300 В, где в качестве электролита использовался водный раствор КОН.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ОКСИДИРОВАНИЯ

Технологическая оснастка обеспечивала оксидирование только той поверхности, которая омывалась электролитом, что позволяло создать защитное покрытие на локальных участках поверхности изделия.

Установка (рис. 1) для микродугового оксидирования поверхности изделия вытянутой формы содержит: станину 1, защитный кожух 2, бак 3 с электролитом 4, на конусе закреплены подающий изделия механизм 6 и закрытые кольцевые колоды 7, электролит подается

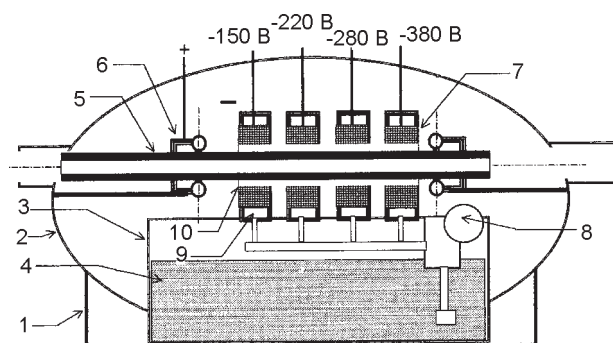


Рис. 1. Схема установки для микродугового оксидирования поверхности изделия вытянутой формы.

из бака насосом 8 в полости 9 катодов и через отверстия катодов в кольцевую щель между поверхностями трубки – анода и катодов 10. Поток электролита через кольцевую щель между поверхностью катода и изделием – анода исключает его перегрев и обеспечивает возможность работы при высоких плотностях энергии.

Работа установки осуществляется следующим образом. Включается подача электролита в катоды 7, изделия 5 перемещаются механизмом 6 в катоды. Одновременно подключается электрический потенциал на все катоды. Потенциал на катоды подключается увеличивающимся на ходу изделия от 150 до 300 В. Это обеспечивает плавное увеличение толщины оксидного слоя на поверхности изделия из алюминиевых сплавов.

Механизм для подачи трубки является одновременно и токосъемником, обеспечивающим токопровод к алюминизированной поверхности трубки. Электрический потенциал подключается от специального преобразователя через проходы в защитном корпусе.

Экспериментальные работы проводились с использованием изделий из сплавов D-16 и сплава протяженного типа до 50 см длиной и шириной до 7 см. Из изделий были приготовлены образцы размером  $20 \times 30 \times 2,8$  мм, на которых были проведены все исследования.

Состав электролита: 100 л воды; 300 г NaOH; 400 г  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ; 1,5 кг  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 1000 мл технического глицерина, 5 г  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Разработанная нами установка позволяет вести оксидирование при межэлектродных зазорах  $20 \div 30$  мм, что снижает потери энергии и обеспечивает оформление оксидного слоя до  $150 \text{ мкм}$  при нагревании электрическим током  $\approx 340 \text{ В}$ . Оптимальная температура электролита для осуществления технологии составляет  $(50 \div 60) \text{ }^\circ\text{C}$  и обеспечивается за счет использования потерь электрической энергии в межэлектродном зазоре электролитной ячейки. В процессе оксидирования происходит образование смешанных оксидов алюминия и металлов, входящих в комплексные анионы электролита. Ввод анионов металла в электролит может осуществляться за счет растворения электрода-анода и соответ-

ствующего сплава. В установившемся режиме оксидирования плотность тока составляет  $0,1 \div 0,5 \text{ А/см}^2$ . Основными параметрами, позволяющими управлять процессом электролитно-плазменного оксидирования и свойствами покрытий, являются концентрация электролита, напряжение, плотность тока, температура, продолжительность процесса, состав сплава и, возможно, его термическая обработка.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 2 представлен внешний вид поверхности образцов с покрытием из оксидированного алюминиевого сплава. Металлографический анализ образцов (поперечный и косой шлифы) показывает, что полученный оксидный слой толщиной от 32 до 56  $\mu\text{м}$  более плотен около алюминиевой подложки. На поверхности оксидный слой имеет высокую пористость и состоит из множества оплавленных участков в виде микрократеров и каплевид-

ных следов плавления оксидного слоя. Анализ результатов исследования показывает, что микродуговой процесс распространяется внутри пор покрытия. В порах покрытия также заметны следы локализации микродуг в виде оплавленных кратеров. Можно отметить, что это обеспечивает оксидный слой с развитой поверхностью внутри алюминиевого сплава [8, 9].

Как показал рентгенофазовый анализ (см. табл. 1, 2), покрытие состоит в основном из тугоплавкой фазы оксида алюминия ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) и возможно образование сложных оксидов с участием  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$ . На рис. 1б представлен рентгеновский энергодисперсионный спектр. Как видно из этого спектра, имеется в поверхностном слое ( $80 \times 80 \mu\text{м}$  и глубине света  $2 \mu\text{м}$ ) высокая концентрация Al, в 1,5 раза меньше концентрации Si, кислород а остальные элементы в виде K, Ca, Cr, Fe, Cl имеют концентрацию меньше одного процента (для

Таблица 1  
Результаты рентгеновского анализа образцов

D-16 с оксидированным алюминием

2 $\Theta$	$\Theta$	2 $\Theta$	2sin $\Theta$	d (таб)	фаза	hkl
25,40	12,5	0,432879	3,559886	—	—	—
32,00	16,0	0,561274	2,795348	—	—	—
35,04	17,32	0,595416	2,588106	2,571	$\alpha\text{-Mn}$	222
37,50	18,55	0,638264	2,421951	—	—	—
39,24	19,42	0,66488	2,317711	2,308	$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$	132
43,24	21,42	0,730403	2,109794	2,101	$\alpha\text{-Mn/SiC}$	330/ 006
44,34	22,17	0,754711	2,041844	2,043	SiC	—
45,50	22,55	0,766979	2,009181	2,008	Cu	111
52,44	26,2	0,883638	1,743927	1,7401	$\text{Al}_2\text{O}_3$	024
57,34	28,52	0,95493	1,613731	1,61	Mg	110
61,14	30,37	1,011164	1,523986	1,528	$\alpha\text{-Mn}$	530
65,10	32,35	1,070179	1,439946	1,435	Al	—
66,50	33,25	1,096586	1,405271	1,4046	$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ / SiC	214/ 009
68,15	34,07	1,12041	1,375389	1,3739	$\text{Al}_2\text{O}_3$ /SiC	330/ 006
79,54	38,27	1,238736	1,24401	1,245	Si	331
78,15	39,07	1,260538	1,222494	1,22	Al/SiO <sub>2</sub>	—
84,25	42,17	1,342665	1,147717	1,1473	$\text{Al}_2\text{O}_3$	223
95,14	47,14	1,471485	1,047241	1,0463	$\text{Al}_2\text{O}_3$	315
101,10	50,35	1,539913	1,000706	1,001	Si	831
112,04	53,02	1,658465	0,929172	0,93	Al	—
116,24	58,12	1,698312	0,907372	0,9079	$\text{Al}_2\text{O}_3$	324
127,00	63,30	1,788742	0,862464	—	—	—
136,10	68,05	1,85502	0,830719	0,83	Cu/SiC	/305
145,00	72,42	1,906592	0,808248	0,808	Si/Cu	—

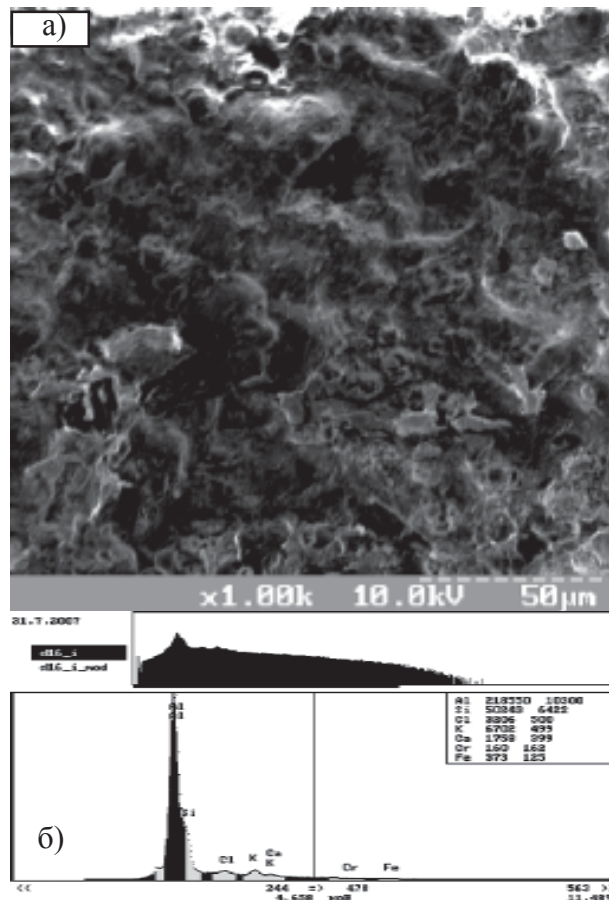


Рис. 2. а) – изображение поверхности сплава D-16, полученного с помощью растровой электронной микроскопии; б) – рентгеновский энергодисперсионный спектр полученный из участка поверхности покрытия.

Таблица 2

Результаты рентгеновского анализа, полученные на образцах S006 с покрытием из  $Al_2O_3$  (Si, Ca)

$2\Theta$	$\Theta$	$2\sin\Theta$	$d$ (рас)	$d$ (таб)	фаза	$hkl$
34,00	17,0	0,584743	2,637054	—	—	—
39,39	19,49	0,667285	2,310858	2,308	$\delta-Al_2O_3$	132
41,24	20,42	0,697798	2,209807	—	—	—
44,24	22,12	0,753095	2,04755	—	—	—
45,39	22,49	0,765044	2,015569	2,008	Cu	111
56,54	28,27	0,947254	1,627863	1,628	$\delta-Al_2O_3$	211
60,44	30,22	1,006643	1,531824	1,53	$SiO_2$	324
64,54	32,27	1,067819	1,444064	1,445	$\delta-Al_2O_3$	214
66,54	33,27	1,09717	1,405434	1,405	$\delta-Al_2O_3$	440
77,59	39,0	1,258641	1,225131	1,22	$SiO_2$	622
79,24	39,42	1,27	1,214173	1,21	Si	—
80,54	40,27	1,292781	1,192778	1,193	$\alpha-Al_2O_3$	217
96,24	48,12	1,489089	1,035532	1,0356	$\delta-Al_2O_3$	252
98,49	49,24	1,514902	1,017888	1,017	CuO	024
102,24	51,12	1,556925	0,990414	0,994	$\alpha-MnO_2$	712
111,39	55,49	1,648055	0,935649	0,932	$\alpha-MnO_2$	213
116,10	58,05	1,69702	0,908651	0,9079	$Al_2O_3$	324
121,24	60,42	1,739335	0,886546	0,885	$\alpha-MnO_2$	413
136,54	68,27	1,857878	0,829979	0,83	Mg/Cu	—
137,24	68,42	1,85981	0,829117	—	—	—
145,24	75,42	1,935594	0,796655	0,808	Si/Cu	—

образца из сплава D-16). На рис. 2а представлено изображение поверхности образца из сплава S006 с покрытием, полученным с помощью электронно-плазменного оксидирования. Как видно, на поверхности имеется множество оплавленных участков в виде микрократеров и каплевидных следов плавления оксидного слоя.

На рис. 3а обозначены точки, в которых проводился интегральный микроанализ. Из спектра, приведенного на рис. 2б, в слое покрытия обнаружена высокая концентрация Si, O (который невиден на спектре), а остальные элементы, как Cl, K, Ca, Cr, Mn, Fe, имеют концентрацию меньше процента.

В табл. 3, 4 суммированы результаты анализов в разных точках образца D-16 (табл. 3) и S006 (табл. 4). Как видно из этих результатов, в поверхности покрытия образца D-16 концентрация Al колеблется от 73,16 до 93,4%, Si от 4,4 до 22,7% Cl и K в среднем около 0,5 и 1,2 %, имеются также в небольшом количестве 0,35% Ca, и в очень малом

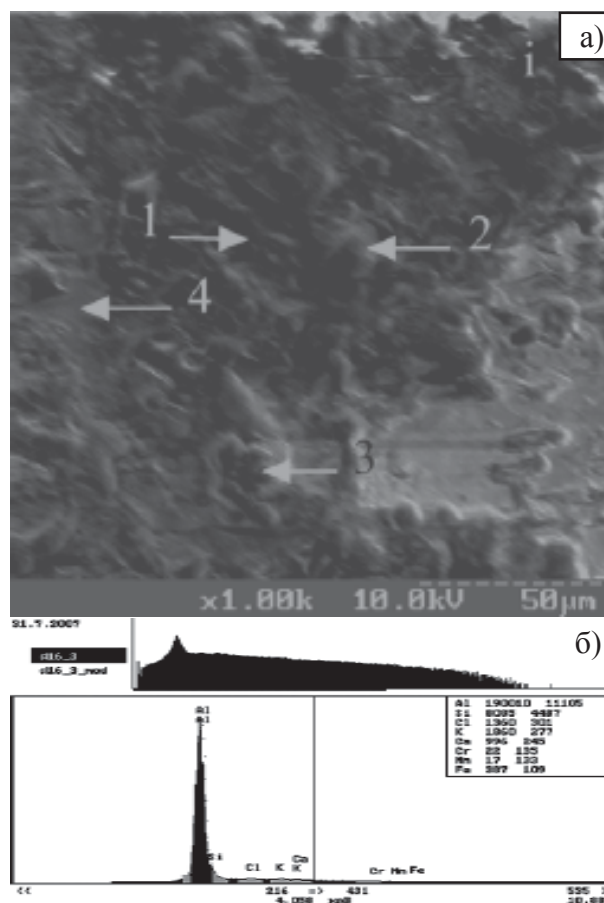


Рис. 3. а) – изображение поверхности сплава S006, полученного с помощью растровой электронной микроскопии; б) – рентгеновский энергодисперсионный спектр полученный из участка поверхности покрытия в точках показанных на рис. 3а.

количестве Cr, Fe, Mn, (см. табл. 3). В покрытии на образце S006 концентрация Al колеблется от 59,8 до 87,7%, а Si от 12 до 35%, далее идет концентрация Ca около 0,3%, все остальные не более 1% (это Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn).

На рис. 4а, б представлены энергетические спектры ионов (РОР) гелия (а) и протонов (б), из которых видно, что в покрытии на образцах S006 имеется очень много C, O, Al, Ca. Причем имеется ступенька вблизи границы кинематического фактора Al и O, однако это свидетельствует о том, что в этом оксиде алюминия присутствуют, по-видимому, Si ( $SiO_2$ ) и окись кальция. В случае спектра протонов (б) кривая в виде точек очень хорошо описывается расчетной кривой, что говорит о правильном подходе и составе покрытия образцов S006. В табл. 5 представлены расчетные данные, полученные из кривых РОР по модели и концентрация элементов по глуп-

Таблица 3

Результаты энергетического рентгеновского анализа образца D-16 в точках, обозначенных на рис. 2а (в вес.%)

	Al	Si	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Сумма
D-16_i	73,157	22,671	1,118	2,173	0,516	0,096	0,000	0,269	100,000
D-16_1	81,767	15,541	0,224	1,872	0,179	0,000	0,000	0,417	100,000
D-16_2	92,525	6,089	0,320	0,848	0,113	0,003	0,000	0,103	100,000
D-16_3	93,385	4,444	0,595	0,783	0,383	0,018	0,016	0,377	100,000

Таблица 4

Концентрация элементов в покрытии, нанесенном на образе S006 (вес%)

	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Сумма
D-16_i	62,944	35,020	0,382	0,689	0,402	0,000	0,025	0,142	0,396	0,000	0,000	100,000
D-16_1	59,797	38,788	0,216	0,603	0,240	0,133	0,087	0,098	0,039	0,000	0,000	100,000
D-16_2	87,724	12,017	0,000	0,000	0,039	0,089	0,064	0,034	0,033	0,000	0,000	100,000
D-16_3	68,223	31,016	0,046	0,324	0,118	0,000	0,058	0,124	0,091	0,000	0,000	100,000
D-16_4	81,512	17,450	0,018	0,259	0,277	0,030	0,012	0,055	0,025	0,244	0,118	100,000

Таблица 5

Результаты расчетов концентрации элементов по глубине оксидированного слоя полученные из данных РОР анализа по стандартной программе

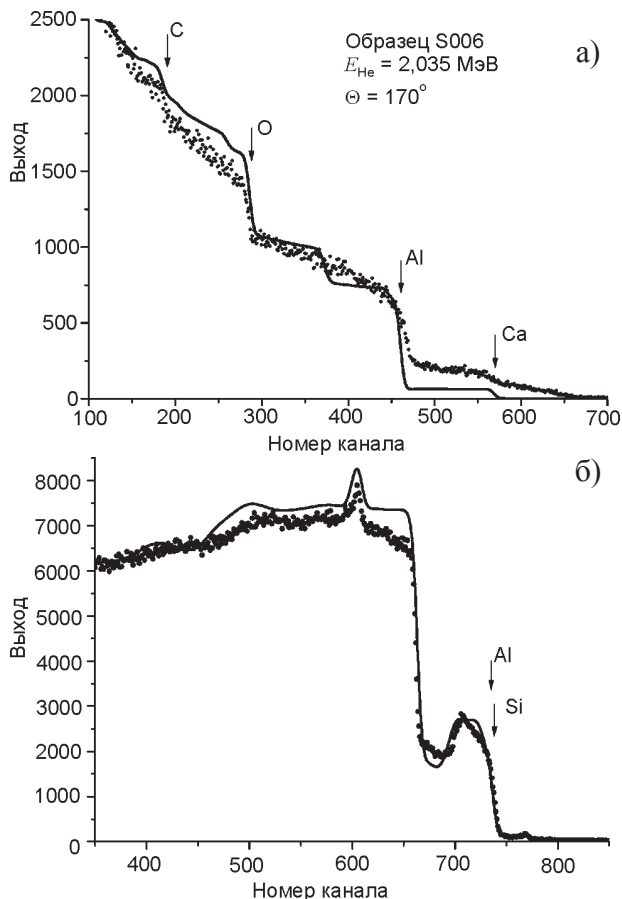


Рис. 4. Энергетические спектры ионов (РОР): а) – гелия; б) – протонов образцов S006.

бине покрытия. В качестве упрощения покрытие разбили на несколько слоев произвольной толщины. Далее, мы включили в модель более высокую концентрацию Si, что следует как из результатов микроанализа по поверхности так и по глубине этих образцов (что будет показано позже). Как видно из этих результатов, подгонки (расчетов) эксперимен-

1 Lay: Thick. 50,0 (1·10 <sup>16</sup> at/cm <sup>2</sup> ) 5 Elements				
Ca	Element	Z = 20, M = 40,0800	Concentration	0,0096
Si	Element	Z = 14, M = 28,0860	Concentration	0,1000
Al	Element	Z = 13, M = 26,9810	Concentration	0,1200
O	Element	Z = 8, M = 15,9990	Concentration	0,5102
C	Element	Z = 6, M = 12,0110	Concentration	0,2601
2 Lay: Thick. 50,0 (1·10 <sup>16</sup> at/cm <sup>2</sup> ) 5 Elements				
Ca	Element	Z = 20, M = 40,0800	Concentration	0,0099
Si	Element	Z = 14, M = 28,0860	Concentration	0,1000
Al	Element	Z = 13, M = 26,9810	Concentration	0,1500
O	Element	Z = 8, M = 15,9990	Concentration	0,5201
C	Element	Z = 6, M = 12,0110	Concentration	0,2200
3 Lay: Thick. 50,0 (1·10 <sup>16</sup> at/cm <sup>2</sup> ) 5 Elements				
Ca	Element	Z = 20, M = 40,0800	Concentration	0,0099
Si	Element	Z = 14, M = 28,0860	Concentration	0,1000
Al	Element	Z = 13, M = 26,9810	Concentration	0,1500
O	Element	Z = 8, M = 15,9990	Concentration	0,6001
C	Element	Z = 6, M = 12,0110	Concentration	0,1400
4 Lay: Thick. 50,0 (1·10 <sup>16</sup> at/cm <sup>2</sup> ) 5 Elements				
Ca	Element	Z = 20, M = 40,0800	Concentration	0,0099
Si	Element	Z = 14, M = 28,0860	Concentration	0,1500
Al	Element	Z = 13, M = 26,9810	Concentration	0,1900
O	Element	Z = 8, M = 15,9990	Concentration	0,6501

тальные данные (точки), также очень хорошо совпадают с образованием оксида Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, что говорит в пользу результатов, полученных энергодисперсным рентгеновским микроанализом, а также составом фаз обнаруженных в покрытии.

На рис. 5а, б представлены результаты анализа, полученные с помощью РОР (энергетические спектры обратного рассеивания ионов а) – гелия, б) – водорода) на образцах с покрытием S006.

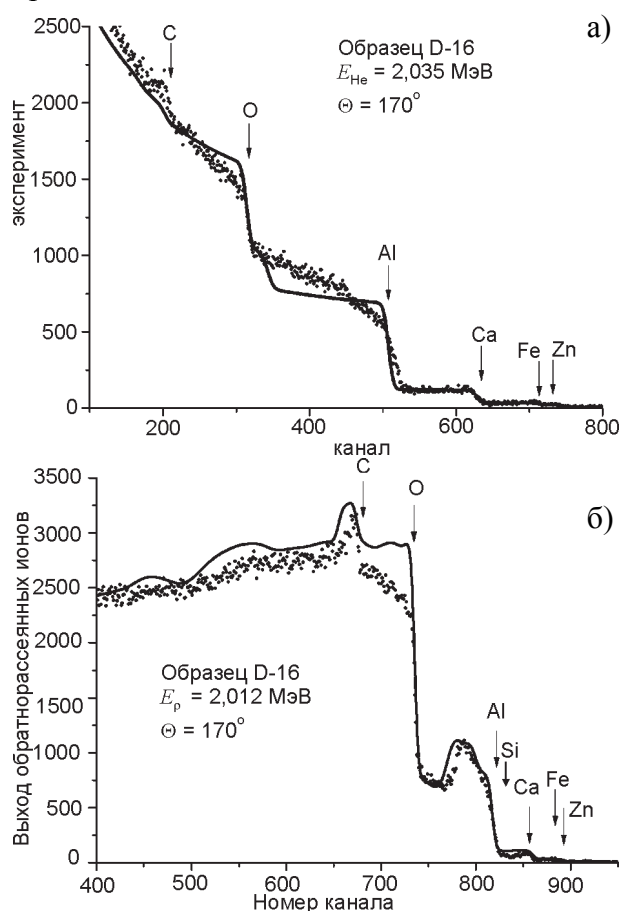


Рис. 5. Энергетические спектры ионов (РОР) образцов D-16: а) – гелия; б) – протонов.

Как видно из спектра, в подложке присутствует Al; O; C; Ca. После обработки по стандартной программе было получено распределение элементов по глубине покрытия, результаты представлены в табл. 4. Далее мы в программу ввели Si, который трудно разделить – разделить с Al из-за высокой шероховатости покрытия. Однако видно, что на спектре и результатах обработки возможные SiC образования с концентрацией более 12%.

На рис. 6 представлено изображение шлифа, сделанного под углом (12 ÷ 15) на образце D-16 с покрытием. Ниже показана подложка из сплава Al-Cu см. рис. 7а, б, в (подложка). Имеются разные участки с оттенками (более светлые, более темные). Хорошо видно, что покрытие достаточно плотное, мало пор, как показали испытания (царапание пирамидкой

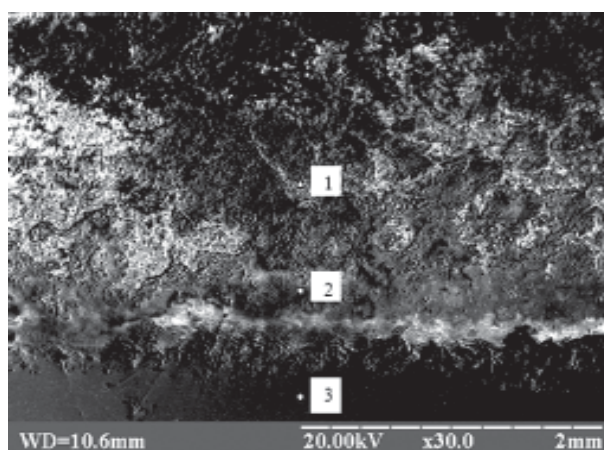


Рис. 6. Изображение поверхности сплава S006 полученного с помощью растровой электронной микроскопии. Точками обозначены участки на котором проводили энергодисперсионный микроанализ.

по шлифу покрытия-подложка) очень высокая.

На рис. 7а, б, в – представлен анализ в трех точках (а именно, вблизи поверхности покрытия, на границе покрытие подложка и в подложке образца), как видно из рис. 6.

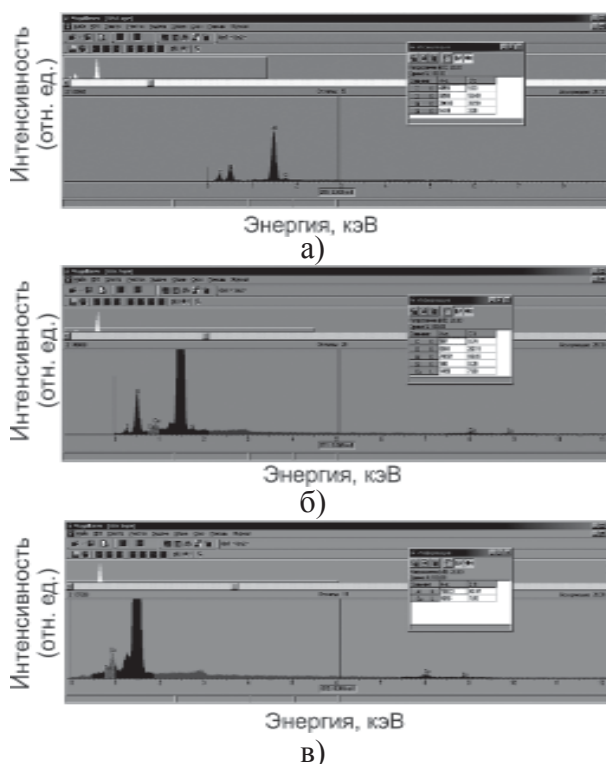


Рис. 7. Результаты энергодисперсионного анализа в виде спектров, с правой стороны в виде табл. представлены значения с концентраций элементов в вес.%, проведенный в покрытии вблизи поверхности покрытия образцов S006 в точках, обозначенных на рис. 6.

На первом (а) спектре показано, что наряду с Al, O, C в покрытии присутствуют Si более

2,2%, и соотношение кислорода и алюминия далеко от стехиометрии оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), кислорода находится больше, отсюда следует, что возможно в покрытии имеется  $SiO_2$ . Из следующего спектра (б) видно, что концентрация углерода уменьшилось на порядок, имеется кислород, алюминий, немного обнаружено Si и около 7%Cu (из подложки). Соотношение между O и Al в покрытии отличается от стехиометрического незначительно. В спектре, полученном на подложке, обнаружены элементы только Al  $\approx$  93% и Cu  $\approx$  7%, никаких других примесей не обнаружено.

На следующем спектре представлено изображение косо шлифа, полученного на образце S006 с покрытием (при таком же разрешении рис. 8).

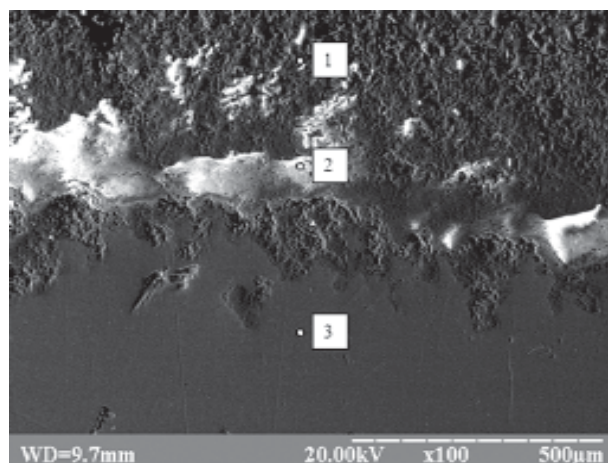


Рис. 8. Изображение поверхности сплава D-16, полученного с помощью растровой электронной микроскопии. Точками обозначены участки на котором проводили энергодисперсионный микроанализ.

Из рис. 8 видна структура покрытия, переходная зона (2) и структура подложки (3). В этом случае на образце толщина покрытия заметно уступает образцу из сплава D-16. Следует также отметить, что твердость этого покрытия также заметно меньше (почти на 20%) от покрытия на D-16.

Микроанализ, проведенный в покрытии вблизи поверхности покрытия образцов S006, показал (рис. 9б), что в покрытии обнаружено Al  $\approx$  35%, O 47% для Si  $\approx$  12%, немного Cr  $\approx$  1,6%, C 3,2%, остальные элементы это Na, K, Mg, концентрация которых в покрытии составляет меньше 1%.

На межфазной границе покрытие-подложка обнаружено, что концентрация Al  $\approx$  70%,

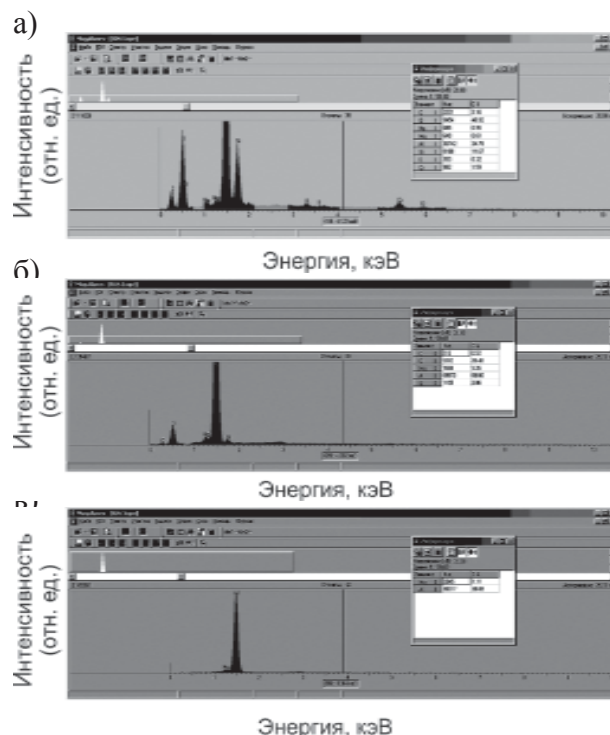


Рис. 9. Результаты энергодисперсионного анализа в виде спектров, с правой стороны в виде табл. представлены значения с концентраций элементов в вес.%, проведенный в покрытии вблизи поверхности покрытия образцов D-16 в точках обозначенных на рис. 8.

а кислорода всего около 25%, Si  $\approx$  3%,  $\approx$  1,35% и немного C  $\approx$  0,5%. Отсюда видно, что этот след меньше окислен, чем покрытие внутри. Кроме того, видно, что в покрытие из подложки (по-видимому) проник Mg за счет диффузии в процессе электролиза (окисления) и повышения температуры в локальных областях (подложка холодная из-за отвода тепла за счет теплопроводности и охлаждения обмыванием электролита).

В подложке образца S006 обнаружено (в) только Al – 98,9% и 1,1% – Mg, что вполне соответствует типичным значениям сплава AMg1 [1 – 3].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе, показано, что режимы обработки (электролитно-плазменного оксидирования) лучше в случае полученных покрытий на исследуемых образцах D-16. Структура покрытия включает в себя меньшее пор и большую величину твердости, а также высокие значения адгезии к подложки. Состав (стехиометрии) обоих типов покрытия близок к оксиду алюминия, правда места-

ми в  $Al_2O_3$  присутствує по-видимому оксид  $SiO_2$  і карбід  $SiC$ .

## БЛАГОДАРНОСТІ

Робота частинно фінансувалася по програмі “Нанотехнології наноматеріали і наносистеми” НАН України. Автори благодарні А.П. Кобзеву (ОІЯІ, Дубна, Московська обл.) Ю.В. Шестакову (Selmi, Електрон, Суми) і В.С. Кішнякіну (СГПУ, Суми, Україна) за допомогу в проведенні експериментів.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колачев Б.А., Елагин В.И. Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов Москва.: МИСИС, 2001. – 414 с.
2. Свойства элементов: справочник в 2т./под ред. М.Е. Дрица – М.: Металлургия ГУП “Цв.металлы”, Т. 1, Т.2, 1997. – 432 с., 446 с.
3. Лучиков Л.П. Деформируемые алюминиевые сплавы для работы при повышенных температурах. – М.: Металлургия, 1965. – 290 с.
4. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 424 с.
5. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. – Л.: Химия, 1991. – 128 с.

6. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И., Литовченко К.И. Теория и технология анодных процессов при высоких напряжениях. – К.: Наукова Думка, 1995. – 1997 с.
7. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S.J. Plasma Electrolysis for Surface Engineering//Surf. and Coat. Tech. – 1999. – Vol. 122. – P. 73-93.
8. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н. Структура и свойства покрытия из  $Al_2O_3$  и Al осажденного микродуговым оксидированием на подложку из графита//ЖТФ. – 2004. – Т. 74, Вып. 8. – С. 109-112.
9. Tyurin Yu.N. and Pogrebnyak A.D. Electric Heating Using a Luguid Electrode//Surf. And Coat. Tech. – 2001. – Vol. 142-144. – P. 293-299.
10. Погребняк А.Д., Гриценко Б.П., Кильшканов М.К. и др Изменения стехиометрии и ускорение диффузии Ti в  $Al_2O_3/Al/C$  в результате воздействия сильноточного пучка//ЖТФ. – 2006. – Т.76, Вып. 11. – С. 117-121.
11. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Бойко А.Г. и др. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы// Успехи физики металлов. – 2005. – Т. 6. – С. 273
12. Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д. Особенности электролитно-плазменной закалки//ЖТФ. – 2002. – Т.72, Вып.11. – С. 119-120.

## СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВИМ ОКСИДУВАННЯМ НА ПІДЛОЖЦІ З Al-Cu і Al-Mg СПЛАВІВ

А.Д. Погребняк, М.К. Кылышканов, С.Н. Братушка, С.В. Тесль, В.В. Понарядів,  
Ю.Н. Тюрин, А.П. Шипиленко

У роботі представлені результати нових досліджень по створенню захисних оксидних покриттів на основі  $Al_2O_3$  (Si, Mn) на сплавах алюмінію за допомогою електролітно-плазмового оксидування. Аналіз, який проведений за допомогою растрової електронної мікроскопії SEM з EDS (енергодисперсним мікроаналізом), рентгенофазового аналізу (XRD), резерфордівського зворотного розсіювання іонів (RBS) іонів  $^4He^+$  і протонів показав, що формуються гарної якості покриття з високою твердістю й стійкістю до зношування, а також малої температуропровідності. Показано, що поряд з  $Al_2O_3$  у покритті перебуває Si, Mn, C і Ca. Визначено стехіометрію даного покриття. Щільність і твердість покриття близька за значеннями до  $\alpha$ -фази  $Al_2O_3$  у покритті на підкладці D-16, а на покритті, осаженному на підкладці S006, в 1,5 рази менше.

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF OXYDE COATINGS ON SUBSTRATES OF Al-Cu AND Al-Mg ALLOYS MANUFACTURED USING ELECTROLYTE-PLASMA OXIDATION

A.D. Pogrebnyak, M.K. Kylyshkanov,  
S.N. Bratushka, S.V. Plotnikov,  
V.V. Ponaryadov, Yu.N. Tyurin, A.P. Shipilenko

The work presents new investigation results on production of protecting oxide coatings on the base of  $Al_2O_3$  (Si, Mn) on aluminum alloys using an electrolyte-plasma oxidation. Scanning electron microscopy analysis SEM with EDS, X-ray phase analysis XRD, Rutherford ion back-scattering (RBS) of  $^4He^+$  ions and protons demonstrated the formation of good-quality coatings with high hardness, wear resistance and low temperature conductivity. Also it was demonstrated that together with Al and O the coating contained Si, Mn, C and Ca. The stoichiometry of the coating was determined. Values of its hardness and density were close to  $\alpha$ -phase  $Al_2O_3$  for the coating on D-16 substrate and by 1.5 times lower on the substrate S006. Together with  $\alpha$ - $Al_2O_3$  phases we found SiC, and  $SiO_2$  in both types of coatings, but their bulk fraction differed.