

# Влияние режимов процесса плазменного электролитического оксидирования алюминиевых сплавов на структуру и свойства защитных оксидно-керамических покрытий

А. С. Шатров<sup>а</sup>, В. Н. Кокарев<sup>а,\*</sup>, М. И. Петржик<sup>б</sup>, С. К. Муканов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>АО «Завод алюминиевых сплавов», Подольск, Московская область, 142155, Россия

<sup>б</sup>Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, г. Москва, 119049, Россия

\*e-mail: [v-kokarev@bk.ru](mailto:v-kokarev@bk.ru)

Поступила в редакцию 29.09.2023

После доработки 02.04.2024

Принята к публикации 05.04.2024

Представлены результаты исследования влияния электрических режимов высокочастотного высоковольтного процесса плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) на свойства формируемых защитных покрытий на стандартных алюминиевых сплавах В95 Т1 и Д16ч Т. Управление процессом ПЭО проводили путем изменения амплитудных значений анодных и катодных импульсов напряжения. Микроструктуру ПЭО покрытий наблюдали с помощью растровой электронной микроскопии, а распределение механических характеристик по их толщине изучали методом измерительного (инструментального) индентирования. Установлены оптимальные электрические режимы управления процессом ПЭО: потенциодинамические с плавным снижением амплитуды анодных импульсов напряжения со скоростью 5 В/мин и с плавным увеличением амплитуды катодных импульсов напряжения со скоростью 1 В/мин. Покрытия, сформированные на оптимальных режимах ПЭО, обладают пониженной дефектностью (микротрещины, кратеры, поры), имеют высокие значения твердости 27,5–27,8 ГПа и модуля упругости 286–309 ГПа. Эти характеристики оказались выше на 33–45% и 15–30% соответственно по сравнению с твердостью и модулем упругости покрытий, сформированных на других исследованных режимах ПЭО.

*Ключевые слова:* плазменное электролитическое оксидирование, электрические режимы, оксидно-керамические защитные покрытия, алюминиевые сплавы, растровая электронная микроскопия, измерительное индентирование, локальные механические характеристики

УДК 669.2.017:620.17; 669.2.017:620.18

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.31>

## ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы являются одними из самых востребованных конструкционных материалов [1] в промышленности благодаря своей легкости, прочности, хорошей обрабатываемости. В то же время низкая твердость и недостаточная коррозионная стойкость существенно ограничивают применение алюминиевых сплавов. Для решения этой проблемы используют различные способы упрочнения или модифицирования поверхности, так как свойства изделий в большинстве случаев определяются прежде всего характеристиками поверхности.

Наиболее перспективным способом получения износостойких и антикоррозионных покрытий на алюминиевых сплавах является плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) [2]. Формирование защитных оксидно-керамических износостойких покрытий на ответственных быстроизнашивающихся деталях из

экологически выгодной альтернативой деталям из легированных сталей и чугунов, цветных металлов, монолитной керамики.

Основными недостатками в широко применяемой в промышленности технологии ПЭО на промышленной частоте [3, 4] являются низкая производительность процесса и двухслойное строение покрытия. Для получения относительно толстого (50–60 мкм) и плотного защитного ПЭО-покрытия твердостью 12–18 ГПа необходимо нарастить слой общей толщиной 100–120 мкм, для чего потребуется 2–3 ч. При этом внешний слой толщиной 40–50 мкм будет представлять собой дефектный пористый слой с пониженной твердостью 5–8 ГПа. Этот слой необходимо удалять с помощью алмазного шлифования или полирования, что весьма трудоемко. При этом удаляется и часть внутреннего плотного слоя покрытия для обеспечения требуемых чертежом параметров точности размеров детали и шероховатости покрытия.

При использовании новой высокочастотной ПЭО-технологии для формирования твердого и плотного ПЭО-покрытия толщиной 50–60 мкм потребуется всего 30–35 мин. При этом оксидно-керамический слой растет в основном в глубину металла и дефектный слой минимален по толщине. Он составляет 5–8 мкм и выглядит как матовый налет на поверхности покрытия. Этот слой легко и быстро снимается полировальным кругом или при виброобработке. При этом размеры детали остаются в поле допусков. Но чаще этот слой не удаляют, так как при пропитке пористой структуры керамического покрытия полимером (для увеличения антифрикционных и антикоррозионных характеристик) он улучшает сцепление покрытия с полимером.

В настоящее время проводится много исследований в области развития и совершенствования способа ПЭО. Принципиально новым шагом на пути создания качественных защитных покрытий на алюминиевых сплавах является применение высокочастотной технологии ПЭО с микросекундными импульсами напряжения и тока [5–8]. Это метод высокочастотного ПЭО, при котором используются биполярные импульсы напряжения и тока с очень малой длительностью (5–60 мкс). Ультракороткие импульсы позволяют применять высокие значения напряжения и тока, развивая в плазменных разрядных каналах высокие мощности при уменьшенных длительностях их воздействия. При таких мощных сверхкоротких импульсах реализуется высокая скорость нагрева, расплавления и охлаждения микрообъемов материала, что обеспечивает образование нанокристаллических структур. Размер кристаллитов в покрытии составляет 50–100 нм. ПЭО-покрытия с такой структурой отличаются одновременно высокой твердостью и износостойкостью, повышенной прочностью и относительной пластичностью [9]. Мельчайшие плотноупакованные кристаллы лучше сопротивляются микро- и макроразрушению при динамическом воздействии абразивных частиц. Такой процесс оксидирования позволяет не только получать качественные ПЭО-покрытия, но и вдвое увеличить производительность процесса до 1,5–2,5 мкм/мин. Важным также является практически полное отсутствие у ПЭО-покрытия наружного дефектного слоя, требующего трудоемких операций по его удалению.

Дальнейшим развитием этой технологии ПЭО является метод высокочастотного высоковольтного ПЭО алюминиевых сплавов, разработанный авторами настоящей статьи. Основной

особенностью усовершенствованного процесса ПЭО является строгое регламентирование длительностей прямоугольных анодных и катодных импульсов напряжения и бестоковых пауз между ними [10]. При этом длительность катодных импульсов превышает длительность анодных в 3–4 раза, а длительность бестоковых пауз превышает длительность анодных импульсов в 5–6 раз. Все это при оксидировании способствует эффективному теплоотводу и приводит к необходимым концентрационным изменениям в тонких слоях электролита, непосредственно примыкающих к границе металл-раствор. Регламентируемые длительности импульсов и пауз способствуют прохождению релаксационных процессов при сменах полярности сигнала как в приэлектродных слоях электролита, так и в самом покрытии.

Кроме того, как показала практика, длительные бестоковые паузы препятствуют переходу процесса в автоколебательный режим на окончательной фазе оксидирования. Новая технология ПЭО успешно применяется при изготовлении высоконагруженных ответственных деталей погружных нефтяных насосов и трубопроводной арматуры [11, 12].

Важнейшими параметрами ПЭО-покрытий, влияющими на их качество, являются твердость, модуль упругости и их толщина. От этих параметров непосредственно зависит надежность упрочненных деталей.

Цель настоящей работы – установить взаимосвязи электрических режимов процесса высокочастотного ПЭО с микроструктурой и локальными механическими характеристиками покрытий, сформированных на образцах стандартных алюминиевых деформируемых сплавов марок В95 Т1 и Д16ч Т. В работе исследовалось влияние изменения амплитудных значений импульсов напряжения в процессе высокочастотного высоковольтного ПЭО на качество формируемых ПЭО-покрытий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### *Объекты исследования*

Исследования проводили на образцах из двух алюминиевых сплавов: высокопрочного В95 Т1 и высокопрочного дюралюмина Д16ч Т. Диски диаметром 62 мм и высотой 6 мм были отрезаны от прутка на токарном станке с применением смазочно-охлаждающих жидкостей. Параллельные плоскости на образцах полировали на чугунной поперочной плите с применением шлифовальной бумаги зернистостью 600

Таблица 1. Перечень режимов ПЭО и обозначения исследованных образцов

Образец	Марка сплава	Обозначение	Режимы ПЭО	
			Анодный период	Катодный период
1,1	В95 Т1	А	потенциостатический	потенциостатический
1,2	В95 Т1	Б	потенциодинамический со снижением $U_a$	потенциодинамический с повышением $U_k$
1,3	В95 Т1	В	потенциодинамический со снижением $U_a$	потенциодинамический со снижением $U_k$
2,1	Д16ч Т	А	потенциостатический	потенциостатический
2,2	Д16ч Т	Б	потенциодинамический со снижением $U_a$	Потенциодинамический с повышением $U_k$
2,3	Д16ч Т	В	потенциодинамический со снижением $U_a$	потенциодинамический со снижением $U_k$

до достижения шероховатости Ra 0,8–1,0 мкм. После оксидирования образцы не обрабатывались.

#### Формирование оксидно-керамического ПЭО-покрытия

ПЭО проводили в низкоконцентрированном силикатно-щелочном электролите с минимальной добавкой солей пиррофосфата и молибдата натрия. Электролит имел рН 12, температура его не превышала 20 °С. Время оксидирования образцов 35–37 мин. Эффективная плотность тока в анодной цепи составляла 15–16 А/дм<sup>2</sup>, а в катодной цепи – 19–20 А/дм<sup>2</sup>.

Использовали транзисторный инверторный источник питания, управляемый компьютером с соответствующим программным управлением [13]. На электроды (алюминиевые образцы и графитовые противоэлектроды) подавали чередующиеся биполярные прямоугольные импульсы напряжения с частотой следования 3,9 кГц. Длительность анодных импульсов составляла 15 мкс, катодных – 60 мкс. А длительность бестоковых пауз между импульсами – 90 мкс.

Управление процессом ПЭО проводилось путем изменения амплитудных значений импульсов напряжения в анодном и катодном периодах в течение всего цикла оксидирования. Изменение амплитудных значений импульсов напряжения в процессе ПЭО делало возможным управлять энергией, выделяющейся в каналах плазменных разрядов, и таким образом влиять на качество формируемого ПЭО-покрытия. Были опробованы три режима оксидирования, которые перечислены в табл. 1.

Режим А – импульсный потенциостатический режим. В период анодной поляризации амплитудные значения импульсов напряжения составляли  $U_a = 1000$  В, а в период катодной

поляризации –  $U_k = 280$  В. Продолжительность оксидирования составляла 35 мин.

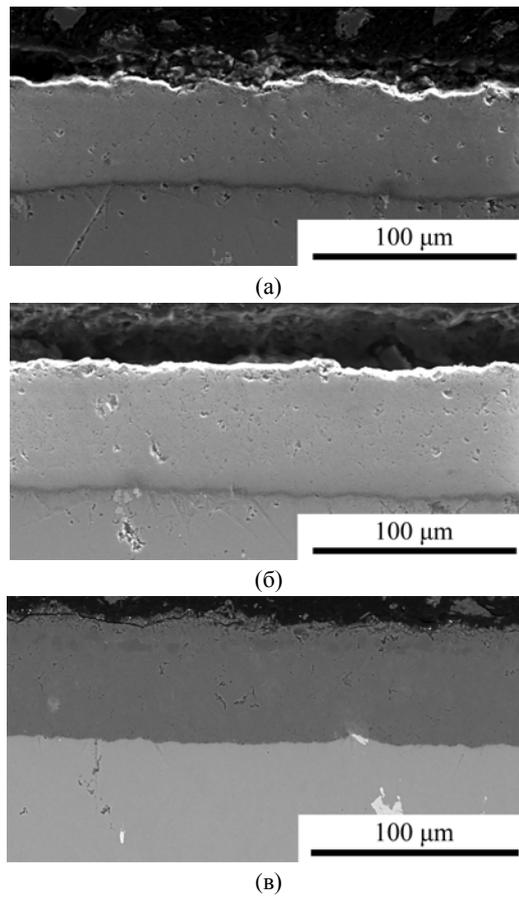
Режим Б – импульсный потенциодинамический режим. В период анодной поляризации амплитудные значения импульсов напряжения плавно уменьшались с  $U_a = 1000$  В до  $U_k = 800$  В со скоростью 5 В/мин, а в период катодной поляризации амплитудные значения импульсов напряжения плавно увеличивались с  $U_k = 280$  В до  $U_k = 320$  В со скоростью 1 В/мин. Продолжительность оксидирования составляла 37 мин.

Режим В – импульсный потенциодинамический режим. В период анодной поляризации амплитудные значения импульсов напряжения плавно уменьшались с  $U_a = 1000$  В до  $U_a = 800$  В со скоростью 5 В/мин, а в период катодной поляризации амплитудные значения импульсов напряжения плавно уменьшались с  $U_k = 280$  В до  $U_k = 240$  В со скоростью 1 В/мин. Продолжительность оксидирования составляла 37 мин.

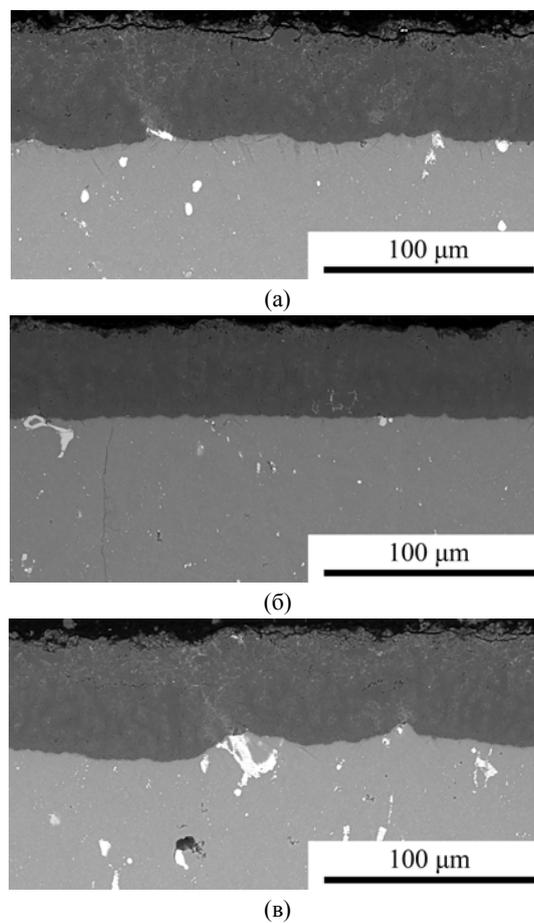
#### Методы исследований и оборудование

Из дисков с ПЭО-покрытием в Исследовательской лаборатории функциональных поверхностей НИТУ МИСИС готовили косые шлифы, образцы для которых вырезали водоохлаждаемым вращающимся алмазным диском на расстоянии 20–30 мм от центра диска. Полированные шлифы исследовали методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и измерительного (инструментального) индентирования.

С помощью растрового электронного микроскопа S-3400 N, Hitachi (ускоряющее напряжение 3 кВ) изучали микроструктуру покрытий и определяли их толщину. Измерительное (инструментальное) индентирование проводили на установке NanoHardness Tester, CSM Instruments и определяли твердость и модуль упругости [14]. Максимальная нагрузка на индентор (пирамида Берковича) – 10 мН. Скорость нагружения – 20 мН/мин. При выполнении индентирования наносили серию из 9–13 отпечатков с шагом 10 мкм вдоль прямой линии от поверхности покрытия к границе покрытие–металл.



**Рис. 1.** РЭМ-изображения поперечных сечений ПЭО-покрытий на шлифах образцов: (а) 1,1; (б) 1,2; (в) 1,3.



**Рис. 2.** РЭМ-изображения поперечных сечений ПЭО-покрытий на шлифах образцов: (а) 2,1; (б) 2,2; (в) 2,3.

**Таблица 2.** Оценка толщины ПЭО-покрытий и выявленные дефекты в покрытиях, по данным РЭМ

№ образца (режим)	Толщина покрытия, мкм	Дефекты	
		Микротрещины	Раковины
1,1 (А)	51,2 ± 1,5	+	+
1,2 (Б)	50,3 ± 2,9	–	–
1,3 (В)	48,9 ± 2,1	–	+
2,1 (А)	48,1 ± 2,7	+	+
2,2 (Б)	51,5 ± 1,4	–	–
2,3 (В)	50,5 ± 4,7	–	–

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На полированных шлифах образцов методом РЭМ исследовали структуру ПЭО-покрытий и определяли их толщину. На [рис. 1](#) и [2](#) приведены РЭМ-изображения микроструктуры при увеличении  $\times 500$ .

Анализ РЭМ-изображений структуры покрытий показал, что сформированные на всех режимах ПЭО-покрытия отличаются высокой плотностью и равномерностью по толщине. Вместе с тем на некоторых образцах были выявлены в толщине покрытий малые объемные дефекты в виде микротрещин, кратеров, пор.

В [табл. 2](#) приведены результаты замеров толщины сформированных покрытий и оценка их дефектности по РЭМ-изображениям поперечных шлифов. Как видно из [табл. 2](#), толщина покрытий на всех образцах оказалась практически одинаковой и составила 48,1–51,1 мкм. Такой узкий диапазон значений толщин свидетельствует о незначительном влиянии на толщину ПЭО-покрытий таких факторов, как марка сплава-основы и выбранные электрические режимы оксидирования.

Так у образцов 1,1 и 2,1, обработанных на потенциостатических режимах ПЭО (режим А), обнаружены микротрещины и поры в приповерхностном слое. Очевидно, что эти дефекты являются следствием интенсивных микроплазменных разрядов при анодной поляризации на завершающей фазе оксидирования. Плавное уменьшение амплитуды анодных импульсов напряжения (потенциодинамические режимы) приводило к снижению мощности микро-разрядов и уменьшению кратковременного локального роста температур в микрообъемах покрытия и, как следствие, к улучшению качества покрытий. Отсюда и снижение дефектности в ПЭО-покрытиях, обработанных в режимах Б и В.

Толщина покрытия повышает, а наличие структурных дефектов сокращает ресурс работы детали. Малое число микротрещин и пор в покрытиях, обработанных в режимах Б и В, является важным эксплуатационным фактором,

учитывая близкие значения (в пределах ошибки измерения) толщины покрытий, указанные в [табл. 2](#).

Другим важным фактором, влияющим на качество покрытий, является распределение механических свойств по их толщине, которое определяли при анализе данных измерительного индентирования. Измерение локальных механических характеристик покрытий (твердости и модуля упругости) проводили от поверхности покрытия в глубину, к границе покрытие–основа. Поскольку твердость поверхностных слоев коррелирует с износостойкостью, на основе анализа данных индентирования можно предсказать трибологические свойства без проведения длительных экспериментов.

На [рис. 3](#) и [4](#) показаны графики механических характеристик ПЭО-покрытий, измеренных в точках, расположенных с равным шагом вдоль линии движения индентора по всей толщине покрытия. Установлено, что в большинстве случаев значения твердости и модуля упругости растут и достигают наибольших значений как раз вблизи границы раздела покрытие–сплав.

Усредненная твердость ПЭО-покрытий оказалась в 6–14 раз выше твердости (1,9–2,4 ГПа) самих алюминиевых сплавов, на которых формировалось покрытие. Нагрузка в 10 мН приводила к вдавливанию индентора в алюминиевый сплав на глубину около 400 нм, а в ПЭО-покрытие индентор погружался лишь на 200 нм, что свидетельствовало о существенном упрочнении поверхностных слоев в результате проведения процесса ПЭО.

Из графиков, представленных на [рис. 3](#) и [4](#), следует, что значения твердости ( $H$ ) и модуля упругости ( $E$ ) носят волнообразный характер, что свидетельствует о неоднородной структуре оксидно-керамических покрытий и наличии в них микродефектов. Это также подтверждается относительно большим разбросом полученных значений.

Данные графиков, показанных на [рис. 3](#) и [4](#), сведены в [табл. 3](#) и [4](#). В [табл. 3](#) представлены значения твердости и модуля упругости, замеренные по толщине покрытий в локальных точках, находящихся на определенном

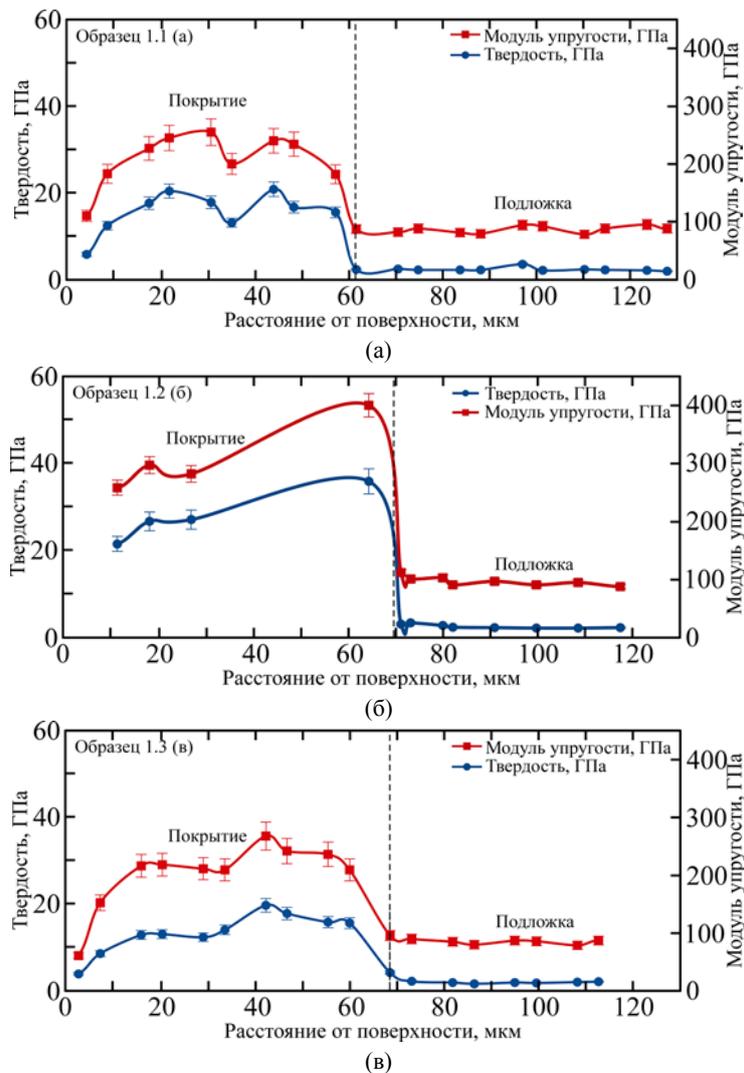


Рис. 3. Распределение твердости ( $H$ ) и модуля упругости ( $E$ ) по толщине ПЭО-покрытия на образцах: (а) 1,1; (б) 1,2 и (в) 1,3.

расстоянии от поверхности покрытия. В табл. 4 представлены усредненные по всей толщине покрытия значения твердости и модуля упругости на образцах.

При измерениях микротвердости ( $H$ ) и модуля упругости ( $E$ ) исследуемых покрытий на расстоянии 5–7 мкм от поверхности мы как раз измеряем  $H$  и  $E$  этого внешнего слоя (образцы 1,1, 1,3 и 2,1). Уже на расстоянии 10 мкм от поверхности твердость покрытий достигает значительных значений – 10–14 ГПа и далее начинает возрастать.

Исключение составляют образцы, обработанные на оптимальных потенциодинамических режимах ПЭО (например, образец 1, 2). На них внешний слой отсутствует, и поверхностный слой имеет высокую твердость. Это можно объяснить тем, что на режимах с мощными катодными разрядами в конце процесса оксидирования идет разогрев всего объема покрытия, включая и поверхностные слои, и происходят дополнительные фазовые превращения.

Анализ графиков на рис. 3 и 4 и данных, сведенных в табл. 3 и 4, показал, что наибольшие

значения механических характеристик получены на ПЭО-покрытиях на образцах 1,2 и 2,2, оксидированных в режиме Б, когда в анодный период производилось плавное снижение амплитуды импульсов напряжения, а в катодный период – плавное увеличение амплитуды импульсов напряжения.

Значения твердости по толщине у образцов 1,2 и 2,2 составляли 20, 28, 34 ГПа и 18, 24, 32 ГПа, а усредненные значения – 27,8 и 27,5 ГПа соответственно. Значения модуля упругости по толщине составляли 270, 290, 350 ГПа и 210, 290, 340 ГПа, а усредненные значения – 309 и 286 ГПа. Твердость покрытий на этих образцах превосходила твердость покрытий, полученных на других исследуемых режимах оксидирования (режимы А и В), на 33–45%, а модуль упругости – на 15–30%.

Микроразряды при катодной поляризации производят значительное термическое и плазмохимическое воздействие на формируемый оксидно-керамический слой и фазовую перекристаллизацию окислов. Увеличение мощности катодных импульсов и, соответственно,

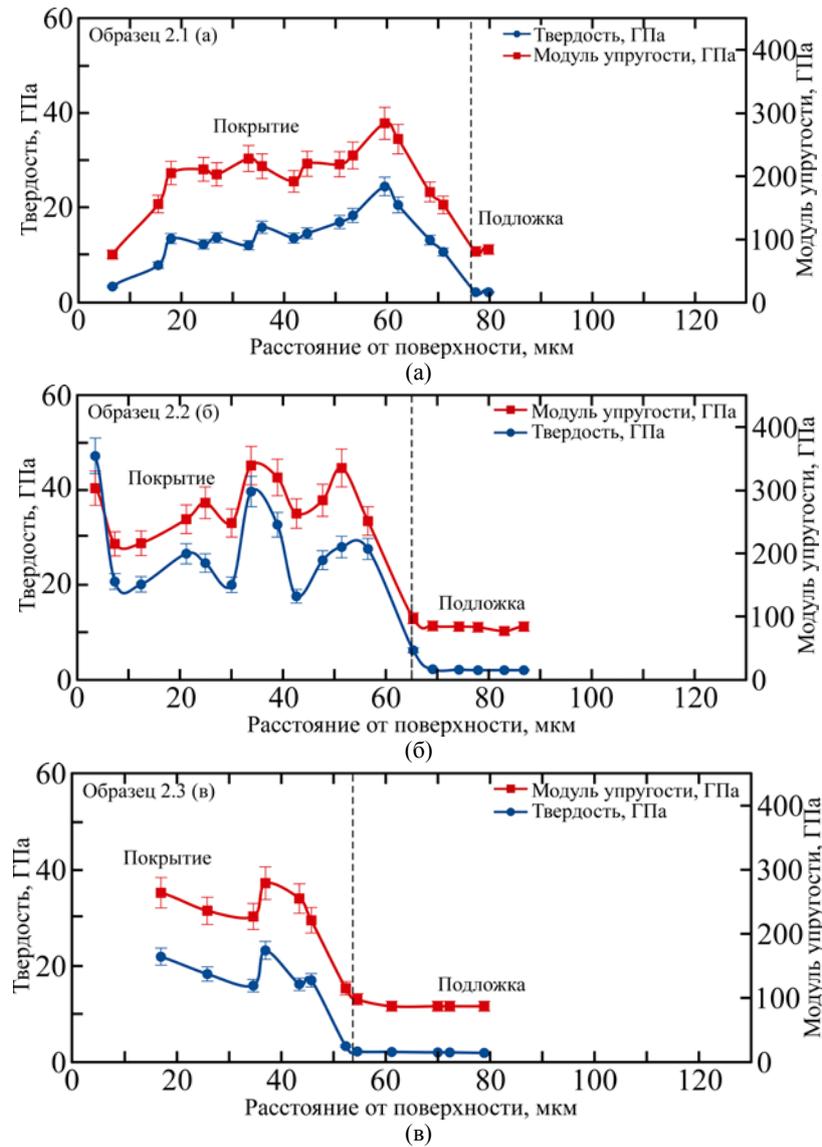


Рис. 4. Распределение твердости ( $H$ ) и модуля упругости ( $E$ ) по толщине ПЭО-покрытий на образцах: (а) 2,1; (б) 2,2 и (в) 2,3.

Таблица 3. Механические характеристики ПЭО-покрытий, распределенные по толщине покрытий

Характеристики ПЭО-покрытий на указанном расстоянии от поверхности покрытия, мкм:		Образцы					
		1,1(А)	1,2(Б)	1,3(В)	2,1(А)	2,2(Б)	2,3(В)
1. Твердость ( $H$ ), ГПа	10	13	20	10	14	18	20
	25	19	28	13	21	24	18
	45	22	34	20	25	32	24
2. Модуль упругости ( $E$ ), ГПа	10	200	270	180	200	210	270
	25	250	290	210	240	290	240
	45	240	350	270	300	340	280

Таблица 4. Усредненные по всей толщине ПЭО-покрытий значения механических характеристик

Образцы (режим)	Твердость ( $H$ ), ГПа	Модуль упругости ( $E$ ), ГПа
1,1 (А)	$16,2 \pm 2,7$	$213 \pm 28$
1,2 (Б)	$27,8 \pm 5,9$	$309 \pm 63$
1,3 (В)	$14,5 \pm 3,3$	$219 \pm 31$
2,1 (А)	$18,2 \pm 4,8$	$241 \pm 34$
2,2 (Б)	$27,5 \pm 8,7$	$286 \pm 42$
2,3 (В)	$18,8 \pm 3,1$	$247 \pm 23$

катодных микрозарядов в заключительной фазе процесса ПЭО способствует разогреву внутренней части покрытия и дополнительному образованию высокотемпературных фаз оксида алюминия.

Известно, что ПЭО-покрытия состоят из стабильных гамма- и альфа-фаз оксида алюминия и небольшого количества оксидов, а также карбидов других металлов (кремния, молибдена и др.) [4–6]. Опубликованные в научно-технической литературе данные [15, 16] свидетельствуют, что микротвердость корунда (альфа-фазы оксида алюминия) составляет 20,6–26,4 ГПа. На основании этих данных и значений твердости, полученных на образцах при исследованиях, можно предсказать существенную долю альфа-фазы оксида алюминия в составе ПЭО-покрытий.

Увеличение твердости ПЭО-покрытий до 22–26 ГПа позволяет предположить наличие в структуре покрытий существенной доли альфа-фазы оксида алюминия. Еще большие значения твердости 32–34 ГПа можно объяснить присутствием в структуре ПЭО-покрытий высокотвердых карбидов ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{Al}_2\text{Mo}_2\text{C}$ ), поскольку в составе электролита и, соответственно, самих покрытий присутствует некоторое количество углерода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На стандартных деформируемых алюминиевых сплавах сформированы плотные оксидно-керамические покрытия с использованием усовершенствованного метода высокочастотного высоковольтного ПЭО с микросекундными биполярными импульсами поляризирующего сигнала. Установлено, что изменение в процессе ПЭО амплитудных значений анодных и катодных импульсов напряжения приводило к изменению механизма образования микроплазменных зарядов, что существенным образом влияло на качество ПЭО-покрытий.

Проведена оценка влияния изменения электрических режимов ПЭО в процессе оксидирования на структуру и свойства покрытий. ПЭО-покрытия толщиной около 50 мкм, сформированные на алюминиевых сплавах В95 Т1 и Д16ч Т на оптимальных режимах, обладали пониженной дефектностью (микротрещины, поры), имели усредненные по толщине твердость (27,5–27,8 ГПа) и модуль упругости (286–309 ГПа). Твердость и модуль упругости ПЭО-покрытий на образцах, обработанных на оптимальных режимах ПЭО, оказались выше на 33–45 и 15–30% соответственно по сравнению с твердостью и модулем упругости

ПЭО-покрытий, обработанных на других исследуемых режимах ПЭО.

Таким образом, определены оптимальные режимы управления процессом ПЭО, обеспечивающие получение на типичных алюминиевых сплавах ПЭО-покрытий с наиболее высокими механическими характеристиками, повышенной плотностью и равномерностью по толщине. Это потенциодинамические режимы оксидирования с плавным снижением амплитуды анодных импульсов напряжения со скоростью 5 В/мин и плавным повышением амплитуды катодных импульсов напряжения со скоростью 1 В/мин (режим Б).

Высокочастотный высоковольтный метод ПЭО, использующий микросекундные импульсы напряжения и тока, представляет собой новую ступень на пути совершенствования процессов получения высококачественных защитных покрытий на алюминиевых сплавах.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов, Н.А., Наумова, Е.А., Акопян Т.К., *Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования*, М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2016. 256 с.
2. Premchand, S., Manojkumar, P., Lokeshkumar, E., Rama Krishna, L., et al., Surface characteristics of AC PEO coatings fabricated on commercial Al alloys, *Surf. Coat. Technol.*, 2022, vol. 14, art. ID 128975. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128975>
3. Суминов, И.В., Эпельфельд, А.В., Людин, В.Б., Крит, Б.Л., Борисов, А.М., *Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование)*, М.: Экомет, 2005. 368 с.
4. Ракоч, А.Г., Гладкова, А.А., Дуб, А.В., *Плазменно-электролитическая обработка алюминиевых и титановых сплавов*, М.: Изд. дом МИСиС, 2016. 180 с.
5. Егоркин, В.С., Вялый, И.Е., Синебрюхов, С.Л., Минаев, А.Н., и др. Морфологические особенности и механические свойства покрытий, формируемых плазменным электролитическим оксидированием на сплаве АМг3, *Вестник инженерной школы ДВФУ*, 2018, № 4 (37).
6. Hansal, S., *Electrolytic for plasma electrolytic oxidation*. Patent AT 516503A4.
7. Egorokin, V.S., Vyaliy, I.E., Sinebryukhov, S.L. and Gnedenkov, S.V., Duty cycle of the polarizing signal influence on morphology and properties of the PEO-coating on aluminium alloy, *Solid State Phenom.*, 2016, vol. 245, p. 121. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.245.121>

8. Suda, A. and Konishi, T., *Method of electrolytic ceramic coating for metal, electrolysis solution for electrolytic ceramic coating for metal and metallic material*. Patent US 2012/0000783.
9. Криштал, М.М., Павлихин, С.Е., Чудинов, Б.А., Полуниин, В.И., и др., Качество слоя, получаемого на алюминиево-кремнистых сплавах методом микродугового оксидирования, в зависимости от предварительной термической обработки, *Трение. Износ. Смазка*, 2000, т. 2, № 3, с. 6.
10. Кокарев, В.Н., Маликов, Н.А., Орлов, Е.А., Шатров, А.С., Патент RU №2681028, *Способ формирования защитного оксидно-керамического покрытия на поверхности вентильных металлов и сплавов*. Оpubл. 01.03.2019 Бюл. № 7.
11. Шатров, А.С., Кокарев, В.Н., Высокоэффективные легкие погружные многоступенчатые электроцентробежные насосы для добычи нефти в осложненных условиях, *Нефтегазовые технологии и аналитика*, 2018, т. 2, с. 14.
12. Шатров, А.С., Кокарев, В.Н., Новая технология промышленного производства износостойких деталей трубопроводной арматуры из алюминиевых сплавов с защитным керамическим наноструктурным покрытием, *Вестник арматурищика*, 2014, № 6 (19), с. 48.
13. Евсеев В.Ю., Кокарев, В.Н., Кузнецов, Н.А., Перфильев, К.М., и др., Патент RU №2623531, *Устройство для плазменно-электролитического оксидирования металлов и сплавов*, Оpubл. 27.06.2017, Бюл. № 18.
14. Петржик, М.И., Левашов, Е.А., Современные методы изучения функциональных поверхностей перспективных материалов в условиях механического контакта, *Кристаллография*, 2007, т. 52, № 6, с. 1002.
15. Абызов, А.М., Оксид алюминия и алюмооксидная керамика, *Новые огнеупоры*, 2009, № 1, с. 17.
16. Погребняк, А.Д., Кылышканов, М.К., Тюрин, Ю.Н., Каверина, А.Ш., и др., Анализ свойств и структура оксидированных покрытий, полученных на Al-Cu- и Al-Mg – сплавах, *ЖТФ*, 2012, т. 82, № 6, с. 106.

### Summary

The results of the studies of electrical modes of the high-frequency high-voltage plasma electrolytic oxidation (PEO) on the properties of the formed protective coatings on the B95 T1 and D16ч T aluminum alloys are presented. The control of the PEO process was carried out by changing the amplitude values of anode and cathode voltage pulses. The local mechanical characteristics and the structure of the PEO coatings were studied using instrumented indentation and scanning electron microscopy. As a result of the studies, optimal modes of the PEO process were determined: potentiodynamic modes with a smooth decrease in the amplitude of anode voltage pulses at a speed of 5 V/min and a smooth increase in the amplitude of cathode voltage pulses at a speed of 1 V/min. The coatings formed in the optimal modes of the PEO were characterized by a reduced number of defects (microcracks, craters, pores) and high values of hardness of 27.5–27.8 GPa and elastic modulus of 286–309 GPa averaged over their thickness. These characteristics turned out to be higher by 33–45% and 15–30%, respectively, compared with a hardness and elastic modulus of the coatings, formed in other studied PEO modes.

*Keywords:* plasma electrolytic oxidation, electrical modes of plasma electrolytic oxidation, oxide ceramic protective coatings, aluminum alloys, scanning electron microscopy, instrumented indentation, local mechanical properties