

УДК 620.197

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-44-50

Стабильность свойств защитных покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования при групповой обработке деталей

© 2018 г. **В.Б. Людин, А.В. Эпельфельд, Б.Л. Крит, И.Д. Федичкин, В.В. Мелихов, Д.Б. Чудинов**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ (НИУ))

Статья поступила в редакцию 21.01.17 г., доработана 20.04.17 г., подписана в печать 24.04.17 г.

Работа посвящена исследованию стабильности воспроизведения характеристик защитных покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования (МДО) при групповой обработке деталей. Керамикоподобные МДО-покрытия отличаются высокой стойкостью к износу, коррозии, ударным термическим нагрузкам и при этом имеют высокую адгезионную прочность. Вместе с тем существенным показателем любого технологического процесса является стабильность его результатов. В большинстве опубликованных результатов научных исследований в области МДО, как правило, не уделяется достаточного внимания анализу стабильности получаемых результатов и изучению влияния технологических параметров на этот показатель. В данной работе впервые приведены данные экспериментальной оценки стабильности воспроизведения основных характеристик (толщина, сквозная пористость и микротвердость) формируемых МДО-покрытий при одновременной обработке группы образцов и влияния на величину этих характеристик степени выработки электролита. В результате проведенных исследований было установлено, что стабильность показателей указанных характеристик МДО-покрытий во многом зависит от выработки электролита и продолжительности технологического процесса микродугового оксидирования. Отмечено, что значения этих характеристик могут существенно различаться у покрытий, одновременно сформированных на деталях в одной и той же группе, и выявлено, что стабильность показателей толщины, сквозной пористости и микротвердости покрытий повышается при увеличении продолжительности МДО-обработки. Также обосновано предположение, что изменения характеристик покрытий, формируемых при обработке группы деталей, связаны с неравномерным распределением плотности электрического тока между этими деталями и, как следствие, неодинаковым количеством электричества, прошедшим в гальванической цепи, что и определяет формирование вещества покрытия.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, групповая обработка, толщина, покрытие, сквозная пористость, микротвердость поверхности, выработка электролита.

Людин В.Б. – докт. техн. наук, профессор кафедры технологий производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов МАИ (НИУ) (109383, г. Москва, ул. Полбина, 45).
E-mail: tompve-2005@yandex.ru; ludin-nine@yandex.ru.

Эпельфельд А.В. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры МАИ. E-mail: apelfeld@yandex.ru.

Крит Б.Л. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры МАИ. E-mail: bkrit@mail.ru.

Федичкин И.Д. – аспирант той же кафедры МАИ (НИУ). E-mail: oliono1391@gmail.com.

Мелихов В.В. – аспирант той же кафедры МАИ (НИУ). E-mail: byldog2007@gmail.com.

Чудинов Д.Б. – аспирант той же кафедры МАИ (НИУ). E-mail: danil1788@mail.ru.

Для цитирования: Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Крит Б.Л., Федичкин И.Д., Мелихов В.В., Чудинов Д.Б. Стабильность свойств защитных покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования при групповой обработке деталей // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 1. С. 44–50.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-44-50.

Lyudin V.B., Apelfeld A.V., Krit B.L., Fedichkin I.D., Melikhov V.V., Chudinov D.B.

Studying stability properties of protective coatings formed by microarc oxidation for workpiece group processing

The paper studies performance reproduction stability for protective coatings formed by microarc oxidation (MAO) when processing the group of workpieces. Ceramic-like MAO coatings exhibit high resistance to wear, corrosion, shock temperature impact while featuring high adhesive strength. At the same time, an essential indicator of any technological process is the stability of its results. In general, most research findings published in the MAO field disregard the analysis of stability of obtained results and fail to study the effect that technological factors have on this parameter. This paper is the first one that provides experimental reproduction stability estimates for the key characteristics (thickness, through porosity and microhardness) of MAO coatings formed while processing

the group of workpieces and for electrolyte exhaustion effect on the values of these characteristics. The studies allow for a conclusion that the stability of these MAO coating indicators depends largely on electrolyte exhaustion and the time of microarc oxidation process. It is noted that values of these characteristics can significantly differ for coatings formed simultaneously on workpieces in the same group, and the stability of coating characteristics (thickness, through porosity and microhardness) increases with an increase in MAO processing time. The results also prove the assumption about changes in the characteristics of coatings formed when processing the group of workpieces are due to unevenly distributed electric current density between these workpieces and resulting unequal electricity amount flowed in the galvanic circuit, that determines the formation of the coating substrate.

Keywords: microarc oxidation, workpiece group processing, coating, thickness, through porosity, microhardness, electrolyte exhaustion.

Lyudin V.B. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of technology of production devices and information control systems of aircraft (TPD&ICSA), Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)) (109383, Russia, Moscow, Polbina str., 45). E-mail: tompve-2005@yandex.ru; ludin-nine@yandex.ru.

Apelfeld A.V. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of TPD&ICSA, MAI (NRU). E-mail: apelfeld@yandex.ru.

Krit B.L. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of TPD&ICSA, MAI (NRU). E-mail: bkrit@mail.ru.

Fedichkin I.D. – postgraduate student of the Department of TPD&ICSA, MAI (NRU). E-mail: oliono1391@gmail.com.

Melikhov V.V. – postgraduate student of the Department of TPD&ICSA, MAI (NRU). E-mail: byldog2007@gmail.com.

Chudinov D.B. – postgraduate student of the Department of TPD&ICSA, MAI (NRU). E-mail: danil1788@mail.ru.

Citation: Lyudin V.B., Apelfeld A.V., Krit B.L., Fedichkin I.D., Melikhov V.V., Chudinov D.B. Stabil'nost' svoystv zashchitnykh pokrytiy, formiruemyykh metodom mikrodugovogo oksidirovaniya pri gruppovoi obrabotke detalei. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funks. pokrytiya*. 2018. No. 1. P. 44–50. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-44-50.

Введение

Технология микродугового оксидирования (МДО) позволяет формировать на поверхности вентильных металлов (алюминий, магний, титан, ниобий, тантал, цирконий и др.) и их сплавов [1–3] керамикоподобные защитные покрытия, используемые в машино- и приборостроении, авиакосмической, электронной, медицинской, нефтегазовой и других отраслях промышленности [1, 4, 5]. Вентильными часто называют металлы, которые в системе металл–оксид–электролит обладают вентильным (выпрямляющим) действием, т.е. асимметрией проводимости, при которой положительный потенциал на металле (полупроводнике) со сформированной на нем электрохимическим путем анодной оксидной пленкой соответствует запирающему (обратному) направлению и, наоборот, отрицательный потенциал — проводящему (прямому) направлению тока [1].

Формируемые керамикоподобные оксидные слои (покрытия) являются продуктами поверхностной модификации металла основы под воздействием электрических разрядов [6–10] и обладают рядом защитных свойств: высокой термостойкостью [11], коррозионной и износостойкостью [12] и др. При этом МДО-покрытия характеризуются высокой адгезионной прочностью [13].

Микродуговое оксидирование относится к методам электролитно-плазменной обработки, про-

водящейся в жидких электролитах под воздействием поверхностных электрических микрозарядов [14]. Характеристики МДО-покрытий зависят как от природы металла основы, так и от состава электролита (в частности, степени его выработки) и параметров электрического режима обработки [15–18].

Существенным показателем любого технологического процесса является стабильность его результатов [19]. В опубликованных результатах научных исследований процессов МДО мало уделяется внимания анализу стабильности получаемых результатов при одновременной обработке группы деталей (образцов) [1–18]. В настоящей работе впервые приведены результаты экспериментальной оценки стабильности воспроизведения основных параметров (толщины, сквозной пористости и микротвердости) формируемых МДО-покрытий при одновременной обработке группы образцов и влияния на эти параметры степени выработки электролита.

Методика проведения экспериментов

Экспериментальные исследования проводили на образцах, изготовленных из алюминиевого сплава АМг6, с площадью поверхности 0,1 дм². МДО-обработку выполняли в силикатно-щелоч-

ном электролите в анодно-катодном режиме при равенстве анодного и катодного токов и их суммарной плотности 15 А/дм² при различной продолжительности (t_n) процесса: 15, 60 и 120 мин.

В качестве показателя выработки электролита (D , %) было выбрано отношение количества электричества ($\int Idt$, А·ч), прошедшего через электролит от момента его приготовления, к предельному значению количества электричества для данного типа электролитов:

$$D = \frac{\int Idt}{qV} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где q — предельное удельное значение количества электричества ($q = 8$ А·ч/л [20]), V — объем электролита в ванне, л.

Эксперимент проводили в 5 этапов, на каждом из которых МДО-обработке подвергали 4 партии по 6 образцов (по 2 образца для каждой продолжительности процесса). Изменения выработки электролита на каждом этапе приведены ниже:

Этап.....	I	II	III	IV	V
D , %	0–30	30–60	60–90	90–120	120–150

После МДО-обработки образцы в течение 1 ч промывали в проточной воде, а затем сушили горячим воздухом. Толщину покрытий измеряли с помощью вихретокового толщиномера ВТ-201 (ООО «Контроль. Измерение. Диагностика», г. Химки). Пористость МДО-покрытий определяли согласно методике [21]. Микротвердость МДО-покрытий, сформированных в течение 60 и 120 мин, измеряли с помощью прибора ПМТ-3М (АО «ЛОМО», г. С.-Петербург).

Для оценки повторяемости показателей свойств МДО-покрытий, формируемых при групповом (одновременном) оксидировании образцов, определяли относительные отклонения (γ_o , %) соответствующих величин с учетом возможных погрешностей (Δ_B) оценки этих величин:

$$\gamma_o = \frac{\bar{\Delta}_o + \Delta_B}{X} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

$$\Delta_B = t_r \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_{oi} - \bar{\Delta}_o)^2}{N(N-1)}}, \quad (3)$$

где $\bar{X}$ — среднее значение показателя для группы одновременно обработанных образцов; Δ_{oi} — от-

клонение показателя для i -й выборки одновременно обработанных образцов; $\bar{\Delta}_o$ — среднее значение модуля отклонения показателя для группы одновременно обработанных образцов; N — количество образцов в группе; t_r — квантиль распределения Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 1–3.

Выработка электролита влияет на толщину (h) формируемых в нем МДО-покрытий (рис. 1). Так, в диапазоне $D = 0 \div 60$ % наблюдается увеличение толщины, а при дальнейшей выработке электролита может происходить ее уменьшение (рис. 1, а, б)

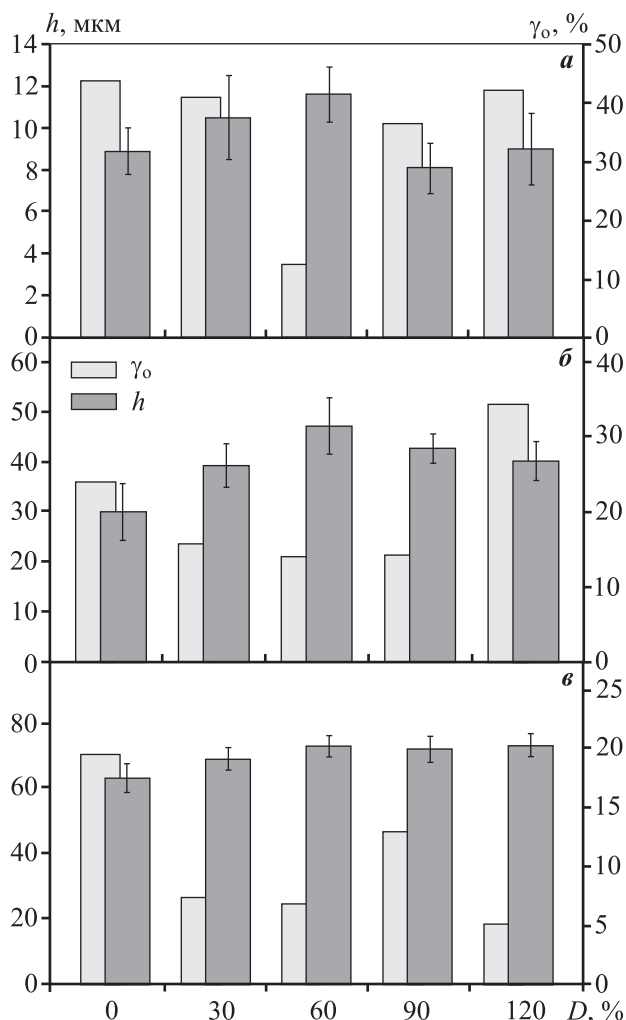


Рис. 1. Толщина (h) и ее относительное отклонение (γ_o) МДО-покрытий, сформированных при групповой обработке в течение 15 (а), 60 (б) и 120 (в) мин

или стабилизация (рис. 1, *в*) в зависимости от продолжительности МДО-обработки.

Максимальная толщина МДО-покрытий при 60 %-ной выработке силикатно-щелочного электролита может объясняться тем, что в начале своей эксплуатации электролит является практически истинным раствором (визуально прозрачным). Далее в нем постепенно накапливаются продукты гидролиза силиката (гель кремниевой кислоты) и продукты анодного растворения алюминия (взвесь $\text{Al}(\text{OH})_3$), а сам раствор становится коллоидным с признаками электролита-суспензии (т.е. визуально оказывается непрозрачным). В таких электролитах, как известно, скорость формирования МДО-покрытий выше, чем в «обычных». Затем, после инкорпорации этих вновь образовавшихся компонентов электролита в покрытие, оксидный слой создается только за счет анодного окисления металла основы и скорость формирования МДО-покрытия снижается.

Следует отметить, что толщина покрытий у одновременно обрабатываемых образцов существенно отличалась. Ее относительные отклонения достигали 45, 35 и 20 % при продолжительности МДО-обработки соответственно 15, 60 и 120 мин.

Для коррозионно-защитных МДО-покрытий наиболее существенной характеристикой является сквозная пористость (P_c), которая не должна превышать 5 % [1]. Это значение нами было принято в качестве порогового для выбраковки образцов. По этому показателю из 120 оксидированных образцов было отбраковано 5. При этом у 3 из 5 дефектных образцов сквозная пористость была аномально высокой (8–16 %), что, скорее всего, было случайным явлением, связанным с исходными дефектами поверхности образцов. У остальных 115 образцов данный показатель находился в диапазоне $P_c = 1,0 \div 4,5$ %. Таким образом, на 96 % образцов были сформированы коррозионно-защитные покрытия, показатели сквозной пористости которых представлены на рис. 2.

Результаты эксперимента показали существенные относительные отклонения сквозной пористости покрытий у образцов, обработка которых проводилась одновременно. Без учета данного показателя у дефектных образцов значения γ_o достигали 106, 77 и 50 % соответственно при продолжительности МДО-обработки 15, 60 и 120 мин.

Полученные значения микротвердости покрытий (H_μ) также варьировались в широких пределах

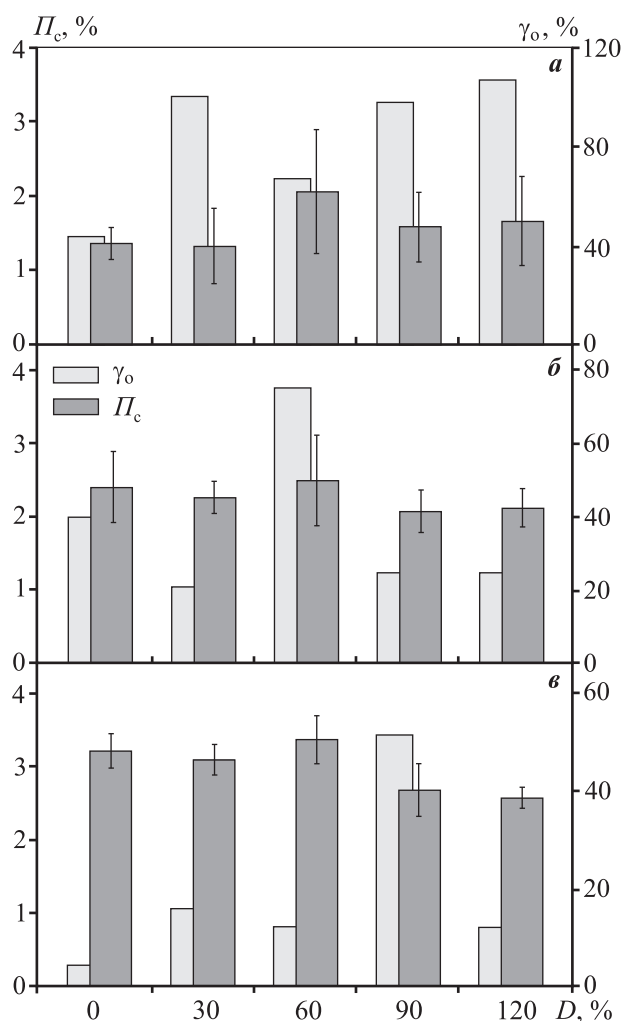


Рис. 2. Сквозная пористость (P_c) и ее относительное отклонение (γ_o) МДО-покрытий, сформированных при групповой обработке в течение 15 (*а*), 60 (*б*) и 120 (*в*) мин

от 500 до 1800 кг/мм² (рис. 3). Наибольшие значения H_μ были получены в случае формирования МДО-покрытий в свежеприготовленном электролите. У покрытий, сформированных в течение 60 мин, микротвердость снижалась на 25 % после 30 %-ной выработки электролита. Дальнейшая его выработка в пределах 30–150 % не приводила к существенным изменениям средних значений H_μ (см. рис. 3, *а*). Микротвердость покрытий, сформированных в течение 120 мин (см. рис. 3, *б*), плавно уменьшалась на 25–30 % с повышением величины D до 90 %, а затем наблюдался локальный максимум микротвердости в диапазоне $D = 90 \div 120$ %.

Относительные отклонения значений микротвердости покрытий на одновременно обработан-

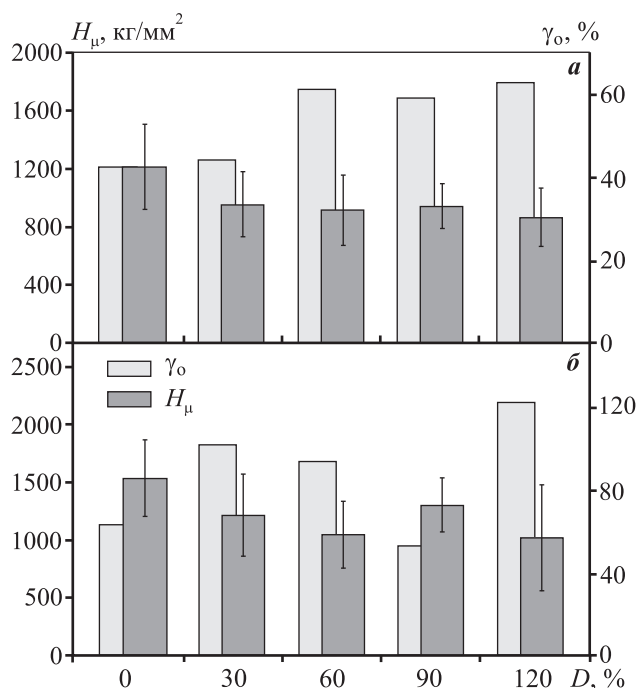


Рис. 3. Микротвердость (H_μ) и ее относительное отклонение (γ_o) МДО-покрытий, сформированных при групповой обработке в течение 60 мин (а) и 120 мин (б)

ных образцах составляли 42–63 % для 60 мин процесса МДО и 55–123 % — для 120 мин. При этом наименьшие отклонения отмечались в диапазоне выработки электролита 60–90 %.

На рис. 4 представлены относительные отклонения, рассчитанные по формуле (2), показателей свойств покрытий, сформированных во всех группах с одинаковыми продолжительностями обработки. Эти отклонения достигают: 25 % для толщины и 50 % для сквозной пористости (при МДО-обработке в течение 15 мин); 40 % для микротвердости ($t_{\text{п}} = 60$ мин). При этом с повышением продолжительности процесса МДО-обработки значения γ_o существенно уменьшаются. Так, при $t_{\text{п}} = 120$ мин отклонения толщины снижаются до 8 %, сквозной пористости — до 13 %, а микротвердости — до 11 %.

Изменения параметров формируемых покрытий связаны с особенностями МДО-обработки, проводимой в водных растворах при участии поверхностных микрозарядов. Разряды в ходе обработки локализуются в случайных пятнах, относительно медленно мигрирующих по обрабатываемой поверхности. Это приводит к неравномерному распределению плотности электрического тока между образцами (деталью) в группе,

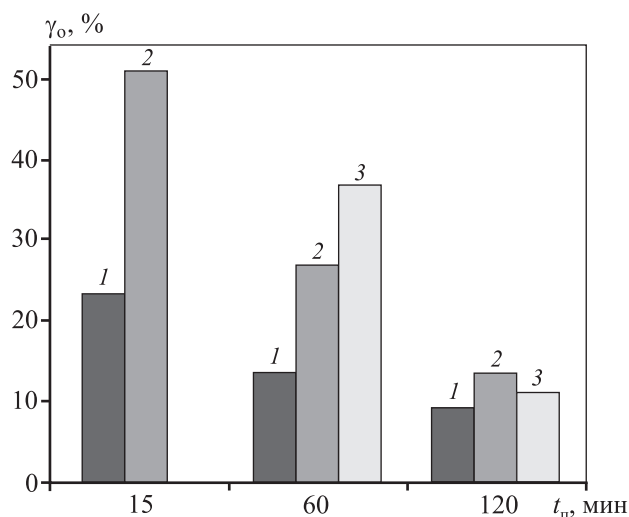


Рис. 4. Относительные отклонения (γ_o) показателей свойств для МДО-покрытий, сформированных во всех группах с одинаковыми продолжительностями обработки 1 – толщина; 2 – сквозная пористость; 3 – микротвердость

неодинаковому количеству электричества, прошедшему через них и, как результат, к различию параметров покрытий, формируемых на отдельных деталях [22–24]. Вместе с тем при повышении продолжительности процесса количество «проходов» локализованных пятен разрядов по обрабатываемой поверхности увеличивается. За счет этого выравниваются значения количества электричества, прошедшего через одновременно обрабатываемые детали, и уменьшаются различия в параметрах покрытий на этих деталях.

Закключение

Таким образом, установлено, что стабильность показателей толщины, сквозной пористости и микротвердости МДО-покрытий во многом зависит от выработки электролита и продолжительности технологического процесса микродугового оксидирования. Значения этих показателей могут существенно различаться у покрытий, одновременно формируемых на деталях в одной группе. Стабильность показателей толщины, сквозной пористости и микротвердости покрытий повышается при увеличении продолжительности МДО-обработки.

Литература/References

1. Эпельфельд А.В., Белкин П.Н., Борисов А.М., Васин В.А., Крит Б.Л., Людин В.Б., Сомов О.В., Сорокин, В.А. Суми-

- нов И.В., Францевич В.П. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий: в 3-х т. Т. I: Микродуговое оксидирование. М.; СПб.: Реноме, 2017; *Apelfeld A.V., Belkin P.N., Borisov A.M., Vasin V.A., Krit B.L., Lyudin V.B., Somov O.V., Sorokin V.A., Suminov I.V., Frantskevich V.P.* Sovremennye tekhnologii modifikatsii poverykhnosti materialov i naneseniya zashchitnykh pokrytii. Vol. I: Mikrodugovoe oksidirovanie [Modern technologies for surface modification of materials and plating of protective coatings. Vol. I: Microarc oxidation]. Moscow; St. Petersburg: Renome, 2017.
2. *Arrabal R., Matykina E., Hashimoto T., Skeldon P., Thompson G.E.* Characterization of AC PEO coatings on magnesium alloys. *Surf. Coat. Technol.* 2009. Vol. 203. P. 2207—2220.
3. *Matykina E., Berkani A., Skeldon P., Thompson G.* Real-time imaging of coating growth during plasma electrolytic oxidation of titanium. *Electrochim. Acta.* 2007. Vol. 53. P. 1987—1994.
4. *Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S.J.* Plasma electrolysis for surface engineering. *Surf. Coat. Technol.* 1999. Vol. 122. P. 73—93.
5. *Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В.* Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: Изд. дом Дальневост. федер. ун-та, 2013; *Gordienko P.S., Dostovalov V.A., Efimenko A.V.* Mikrodugovoe oksidirovanie metallov i splovov [Microarc oxidation of metals and alloys]. Vladivostok: Izdatel'skii dom Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, 2013.
6. *Мамаев А.И., Мамаева В.А.* Сильноточковые микроплазменные процессы в растворах электролитов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005; *Mamaev A.I., Mamaeva V.A.* Sil'notokovye mikroplazmennye protsessy v rastvorakh elektrolitov [High current microplasma processes in electrolyte solutions]. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2005.
7. *Yerokhin A.L., Snizhko L.A., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A.* Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. 2110—2120.
8. *Klapkiv M.D., Nikiforchin G.M., Posuvailo V.M.* Spectral analysis of electrolytic plasma during oxides synthesis on aluminum. *J. Mater. Sci.* 1995. Vol. 30. P. 333—343.
9. *Yerokhin A.L., Snizhko L.O., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A.* Spatial characteristics of discharge phenomena in plasma electrolytic oxidation of aluminium alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2004. Vol. 177—178. P. 779—783.
10. *Dunleavy C.S., Golosnoy I.O., Curran J.A., Clyne T.W.* Characterisation of discharge events during plasma electrolytic oxidation. *Surf. Coat. Technol.* 2009. Vol. 203. P. 3410—3419.
11. *Curran J.A., Clyne T.W.* Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium. *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 199. P. 168—176.
12. *Wu X., Xie F., Hu Z., Wang L.* Effects of additives on corrosion and wear resistance of micro-arc oxidation coatings on TiAl alloy. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2010. Vol. 20. P. 1032—1036.
13. *Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Сергиенко В.И.* Композиционные многофункциональные покрытия на металлах и сплавах, формируемые плазменным электролитическим оксидированием. Владивосток: Дальнаука, 2013; *Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Sergienko V.I.* Kompozitsionnye mnogofunktsional'nye pokrytiya na metallakh i splavakh, formiruemye plazmennym elektroliticheskim oksidirovaniem [Composite multi-functional coatings on metals and alloys formed by plasma electrolytic oxidation]. Vladivostok: Dal'nauka, 2013.
14. *Парфенов Е.В., Невьянцева Р.Р., Горбатков С.А., Ерохин А.Л.* Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление. М.: Машиностроение, 2014; *Parfenov E.V., Nev'yantseva R.R., Gorbatkov S.A., Erokhin A.L.* Elektrolitno-plazmennaya obrabotka: modelirovanie, diagnostika, upravlenie [Electrolytic-plasma treatment: modeling, diagnosis, control]. Moscow: Mashinostroenie, 2014.
15. *Snizhko L.O., Yerokhin A.L., Pilkington A., Gurevina N.L., Misnyankin D.O., Leyland A., Matthews A.* Anodic processes in plasma electrolytic oxidation of aluminium in alkaline solutions. *Electrochim. Acta.* 2004. Vol. 49. P. 2085—2095.
16. *Aliofkhazraei M., Sabour Rouhaghdam A.* Fabrication of functionally gradient nanocomposite coatings by plasma electrolytic oxidation based on variable duty cycle. *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 258. P. 2093—2097.
17. *Matykina E., Arrabal R., Skeldon P., Thompson G.E., Belenguer P.* AC PEO of aluminium with porous alumina precursor films. *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 205. P. 1668—1678.
18. *Yerokhin A.L., Shatrov A., Samsonov V., Shashkov P., Pilkington A., Leyland A., Matthews A.* Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process. *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 199. P. 150—157.
19. *Казанцев И.А., Кривенков А.О.* Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием. Пенза: Инф.-изд. центр ПГУ, 2007; *Kazantsev I.A., Krivenkov A.O.* Tekhnologiya polucheniya

- kompozitsionnykh materialov mikrodugovym oksidirovaniem [The technology of obtaining composite materials by microarc oxidation method]. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2007.
20. Дунькин О.Н., Людин В.Б., Суминов И.В., Шичков Л.П., Эпельфельд А.В. Система цифрового управления и мониторинга установок плазменно-электролитической обработки. *Приборы*. 2003. No. 4. С. 30—44, No. 5. С. 27—41, No. 6. С. 35—45; Dunkin O.N., Lyudin V.B., Suminov I.V., Shichkov L.P., Apelfeld A.V. Sistema tsifrovogo upravleniya i monitoringa ustanovok plazmenno-elektroliticheskoi obrabotki [Digital control and monitoring system for plasma electrolytic treatment equipment]. *Pribory*. 2003. No. 4. P. 30—44, No. 5. P. 27—41, No. 6. P. 35—45.
 21. Эпельфельд А.В. Методика измерения сквозной пористости диэлектрических покрытий, получаемых микродуговым оксидированием. В сб. *Тр. 3-й Международ. науч.-техн. конф.* Ч. 2. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2003. С. 325—329; Apelfeld A.V. Metodika izmereniya skvoznoi poristosti dielektricheskikh pokrytii, poluchaemykh mikrodugovym oksidirovaniem [Methods of measurement through porosity of dielectric coatings obtained by microarc oxidation method]. In: *Trudy 3-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [Trans. 3rd Intern. sci.-techn. conf.]. Pt. 2. Moscow: GNU VIESKh, 2003. P. 325—329.
 22. Mecuson F., Czerwec T., Belmonte T., Dujardin L., Viola A., Henrion G. Diagnostics of an electrolytic microarc process for aluminium alloy oxidation. *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 200. P. 804—808.
 23. Sundararajan G., Rama Krishna L. Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology. *Surf. Coat. Technol.* 2003. Vol. 167. P. 269—273.
 24. Curran J.A., Clyne T.W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings. *Acta Mater.* 2006. Vol. 54. P. 1985—1993.