

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.197

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,  
О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2025

Модифицирование поверхностей деталей путем формирования оксидных покрытий микроплазменным методом применяется в промышленности для улучшения их трибомеханических, антикоррозионных свойств. Поскольку характер процесса оксидирования является многофакторным, вероятность повреждения детали за счет возникновения электрохимической коррозии значительна. В статье установлены критерии, свидетельствующие о возникновении коррозии на поверхности изделия на различных этапах процесса оксидирования. Показано, что в процессе нарушения сплошности покрытия изменяется проводимость оксидного слоя, что отражается на ходе формовочных кривых напряжения на обрабатываемой детали. Предложен критерий оценки вероятности коррозии при микроплазменном оксидировании. Возможность ранней фиксации начала разрушения покрытия под действием электрохимической коррозии без прохождения полного цикла модифицирования поверхности детали повысит экономическую эффективность микроплазменного оксидирования.

*Ключевые слова:* микроплазменное оксидирование, микродуговое оксидирование, электрохимическая коррозия, площадь повреждения, керамические покрытия.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-5-15**

### ВВЕДЕНИЕ

К перспективным методам инженерии поверхности ответственных деталей из вентильных металлов относится метод микроплазменного электролитического оксидирования, или микродугового оксидирования (МДО) [1–6]. Формируемые керамические защитные покрытия сочетают высокие трибомеханические, электроизоляционные, теплофизические и антикоррозионные свойства [5–9]. Область применения получаемых изделий чрезвычайно широка: машино- и приборостроение, авиакосмическая, транспортная, авиационная и нефтегазодобывающая промышленность, радиоэлектронная и медицинская отрасли [10–15].

Технология оксидирования в электролитной плазме в целом универсальна, этапы формирования покрытия различных типов схожи. Варьирование физико-химических свойств получаемых материалов добавлением дисперсных наполнителей или составом электролита не меняет электрохимическую суть процесса [1, 5, 6, 11]. Даже при соблюдении технологии оксидирования могут возникнуть коррозионные

повреждения поверхности обрабатываемой детали и локальные изменения ее геометрических размеров [16, 17]. Важно отметить, что установить наличие разрушения покрытия можно только при полном прекращении микродуговых разрядов и извлечении детали из гальванической ванны [18], а восстановить исходную форму бракованной детали практически невозможно. При этом процесс оксидирования энергоемок и может длиться до 4 ч [19]. Поэтому стабильность воспроизведения качественного МДО-покрытия во многом определяет рентабельность применяемой технологии.

В опубликованных результатах научных исследований микроплазменного электролитического оксидирования недостаточно внимания уделено анализу причин возникновения электрохимической коррозии непосредственно при формировании покрытия. При этом все же можно утверждать, что процесс коррозии определяют несколько факторов [18, 20–23]. В первую очередь это качество электролита, его состав, степень выработки. Сохранение высоких свойств электролита, тонкая очистка от примесей – сложная технологическая задача. Входящая в состав наиболее часто используемого при МДО силикатно-щелочного электролита NaOH разъедает подложку из оксида основного металла (например, алюминия) [24]. Ингибитор коррозии  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)$  предотвращает этот процесс, однако его количество необходимо постоянно восполнять, так как оксид кремния встраивается в состав формируемого покрытия.

Форма обрабатываемого изделия во многом определяет плотность, характер силовых линий, количество электричества, проходящего к поверхности детали, и, соответственно, скорость и равномерность формирования покрытия. Резкая неоднородность электрического поля может провоцировать возникновение существенных дуговых разрядов, вызывающих отслоение покрытия и коррозию металла-основы [16]. Параметры электрического режима обработки также влияют на стабильность воспроизведения МДО-покрытий.

Электрохимическую коррозию может спровоцировать материал металла-основы. Он может быть композиционным, с включением компонентов с различными диэлектрическими свойствами [25, 26].

Перечисленные причины нарушения сплошности покрытия в процессе его формирования могут быть нивелированы технологическими методами, но полностью избавиться от повреждения изделия нельзя. Таким образом, возникновение электрохимической коррозии в процессе микроплазменного электролитического оксидирования имеет многофакторный характер [1, 16]. Это подтверждается особенностями электролитического оксидирования. Микроплазменные разряды в процессе формирования покрытия возникают в случайных зонах и перемещаются по обрабатываемой детали, вызывая неравномерное распределение плотности тока по поверхности и провоцируя возникновение коррозии даже при соблюдении технологических режимов. Дополнительным отрицательным фактором является то, что наряду с разрушением модифицируемого слоя происходит разрушение основного материала на глубину до 1 мм с потерей формы детали без возможности восстановления.

Экономическую эффективность микроплазменного оксидирования повысит возможность ранней фиксации начала разрушения покрытия под действием электрохимической коррозии, без прохождения полного цикла модифицирования поверхности детали.

Цели исследования: установление факторов, которые способствуют возникновению электрохимической коррозии на поверхности детали, и выработка критерия оценки вероятности возникновения очагов локальной коррозии при МДО.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные образцы были изготовлены из алюминиевого сплава Д16 и имели форму пластин площадью  $0,1 \text{ дм}^2$ . Формирование покрытия происходило в гальванической ванне, оборудованной рубашкой охлаждения, компрессором и вытяжной системой. Блок питания, подключенный к промышленной сети переменного тока с напряжением синусоидальной формы, действующим значением 380 В и частотой 50 Гц, обеспечивал плотность тока  $5 \text{ А/дм}^2$ .

Электролит состоял из раствора щелочи NaOH и жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  в дистиллированной воде. Силикатный модуль  $n$ , характеризующий качество стекла и равный числу молей  $\text{SiO}_2$ , приходящихся на один моль оксида натрия, был равен трем. Температура электролита поддерживалась в пределах  $15\text{--}20^\circ\text{C}$ . С учетом результатов предыдущих исследований концентрация щелочи была выбрана 2 г/л для получения более равномерного покрытия [19]. Концентрация жидкого стекла  $\nu$  варьировалась от 0 до 10 г/л. При превышении концентрации  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  10 г/л в формирующемся композиционном керамическом покрытии возрастает содержание оксида кремния, что существенно снижает физико-механические свойства упрочненного слоя [19].

Каждым составом электролита было покрыто 20 образцов. Продолжительность процесса оксидирования составляла до 2 ч. После электролитической обработки образцы промывали в проточной воде и сушили горячим воздухом. В процессе микроплазменного оксидирования фиксировались формовочные кривые напряжения на обрабатываемой детали.

Для провоцирования коррозионного разрушения в качестве детерминанты коррозии в электролит добавлялась соль NaCl в концентрации от 0,2 до 2 г/л с шагом 0,2 г/л. Данный реагент был выбран исходя из того, что химическая реакция с ионами хлора сплава алюминия приводит к образованию алюминиевых галогенидов. Это и становится причиной окисления и разрушения поверхности металла.

Площадь повреждения керамического слоя оценивалась согласно разработанной методике. Полученные образцы фотографировались с помощью камеры разрешением 12 Мп. Фото поверхности распознавалось программой Adobe Photoshop, и оценивалось общее количество пикселей в изображении (рис. 1).

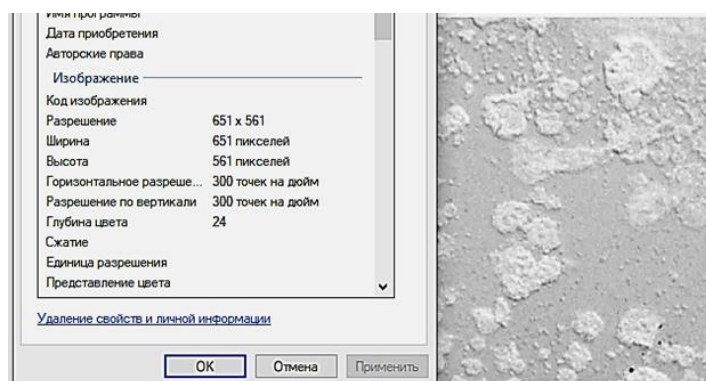


Рис. 1. Определение общей площади образца

Изображение контрастировалось, программно выделялись более светлые области, соответствующие локальному коррозионному повреждению, и рассчитывалось количество пикселей, отражающих корродированную площадь поверхности (рис. 2).

Относительная площадь повреждения  $\mu$  оценивалась как

$$\mu = N_{\pi} / N_o,$$

где  $N_{\pi}$  – количество пикселей, соответствующее площади поврежденного керамического слоя, возникшей за установленное время на поверхности детали;

$N_o$  – количество пикселей, соответствующее общей покрываемой площади детали.

Вероятность возникновения коррозии рассчитывалась по формуле

$$P = N_{\pi} / N_{\Sigma},$$

где  $N_{\pi}$  – число поврежденных деталей;

$N_{\Sigma}$  – общее число обрабатываемых деталей.

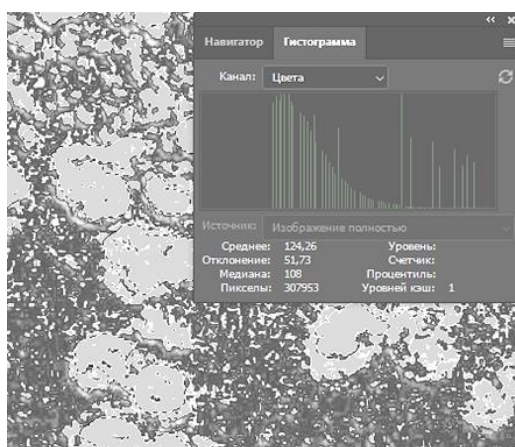


Рис. 2. Определение площади поврежденного покрытия

Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей проводилось согласно ГОСТ 8.736-2011 на прямые измерения и рекомендациям на косвенные измерения МИ 2083-90. Относительная погрешность измерений не превышала 11 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Установление факторов, которые способствуют возникновению электрохимической коррозии*

Установлена экстремальная зависимость относительной площади повреждения от концентрации жидкого стекла  $\nu$  в электролите (рис. 3). При концентрации  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  5–7 г/л признаков электрохимической коррозии не наблюдается (рис. 4(а)). Снижение концентрации менее 4 г/л приводит к существенному ослаблению защитных свойств состава электролита и значительному разрушению поверхности детали (рис. 4(б)). С повышением концентрации  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  более 8 г/л вновь можно заметить рост относительной площади повреждения.

Результаты, представленные на рис. 3 и 4, получены по окончании полного времени обработки детали, которое составляло 30 мин. Начало процесса коррозионного разрушения при оксидировании не может быть установлено визуально. Темные пятна разрушений на участках поверхности, где отсутствует МДО, скрыты яркими вспышками искровых разрядов, хаотически перемещающимися по поверхности образца. К тому же практически прозрачный электролит достаточно быстро теряет

прозрачность за счет накопления продуктов гидролиза силиката и анодного растворения алюминия. Наблюдать наличие повреждений керамического покрытия под толстым слоем электролита невозможно. Для воспроизведения качественного МДО-покрытия необходимо прогнозировать появление участков электрохимической коррозии иным, косвенным методом.

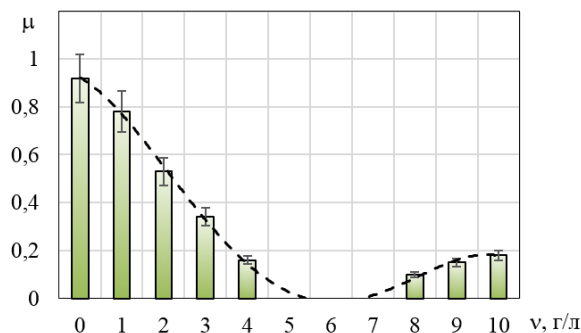


Рис. 3. Влияние жидкого стекла в электролите на относительную площадь коррозионного повреждения детали

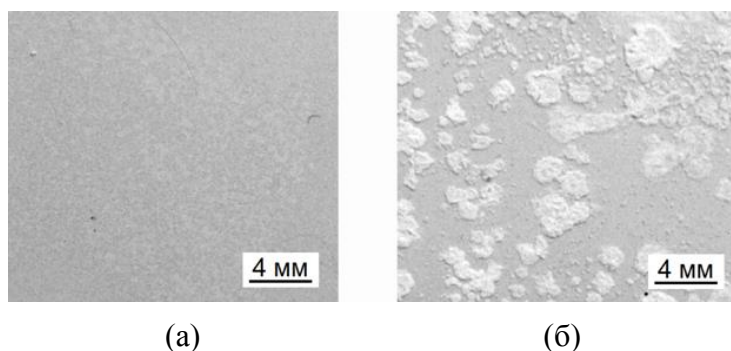


Рис. 4. Типичная поверхность детали с неповрежденным МДО-покрытием (а) и детали со следами электрохимической коррозии (б)

По результатам проведенных нами исследований коррозионное повреждение поверхности детали происходит на двух этапах МДО. В начале цикла оксидирования, в области анодирования [16], поверхность вентильного металла подвергается анодному растворению, пассивации и происходит рост оксидного слоя, обладающего диэлектрическими свойствами. При достижении оксидной пленкой определенной толщины возникающие искровые разряды способствуют электрохимическому окислению металла и разрыхлению искрами формирующегося покрытия. В случае создания химических элементов, препятствующих пассивации поверхности металла-основы и образованию оксидной пленки, образуются очаги электрохимической коррозии. При дальнейшем протекании процесса и возрастании модифицированного слоя искровой разряд переходит в микродуговой и далее в дуговой. Возникающие на этом этапе мощные дуговые разряды могут приводить к расплавлению основного материала, нарушению адгезии между керамическим слоем и основой и появлению локальных очагов разрушения МДО-покрытия. Механизм повреждения покрытия на данном этапе нельзя отнести к коррозионному типу, однако процесс имеет электролитическую природу, носит случайный характер и приводит к получению бракованного изделия.

Можно предположить, что поврежденный керамический слой обладает лучшей проводимостью и напряжение на обрабатываемой детали будет ниже, чем на детали без следов коррозии, при МДО в одинаковых составах электролита. Поэтому по изменению напряжения можно прогнозировать появление участков коррозионного разрушения непосредственно в процессе формирования покрытия.

Данное предположение было проверено построением формовочных кривых напряжения при оксидировании в электролитах с содержанием жидкого стекла 2, 6 и 10 г/л. Для электролита с содержанием жидкого стекла 2 г/л по окончании времени оксидирования более 50 % площади образца оказалось повреждено электрохимической коррозией (рис. 5). Рост напряжения в начале процесса и последующее его снижение можно объяснить одновременным образованием на оксидируемой поверхности как участков с керамическим покрытием, так и участков с коррозией. Площадь поврежденных участков, увеличивающих проводимость и снижающих напряжение в процессе обработки, растет, поэтому напряжение, достигнув максимума (в данном случае это около 300 В), постепенно снижается.

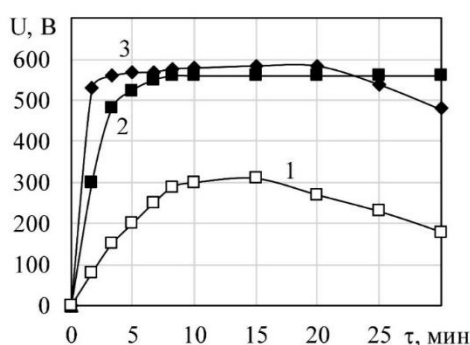


Рис. 5. Формовочные кривые напряжения на обрабатываемой детали в процессе оксидирования. Содержание жидкого стекла: 1 – 2 г/л; 2 – 6 г/л; 3 – 10 г/л

На участке анодирования и искрового разряда напряжение на образце при обработке в электролите с содержанием жидкого стекла 6 г/л возрастает практически линейно, на этапе МДО рост напряжения минимален (см. рис. 5). Стадия дугового разряда отсутствует. Скорость формирования покрытия выше, чем в предыдущем случае, поврежденные участки отсутствуют, образующийся композиционный керамический слой имеет одинаковую толщину по всей поверхности.

С увеличением концентрации жидкого стекла до 10 г/л наблюдается еще более быстрое линейное увеличение напряжения (см. рис. 5). Высокая концентрация жидкого стекла в электролите способствует быстрой пассивации металла-основы и интенсивному росту толщины оксидной пленки. На этапе микродугового разряда напряжение на обрабатываемой детали практически постоянно и затем постепенно снижается на стадии дугового разряда. При достижении определенной толщины покрытия в системе «электролит – оксидный слой – металлическая основа» начинают формироваться дуговые разряды, вызывающие локальные очаги разрушения покрытия площадью до 15–20 % от поверхности образца (светлые участки на рис. 6). При этом проводимость системы растет, напряжение уменьшается.



Рис. 6. Образец с локальными повреждениями на стадии дугового разряда

*Выработка критерия оценки вероятности возникновения  
очагов локальной коррозии при микродуговом оксидировании*

Для количественной оценки вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии  $P$  предлагается исследовать корреляцию между  $P$  и параметром  $w$  – относительной скоростью изменения напряжения:

$$w = \left| \frac{dU}{dt} \right| / \left| \frac{dU_6}{dt} \right|,$$

где  $\frac{dU}{dt}$  – скорость изменения напряжения на обрабатываемой детали в текущем процессе в заданный момент времени;

$\frac{dU_6}{dt}$  – скорость изменения напряжения при базовой технологии (базовом составе электролита) в аналогичный момент времени.

За базовую технологию (электролит) принят состав электролита, при котором относительная площадь повреждения  $\mu$  минимальна, а вероятность получения бракованных деталей стремится к нулю.

Для исследования вероятности коррозии на участках анодирования и искрового разряда сравнивались формовочные кривые напряжения при микроплазменном оксидировании образцов в базовом электролите, содержащем щелочь NaOH концентрацией 2 г/л и жидкое стекло 6 г/л, и в аналогичном электролите, содержащем также соль NaCl в качестве детерминанты коррозии. Установлено, что при добавлении в электролит NaCl коррозия покрытия всегда наблюдалась через 5–7 мин после начала процесса оксидирования, напряжение на образце возрастало медленнее, чем при базовом процессе МДО.

Экспериментально полученные зависимости вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии  $P$  и относительной скорости изменения напряжения на обрабатываемой детали  $w$  от концентрации NaCl в электролите  $k$  приведены на рис. 7.

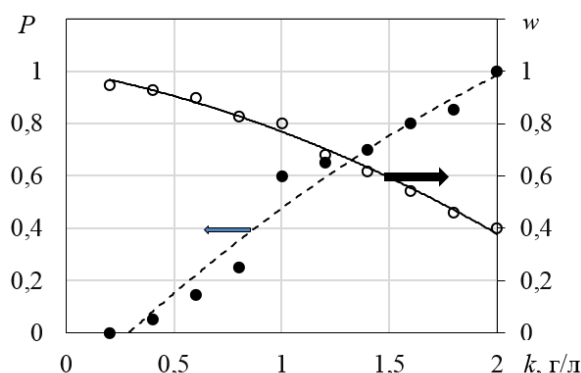


Рис. 7. Анализ вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии на участках анодирования и искрового разряда МДО



Установлено, что при  $w$  менее 0,85 (что соответствует  $\approx 20$  % поврежденных деталей) резко повышается вероятность коррозии поверхности детали  $P$ , что делает продолжение МДО нецелесообразным.

При оценке вероятности возникновения повреждения композиционного керамического слоя  $P$  на стадии дугового разряда принималась во внимание относительная скорость изменения напряжения  $w$  в процессе МДО в электролитах с различным содержанием  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ . Увеличение концентрации жидкого стекла в электролите вызывает быстрый рост толщины композиционного керамического покрытия и тем самым переход микродуговых разрядов в дуговые. За базовый режим принят процесс, проходящий в электролите, содержащем щелочь  $\text{NaOH}$  концентрацией 2 г/л и жидкое стекло в количестве 6 г/л ( $\mu = 0$ ). В данном эксперименте плотность тока была увеличена до 10 А/дм<sup>2</sup>, а время микродугового оксидирования образца – до 2 ч. Относительная скорость изменения напряжения  $w$  фиксировалась в последние 10 мин второго часа. Результаты исследования приведены на рис. 8. Установлено, что при  $w$  выше 1,15 (что соответствует  $\approx 20$  % поврежденных деталей) значительно чаще происходит отслоение покрытия под действием плазменных дуговых разрядов и процесс формирования покрытия необходимо прерывать во избежание разрушения качественной детали.

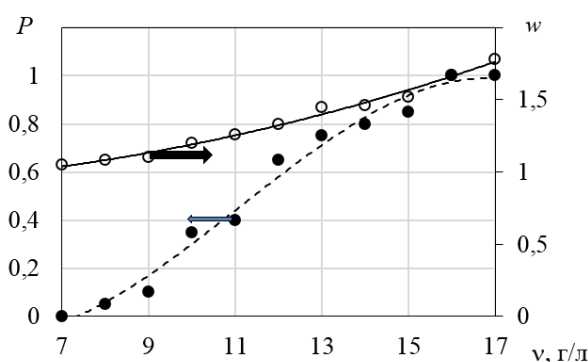


Рис. 8. Анализ вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии на стадии дугового разряда МДО

Проведенные исследования показали, что параметр «относительная скорость изменения напряжения  $w$ » можно рассматривать как критерий оценки вероятности возникновения локальных очагов электрохимической коррозии при МДО.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникновение электрохимической коррозии в процессе микроплазменного оксидирования носит сложный, многофакторный характер, что обусловлено синергетическим сочетанием составляющих электролита в заданной точке электролитической ванны и распределением электрического поля по поверхности обрабатываемой детали.

Оценить вероятность возникновения электрохимической коррозии в процессе оксидирования можно по изменению напряжения на обрабатываемой детали без прохождения полного цикла обработки. Предложенный параметр «относительная скорость изменения напряжения  $w$ » может являться критерием начала коррозии в процессе оксидирования. Относительная скорость изменения напряжения рассчитывается как отношение скорости изменения напряжения на обрабатываемой детали в



текущем процессе к скорости изменения напряжения при базовой технологии, при которой вероятность получения корродированных покрытий стремится к нулю. За базовую технологию, или состав электролита, предлагается принимать такую, при которой относительная площадь повреждения  $\mu$  минимальна.

Установлено, что на начальном этапе оксидирования при снижении  $w$  менее 0,85 резко повышается вероятность коррозионного повреждения поверхности детали, что делает дальнейшее модифицирование нецелесообразным. На заключительном этапе значение  $w$  не должно превышать 1,15 для предотвращения разрушения готового покрытия.

Результаты данного исследования могут быть использованы для оценки воспроизведения качественных покрытий по вероятности возникновения электрохимической коррозии непосредственно в процессе микроплазменного оксидирования. Учитывая существенную энергоемкость МДО, это будет способствовать повышению рентабельности технологического процесса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Borisov A.M., Krit B.L., Lyudin V.B., Morozova N.V., Suminov I.V., Apelfeld A.V. Microarc oxidation in slurry electrolytes // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. V. 52. P. 50–78.
2. Kaseem M., Fatimah S., Nashrah N., Ko Y.G. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance // *Progress in Materials Science*. 2021. V. 117. P. 100735.
3. Arbuzova S.S., Butyagin P.I., Bol'shanin A.V., Kondratenko A.I., Vorob'ev A.V. Microarc Oxidation of Metal Surfaces: Coating Properties and Applications // *Russian Physics Journal*. 2020. V. 62. P. 2086–2091.
4. Fotovvati B., Namdari N., Dehghanghadikolaei A. On coating techniques for surface protection: A review // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019. V. 3. P. 3010028.
5. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
6. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
7. Krishna L.R., Purnima A.S., Sundararajan G. A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings // *Wear*. 2006. V. 261. P. 1095–1101.
8. Wang W., Xin C., Feng Z., Li G., Zhang R., Hu J., Tang M., Liu Y., Zhang W. Ceramic coatings by microarc oxidation of Ti and Al alloys // *Surfaces and Interfaces*. 2022. V. 33. P. 102260.
9. Zhou T., Zhang X., Liu J., Wang R., Shen B., Hu W., Liu, L. A new antibacterial Ca/P/Al containing coating // *Applied Surface Science*. 2020. V. 509. P. 144765.
10. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. V. 389. № 1–2. P. 169–176.

11. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние дисперсных наполнителей на фрикционные свойства керамических покрытий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 26–36.
12. Jiang B.L., Yang W., Su Y. Engineering applications of microarc oxidation and magnetron sputtering // *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*. 2008. V. 33. № 1. P. 86–90.
13. Витязь П.А., Басинюк В.Л., Белоцерковский М.А. Применение наноструктурных материалов и активированных методов инженерии поверхности для создания современных объектов техники // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. № 3 (20)–4 (21). С. 46–66.
14. Штокал А.О., Рыков Е.В., Желтухин Р.В., Артемьев А.В., Добросовестнов К.Б., Говорун Т.А., Шаталов В.К., Богачев В.А., Баженова О.П. Перспективы применения микродугового оксидирования при создании теплового экрана космического аппарата «Интергелиозонд» // *Идеи К.Э. Циолковского в контексте современного развития науки и техники: Материалы 53-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского*. Калуга: АКФ Политоп, 2018. С. 356–359.
15. Xu C., Chen L., Zheng C., Zhang H., Zhao C., Wang Z., Lu S., Zhang J., Zhang L. Improved Wear and Corrosion Resistance of Microarc Oxidation Coatings on Ti–6Al–4V Alloy with Ultrasonic Assistance for Potential Biomedical Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2021. V. 23. № 4. P. 202001433.
16. 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.
17. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. V. 389. P. 169–176.
18. 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 // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2018. № 1. С. 44–50.
19. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 5–13.
20. Xue W., Hua M., Shi X., Tian H. Growth kinetics of microarc oxidation films on cast aluminum alloy and their corrosion resistance // *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/ Journal of the Chinese Ceramic Society*. 2007. V. 35. P. 731–735.
21. Kosari A., Zandbergen H., Tichelaar F., Visser P., Taheri P., Terryn H., Mol J. In-situ nanoscopic observations of dealloying-driven local corrosion from surface initiation to in-depth propagation // *Corrosion Science*. 2020. V. 177. P. 108912.
22. Shen Y., Wang H., Pan Y. Effect of current density on the microstructure and corrosion properties of MAO coatings on aluminum alloy shock absorber // *Key Engineering Materials*. 2018. V. 764. P. 28–38.
23. Трушкина Т.В., Михеев А.Е., Сиденко Н.А., Раводина Д.В., Гирн А.В. Влияние технологических режимов микродугового оксидирования на пористость и коррозионную стойкость сплава системы Al-Mg-Sc // *Вестник Сибирского*

государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2016. № 17 (4). С. 1072–1076.

24. Boinet M., Bernard J., Chatenet M., Dalard F., Maximovitch S. Understanding aluminum behaviour in aqueous alkaline solution using coupled techniques. Part II: Acoustic emission study // *Electrochimica Acta*. 2010. V. 55. P. 3454–3463.

25. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.

26. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2019. № 12. С. 80–87.

**Для цитирования:** Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Оценка вероятности возникновения электрохимической коррозии при формировании микроплазменных оксидных покрытий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 5–15.

## **ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF ELECTROCHEMICAL CORROSION DURING THE FORMATION OF MICROPLASMA OXIDE COATINGS**

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: vnvkv@yandex.ru

Modification of parts surfaces by forming oxide coatings using the microplasma method is used in industry to improve their tribomechanical and anticorrosive properties. Since the nature of the oxidation process is multifactorial, the probability of damage to the part due to the occurrence of electrochemical corrosion is significant. The article establishes criteria indicating the occurrence of corrosion on the surface of the product at various stages of the oxidation process. It is shown that in the process of violation of the continuity of the coating, the conductivity of the oxide layer changes, which is reflected in the course of the forming voltage curves on the workpiece. A criterion for assessing the probability of corrosion during microplasma oxidation is proposed. The possibility of early detection of the onset of coating destruction under the action of electrochemical corrosion without going through a full cycle of modifying the surface of the part will increase the economic efficiency of microplasma oxidation.

**Keywords:** microplasma oxidation, microarc oxidation, electrochemical corrosion, damage area, ceramic coatings.

Поступила в редакцию/received: 13.02.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;  
принята/accepted: 19.03.2025