

# ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 691.9.048.4

Воробьёва Е.И., Чигринова Н.М.

## МЕХАНИЗМЫ АКТИВИЗАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИСКРЕНИЯ ПРИ АНОДНОМ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований изменения параметров формируемых покрытий при анодном микродуговом оксидировании с квазикатодами, позволяющие установить механизмы активизации и стабилизации процесса искрения, связанного с перераспределением микрозарядов на поверхности детали, вызываемым изменением плотности тока, и приведены зависимости влияния параметров квазикатодов на показатель неравномерности толщины создаваемых покрытий.*

### **Постановка проблемы**

Для изменения свойств и характеристик МДО-покрытий изделий, способных работать в условиях интенсивного износа и агрессивных средах, необходимо определить механизмы влияния микроплазменных процессов на формируемый при АМДО рельеф поверхности покрытия, его толщину и плотность.

В качестве факторов, влияющих на свойства покрытий, как правило, выступают плотность тока, соотношение катодной и анодной составляющих тока, состав электролита. Величина плотности тока оказывает значительное влияние на скорость протекания физико-химических процессов на обрабатываемой поверхности и на эксплуатационные характеристики полученного оксидного слоя. Однако при достижении определенных значений плотности тока энергия локальных зарядов возрастает до величин, при которых наблюдается эффект кавитации. При чрезмерно больших плотностях тока кавитационное разбрызгивание может превысить массу образующегося оксида. Объясняется это тем, что расплавленная капля оксида не успевает закристаллизоваться и поэтому следующий заряд приходится на это же место. В таких случаях вся подведенная энергия концентрируется через малую площадь дна кратера, разрушая не только слой образовавшегося оксида, но и материал основы [1].

Известно [2], что микродуговые разряды возникают на поверхности детали спонтанно и хаотично и, на первый взгляд, распределены равномерно, что должно определять равномерный прирост по всей оксидируемой поверхности толщины образуемых оксидов. Однако при более внимательном наблюдении можно заметить, что первые микрозаряды возникают на острых краях рельефа анода. Здесь же наблюдаются наиболее сильные микрозаряды, провоцирующие более быстрый выход на микродуговой режим и переход с микродуговых зарядов на дуговые. Следовательно, распределение силовых линий электрического поля таково, что по периметру их больше, нежели в центральной части поверхности [3]. То есть, изначально микропробой и микрозаряды возникают в местах с максимальной напряженностью электрического поля, каковыми и являются выступы и острые кромки на поверхности обрабатываемой детали.

Неравномерность токораспределения приводит к разнотолщинности покрытия по поверхности изделия.

Происходящие неравномерные изменения состояния поверхностного слоя на различных участках рельефа анода могут служить характеристикой «рассеивающей» способности электролита при МДО-процессе, что определяет неравномерность прироста толщины формируемого оксида, его пористость, и, следовательно, нестабильность рабочих свойств.

Поэтому решение задачи изменения параметров микроплазменных явлений с целью обеспечения большей стабильности протекания АМДО позволит разработать мощные механизмы управления процессом получения прогнозируемых характеристик оксидируемой поверхности.

Для решения задачи выравнивания по толщине формируемых на профилированной поверхности анода покрытий, особенно при АМДО сложнопрофильных объектов, исследователи предлагают различные способы [2–12].

Так, для управления дискретностью электрических разрядов используют способы внешних физических воздействий, таких как наложения ультразвуковых и электромагнитных колебаний [2, 4]. Также для равномерного распределения тока на поверхности деталей служат гидродинамические факторы: перемешивание электролитов; качание, вращение; применение струйных и проточных электролитов. С этой же целью применяют дополнительные катоды, профилирование, непроводящие экраны, подвески [5–12]. Сочетание перечисленных способов позволяет повысить качество покрытий и интенсифицировать процесс даже в тех случаях, когда электролит имеет низкую рассеивающую способность.

Для обработки наружных поверхностей изделий, изделий со сложным профилем или крупногабаритных изделий предлагается использование устройств МДО, в состав которых входят дополнительные противэлектроды (катоды) в виде перфорированных пластин, через которые прокачивается раствор электролита [5, 6]. Размер и форма отверстий перфорации, как правило, определяется авторами экспериментально, как и их местоположение. Существуют цилиндрические конструкции катодов («стаканы») либо конструкции, повторяющие форму поверхности изделия, как с перфорацией, так и без нее [7]. В случае если эти катоды приводятся в движение, то дополнительно обеспечивается барботаж электролита либо его интенсивное перемещение [8, 9].

Размеры таких дополнительных противэлектродов варьируются в зависимости от площади обрабатываемой поверхности. Если катод локализуется на отдельном участке поверхности, как в случае поэтапного оксидирования крупногабаритных изделий, то мощность микроплазменных разрядов на этом участке будет одинаковой [8], а, следовательно, это должно обеспечить относительную равномерность толщины на этом участке поверхности. Для расширения номенклатуры изделий используют способ перемещения или сканирования катодом поверхности изделия [10]. При этом ему придается форму поверхности, а площадь выбирают на порядок меньше площади поверхности детали. Это же явление можно использовать для обеспечения заданной неравномерности толщины или свойств покрытия.

Для обработки внутренних поверхностей, полых цилиндров, труб, отверстий глухих и сквозных дополнительные электроды изготавливаются по форме стержня [11] либо втулки [12], коаксиально расположенных относительно обрабатываемой поверхности. Катоды-втулки могут быть, так же как и пластины, выполнены с перфорацией и без нее. В качестве материала для катодов используют нержавеющую сталь [5–12].

Местоположение дополнительных электродов определено авторами параллельно или эквидистантно обрабатываемой поверхности, однако, сведения об оптимальном расстоянии от катода до поверхности (зазор), при которых обеспечивалась бы максимальная толщина и равномерность покрытия, не приводятся, за исключением авторов [7, 12], которые проводили эксперимент с зазором 5–10 мм, и в результате получили сниженную пористость покрытий, увеличение содержания упрочняющей фазы  $\alpha$ -

$Al_2O_3$  (оксида алюминия), повышение микротвердости и увеличение толщины упрочняющего слоя.

Описанные варианты дополнительных катодов, применяющихся в установках для микродугового оксидирования, как правило, имеют сложную конструкцию, проектируются под конкретное изделие; при этом их размеры и местоположение авторами не конкретизируется. Они призваны увеличить производительность используемых при МДО установок, снизить энергоемкость процесса, а в некоторых случаях, сократить расходы на электролит, обеспечив при этом рост толщины покрытия. Однако сведения о равномерности толщины покрытия и его свойствах многими авторами не приводятся.

Известно [13], что в процессе АМДО скорость роста толщины покрытий, как на стадии искрения, так и на стадии появления крупных микродуговых разрядов, является в основном функцией не от количества пропущенного электричества, а от его произведения на разницу амплитудного анодного напряжения и напряжения пробоя слабых мест уже имеющегося тонкого диэлектрического слоя. Когда очень высокая мощность концентрируется в малом количестве слабых мест такого слоя, образуются кратерообразные нарушения сплошности покрытия, и оно становится неравнотолщинным

Для устранения данного эффекта можно использовать электролизную ванну с дополнительными катодами [14]. Сущность применения дополнительных катодов состоит в том, что в электролизной ванне располагают катоды, с помощью которых распределение плотности тока по поверхности изделия, а соответственно и толщина нанесенного покрытия, будут более равномерными. Этот способ известен в гальваническом процессе и традиционно размеры и расположение дополнительных катодов в нем определяли экспериментально [15].

Обычно применяют две разновидности конфигурации дополнительных катодов, которые можно использовать при АМДО, – это катоды призматической формы (пластины) и цилиндрической (стержни, втулки). Возможно изготовление катодов сложной конфигурации, повторяющей форму обрабатываемой поверхности изделия. Их расположение, как правило, эквидистантно или коаксиально обрабатываемой поверхности.

При использовании типовых дополнительных катодов обычно возникает проблема барботажа раствора электролита и его прокачки через межэлектродный промежуток. Для ее решения авторы используют катоды с перфорацией, которая может иметь форму калиброванных каналов (отверстий) переменного поперечного сечения, увеличивающегося от периферии к центральной зоне. Эти обстоятельства сопряжены со значительными материальными и временными затратами и далеко не всегда удается получить оптимальные решения.

### ***Предлагаемая идея***

В настоящем исследовании предлагается еще один, исключая недостатки имеющихся, способ активации и стабилизации процесса анодного микродугового оксидирования за счет установки и определенного размещения дополнительных катодов варьируемой конфигурации в электролизной ванне, что позволит получать покрытия с прогнозируемыми характеристиками поверхности.

Решение задачи стабилизации искрения в процессе АМДО за счет размещения в электролизной ванне дополнительных катодов заключается в определении их количества, конструкции, размеров и мест расположения в пространстве ванны, при которых значение критерия  $R$  неравномерности распределения толщины МДО-покрытия на аноде, выбранного в качестве критерия оптимизации процесса АМДО, будет минимальным.

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i(x, y, z) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} \quad (1)$$

где  $\delta_{\min}$  – минимальная толщина покрытия, мкм;  $\delta_i(x, y, z)$  – толщина покрытия в точке анода с координатами  $x, y, z$ , мкм;  $m$  – количество точек, в которых вычисляется толщина покрытия.

Стабилизацию искрения и массопереноса в анодно-катодной области с образованием равнотолщинных покрытий за технологически выгодное время авторы предлагают обеспечить за счет изменения в существующей концепции использования дополнительных катодов, прежде всего, их конструктивных параметров и соотношения площадей анода и катода, а также правил ориентирования в пространстве электролизной ванны относительно размещенного в ней анода.

Для фиксации роли таких квазикатодов в изменении динамики процесса АМДО, определяющего размерные показатели покрытия и его свойства, были разработаны приемы ориентирования оксидируемых деталей относительно катодов различной конфигурации в процессе АМДО при различном значении межэлектродного промежутка.

### ***Методика экспериментов***

Эксперименты по изучению влияния местоположения квазикатодов в ванне на динамику массопереноса в процессе АМДО были выполнены в водно-щелочном электролите в диапазоне плотностей тока  $i = 5-12$  А/дм<sup>2</sup> при полном погружении образцов в раствор, с величиной межэлектродного промежутка  $h = 5-15$  мм и временем оксидирования  $t = 10-100$  мин.

Обрабатывали две группы образцов из алюминиевого сплава АД33, представляющие собой плоские пластины размером 3×40×50 мм: 1 группа – подвергалась обработке типовым методом АМДО; 2 группа – обработку выполняли с установленным квазикатодом в ванне.

В качестве источника питания для микродугового процесса использовали конденсаторный источник со ступенчатой регулировкой электрического тока.

Изучали влияние размерных параметров квазикатода на кинетику процесса АМДО и динамику прироста толщины формируемого покрытия. При этом эксперименты проводили для 4 серий анодно-катодной группы: 1) площадь плоского квазикатода значительно меньше площади исследуемой поверхности; 2) площадь плоского квазикатода соразмерна площади исследуемой поверхности; 3) площадь плоского квазикатода значительно превышает площадь исследуемой поверхности; 4) цилиндрический квазикатод установлен коаксиально исследуемой поверхности образца.

Эксперименты для 2 изучаемых групп образцов проводили при условии изменяющегося расстояния между поверхностями анода и катода, и различных начальных плотностях тока и длительности процесса.

Толщину полученного оксидного покрытия измеряли по 49 точкам плоскости поверхности, после чего определяли ее неравномерность по формуле 1.

### ***Результаты исследования***

На первом этапе изучали влияние величины межэлектродного промежутка между оксидируемым анодом и установленным квазикатодом от 5 до 15 мм на динамику массопереноса и, соответственно, толщину формируемого покрытия. АМДО алюминиевых образцов двух исследуемых групп проводили при плотности анодного тока  $i = 8,5$  А/дм<sup>2</sup> в течение 50 мин.

В результате было установлено, что величина неравномерности толщины покрытия для 1 группы составила  $R = 27,8$  % (рис. 1, а). Для 2 группы с увеличением меж-

электродного расстояния до 10 мм при тех же значениях режимов обработки величина неравномерности толщины покрытия снизилась и составила  $R = 18,6\%$  (рис. 1, б).

Из данной серии экспериментов можно сделать вывод, что при наличии квазикаатода в ванне неравномерность толщины покрытия снижается.

Второй этап предусматривал в качестве переменного параметра – продолжительность АМДО, изменяющаяся в диапазоне значений 10–100 мин.

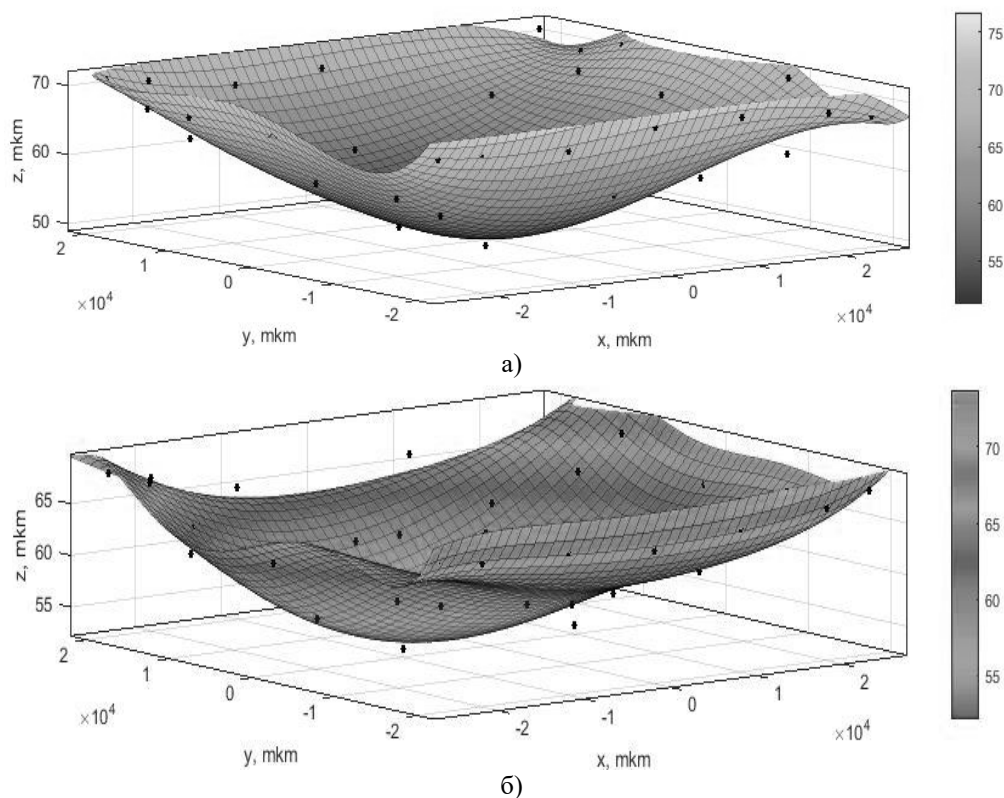


Рис. 1. 3D-диаграмма профиля поверхности, сформированной при плотности тока  $8,5 \text{ А/дм}^2$ , длительности оксидирования 50 мин,  $x, y$  – размеры оксидируемых образцов, мкм,  $z$  – толщина покрытия, мкм

В результате с возрастанием времени АМДО для образцов 1 группы выявлена закономерность увеличения неравномерности толщины покрытия  $R$  до 43 %, а для образцов второй группы – до 38 % (рис. 2).

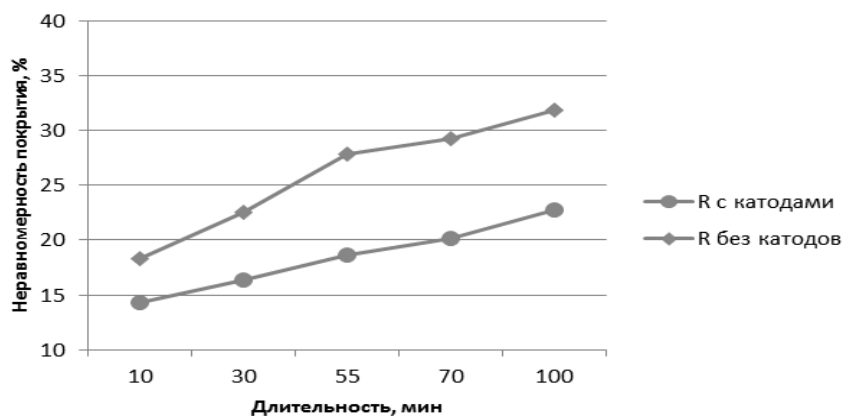


Рис. 2. Зависимость неравномерности профиля поверхности при различной длительности процесса

На третьем этапе изучали влияние местоположения квазикатода на неравномерность толщины формируемого покрытия. Из графиков, приведенных на рис. 3, видно, что при изменении данного параметра в процессе АМДО для образцов 1-ой группы наблюдается возрастание неравномерности покрытия на 1,35 % через каждый мм межэлектродного промежутка, а для образцов 2-ой группы этот показатель существенно меньше и не превышает 0,85 %.

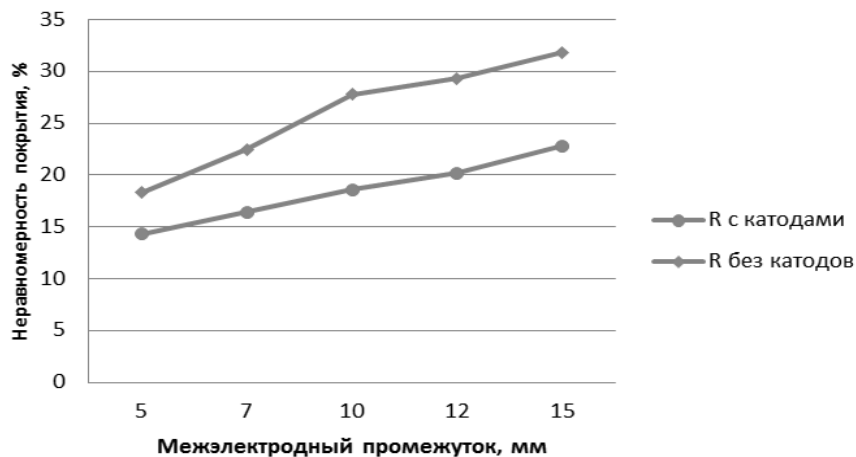


Рис. 3. Зависимость неравномерности профиля поверхности от величины межэлектродного промежутка

При комплексном исследовании влияния нескольких изучаемых факторов на параметр неравномерности толщины формируемого покрытия  $R$  установлено следующее.

При изменяющихся длительности оксидирования и плотности тока больший вклад в увеличение неоднородности рельефа поверхности сформированного покрытия вносит изменение плотности тока (рис. 4). При этом, чем больше данный параметр, тем более неоднороден рельеф.

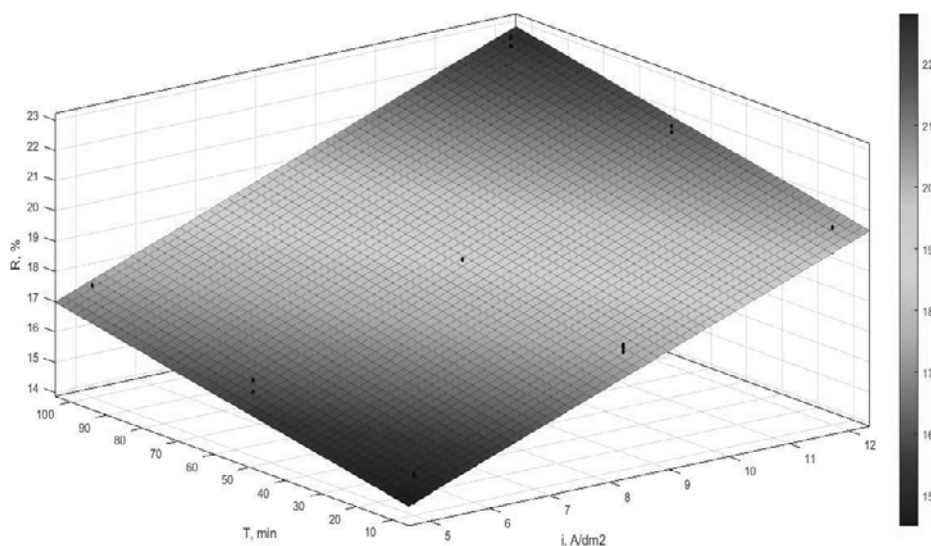


Рис. 4. Зависимость неравномерности профиля  $R$  поверхности от длительности оксидирования  $T$  и плотности тока  $i$

Комбинированное воздействие плотности тока и межэлектродного промежутка на изменение неравномерности толщины покрытия также подтвердило преобладание роли плотности тока (рис. 5).

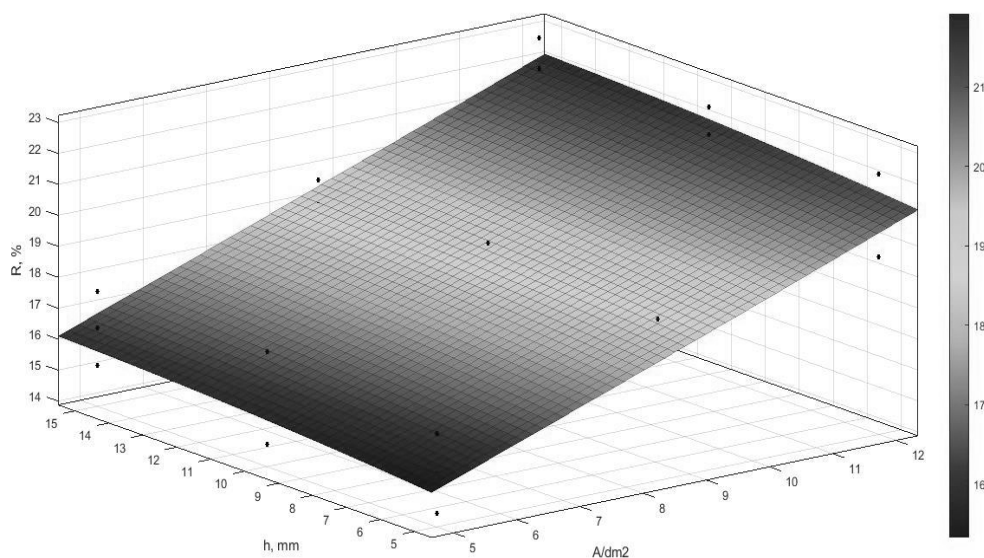


Рис. 5. Зависимость неравномерности профиля R поверхности от величины межэлектродного промежутка  $h$  и плотности тока  $i$

### Заключение

Повышение плотности тока в процессе микродугового оксидирования увеличивает скорость формирования поверхности оксидного покрытия, свидетельствуя об активизации АМДО, однако при этом возрастает неравномерность его рельефа. Присутствие дополнительного квазикатода в электролизной ванне при малых плотностях тока ( $i = 5 \text{ A/dm}^2$ ) снижает эту неравномерность на 28 %, а при больших плотностях ( $i = 12 \text{ A/dm}^2$ ) – на 39 % (рис. 6). Следовательно, при больших плотностях положительный эффект от присутствия квазикатодов в ванне больше.

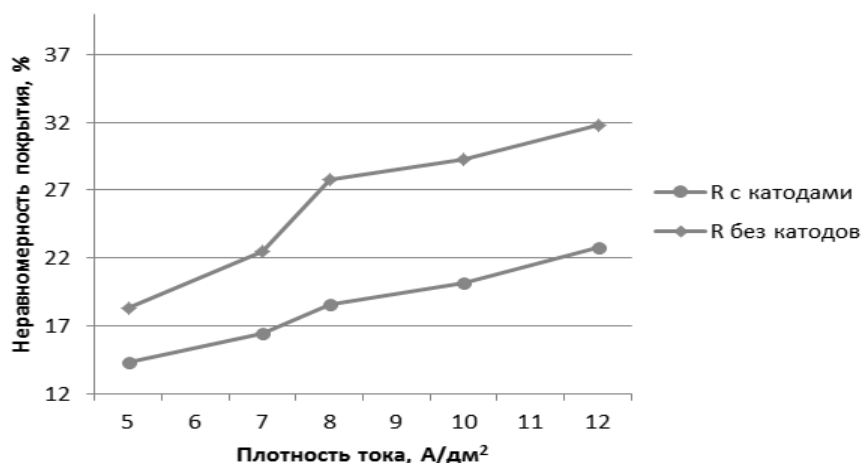


Рис. 6. Зависимость неравномерности профиля поверхности от плотности тока

Таким образом, вследствие установления роли и преимущественного вклада каждого из определяющих ход процесса АМДО факторов возможна активация и стабилизация процесса искрения, что значительно более гарантировано при наличии в про-

странстве электролизной ванны дополнительных квазикатодов. При этом их количество, конструктивные параметры, площадь и месторасположение заметно влияют на степень неравнотолщинности формируемого покрытия, обуславливая особенности его рельефа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Суминов, И. В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборуд.)/ И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин, Б. Л. Крит, А. М. Борисов — М.: ЭКОМЕТ, 2005. — 368 с.
2. Нечаев, Г. Г. Влияние внешних физических воздействий на микроплазмохимические процессы при электрохимическом формировании оксидных покрытий на сплавах алюминия: автореф. дис. канд. техн. наук: 02.00.05 / Г. Г. Нечаев; Саратов. гос. техн. ун-т. — Саратов., 2008. — 22 с.
3. Антропов, Л. И. Теоретическая электрохимия. — М.: Высшая школа, 1975. — 560 с.
4. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электрохимическим воздействием: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Н. М. Чигринова. — Минск, 2009. — 371 с.
5. Устройство для электрохимического нанесения защитных покрытий: пат. 9152 Респ. Беларусь, МПК С 25 J 7/00, С 23 С 14/24 / Ю. Г. Алексеев, А. Э. Паршутто, В. С. Нисс, А. Ю. Королев, Г. Е. Слепнев; заявитель РУП «Научно-технолог. парк БНТУ «Политехник»— № u 20120502; заявл. 16.05.2012; опубл. 30.04.2013.
6. Устройство для электролитно-плазменной обработки токопроводящего изделия: пат. 16101 Респ. Беларусь, МПК В 23Н 3/00, В 23Н 3/04, В 23Н 7/26, С 25F 7/00, С 25F 3/00, С 25F 3/16 / И. С. Куликов; заявитель Государственное научное учреждение "Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны" НАН Беларуси – № u 20100530; заявл. 08.04.2010; опубл. 30.08.2012.
7. Устройство для микродугового оксидирования рабочей поверхности поршня гидроцилиндра: пат. 152 032 U1 РФ, МПК С25 D 11/02, С25 D 19/00 / А. В. Коломейченко, И. Н. Кравченко, А. С. Алмосов, Н. В. Титов; заявитель Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-технический университет» Министерства обороны Российской Федерации № 2014143723/02; заявл. 30.10.2014; опубл. 27.04.2015 Бюл. № 12.
8. Шаталов, В. К., Лысенко А.Л. Закономерности роста оксидных пленок при микродуговом оксидировании титановых сплавов: Уч. пособие / В. К. Шаталов, А. Л. Лысенко. Под ред. В. К. Шаталова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 100 с.
9. Способ микродугового оксидирования металлов и их сплавов и устройство для его осуществления: патент 2 251 595 С1 РФ, МПК С25 D 11/02, С25 D 17/02, С25 D 17/10 / Ю. А. Кузнецов, А. Н. Батищев, Н. Н. Студенников; заявитель Орловский государственный аграрный университет – № 2003136293/02; заявл. 15.12.2003; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13.
10. Способ электролитического микроплазменного нанесения покрытий на детали из вентильных металлов: пат. 2 171 865 С1 РФ, МПК С25 D 11/02 / А. Ю. Павлов, С. Д. Ованасенко, А. В. Резниченко, А. А. Васильев, О. В. Соколова; заявитель Павлов А. Ю. и др. № 2000102545/02; заявл. 01.02.2000; опубл. 10.08.2001.
11. Устройство для электролитно-плазменной обработки полых металлических изделий: пат. 10686 Респ. Беларусь, МПК С 25 FJ 7/00 / С. И. Багаев; заявитель ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» - № u 20140448; заявл. 12.12.2014; опубл. 30.06.2015.
12. Способ получения покрытий на поверхностях глубоких сквозных отверстий в изделиях из сплавов вентильных металлов: пат. 2 669 952 С1 РФ, МПК С25D 11/02 / О. Е. Чуфистов, Е. А. Чуфистов, П. Н. Цибизов, В. О. Вяльмисов, П. М. Филатов; заявитель ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет") – № 2017141436; заявл. 28.11.2017; опубл. 17.10.2018 Бюл. № 29.
13. ХЛА Мо Оптимизация процесса микродугового оксидирования алюминиевых и магниевых сплавов. Дис....к.т.н., – Москва, 2007. – с. 133.



14. Владимиров, Б. В., Микродуговое оксидирование магниевых сплавов (обзор) / Б. В. Владимиров, Б. Л. Крит, В. Б. Людин, Н. В. Морозова, А. Д. Российская, И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд / ЭОМ. 2014. №3. С.1–38.

15. Каданер, Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1960. – 414 с.

**УДК 621.793**

**Девойно О.Г.<sup>1</sup>, Володько А.С.<sup>1</sup>, Пилипчук А.П.<sup>2</sup>, Девойно Д.Г.<sup>2</sup>,**

**Мишин А.А.<sup>2</sup>, Исак В.Г.<sup>2</sup>**

**ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ  
ИЗ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ  
ПАРААРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАМЕННОГО  
НАПЫЛЕНИЯ**

***1. Белорусский национальный технический университет***

***2. Военная академия Республики Беларусь***

***Минск, Беларусь***

*Разработана технология формирования многослойных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена на поверхности параарамидных тканей методом газопламенного напыления. Данная технология позволяет получать материалы с удельной прочностью на уровне конструкционных сталей. Представлены результаты испытаний полученных материалов.*

***Постановка задачи***

Перспективным материалом для создания покрытий в настоящее время является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ, UHMWPE – Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene). Это полимер линейной структуры с очень длинными цепями, не имеющими боковых ответвлений [1, 2]. Ведущими производителями СВМПЭ являются Mitsui Petrochemical Ind., Япония и Ticona Engineering Polymers for Technical Solutions, Германия. Основной особенностью СВМПЭ являются длинные линейные параллельно ориентированные цепочки полиэтилена (рис. 1) со сверхвысокой массой молекул (до 6 млн.) и относительно слабыми связями между (10–20 кДж/моль) [3] по сравнению, например, с тканями Kevlar™, Twaron™, имеющим короткие молекулы и сильные связи между ними. Эта особенность способствует более эффективной передаче и распределению нагрузки на материал, что обеспечивает высокую жесткость и ударопрочность СВМПЭ, превосходящий по данному показателю любой другой термопластичный полиэтилен.