УДК 621.3

Вета Робертовна Аубакирова

(ФГБОУ ВО УГАТУ, старший преподаватель, к.т.н., Россия, г.Уфа, [veta\_mr@mail.ru](mailto:veta_mr@mail.ru))

Гузель Рагиповна Мукаева

(ФГБОУ ВО УГАТУ, доцент, к.т.н., Россия, г.Уфа, [mukaeva.guzel@yandex.ru](mailto:mukaeva.guzel@yandex.ru))

Рузиль Галиевич Фаррахов

(ФГБОУ ВО УГАТУ, доцент, к.т.н., Россия, г.Уфа, frg1982@mail.ru)

Аким Витальевич Буторин

(ФГБОУ ВО УГАТУ, магистрант, Россия, г.Уфа, akim-butorin@mail.ru)

Евгений Владимирович Парфенов

(ФГБОУ ВО УГАТУ, профессор, д.т.н., Россия, г.Уфа, [evparfenov@mail.ru](mailto:evparfenov@mail.ru))

Veta R. Aubakirova

(Ufa State Aviation Technical University, senior lecturer, Ph.D., Russia, Ufa, veta\_mr@mail.ru)

Guzel R. Mukaeva

(Ufa State Aviation Technical University, associate professor, Ph.D., Russia, Ufa, mukaeva.guzel@yandex.ru)

Ruzil G. Farrakhov

(Ufa State Aviation Technical University, associate professor, Ph.D., Russia, Ufa, frg1982@mail.ru)

Akim V. Butorin

(Ufa State Aviation Technical University, student, Russia, Ufa, akim-butorin@mail.ru)

Evgeny V. Parfenov

(Ufa State Aviation Technical University, professor, Russia, Ufa, evparfenov@mail.ru)

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ПЭО**

MATHEMATICAL MODELS OF COATING PROPERTIES UNDER DIFFERENT TECHNOLOGICAL MODES OF PEO

*Аннотация. Рассмотрен вопрос математического моделирования толщины покрытия, тока и потенциала коррозии в зависимости от типа импульсного электрического режима обработки, частоты импульсов и длительности обработки.*

*Abstract. The issue of mathematical modeling of the coating thickness, current and corrosion potential depending on the type of pulsed electrical processing mode, pulse frequency and processing duration is considered.*

*Ключевые слова: оксидирование, биорезорбируемый магниевый сплав, математическое моделирование*

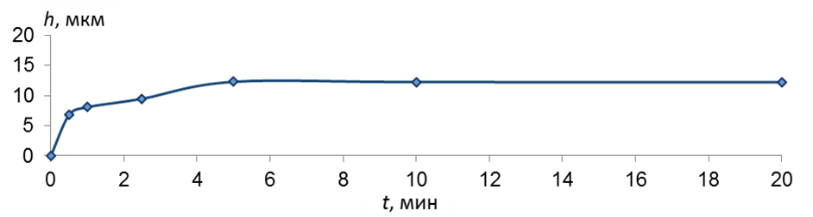
*Keywords:* *oxidation, bioresorbable magnesium alloy, mathematical model*

Магний и его сплавы имеют применение в различных отраслях промышленности, например, в аэрокосмической и автомобильной. Также биосовместимые магниевые сплавы вызывают интерес для изготовления биорезорбируемых имплантатов [1]. Важной задачей для повышения эксплуатационных свойств изделий из магниевых сплавов является формирование защитных покрытий. Большими перспективами в данной области обладает экологичный и производительный процесс плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). [2] Однако, ПЭО сложный и нелинейный процесс, поэтому математическое моделирование свойств покрытия позволит сократить время разработки технологического режима для получения покрытия с заданными свойствами.

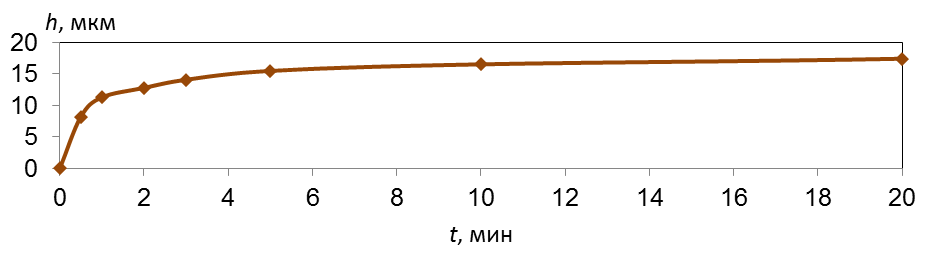
ПЭО образцов сплава AZ31 проводилось на автоматизированной технологической установке с одновременной регистрацией значений тока и напряжения в водном силикатно-щелочном электролите в импульсном униполярном и биполярном режимах. Частота импульсов в разных экспериментах 62 Гц, 713 Гц и 3136 Гц. Амплитуда импульсов 360 В. Исследовалась длительность обработки до 20 мин. После обработки измерялась толщина покрытия вихретоковым толщиномером Defelsko Positector 6000. Электрохимические исследования проводились с помощью потенциостата-гальваностата-импедансметра Элинс Р-5Х (Россия) в растворе Рингера в трехэлектродной ячейке объемом 80 мл с хлоридсеребряным электродом сравнения и платиновым противоэлектродом. Испытания проводились при температуре 37 градусов. Было проведено измерение электродного потенциала и поляризационных кривых. Ток и ЭДС коррозии вычислялись по поляризационным кривым методом Тафеля.

На Рис. 1 показаны графики изменения толщины покрытия во времени, из которых видно, что основной рост покрытия происходит в первые две минуты обработки. За 20 минут обработки в режиме PBP *h* = 16 ± 0,78 мкм, в режиме PUP *h* = 12,5 ± 0,92 мкм. На рисунке также показан характер изменения средних значений тока и напряжения, импеданса процесса. Значительное увеличение длительности обработки сказывается негативно на ток *Ico*rr и ЭДС коррозии *Ecorr* (Рис. 2). Для режима PBP наименьший ток коррозии достигается после 5-ти минут обработки, для режима PUP после 3-х минут. Наименьшее значение *-Ecorr* соответствует длительности обработки 3 минуты, как для PUP, так и для PBP режима. Ухудшение коррозионных свойств с увеличением длительности обработки может быть связано с возникновением дефектов покрытия из-за того, что при достижении определенной толщины покрытия, энергии микроразрядов может быть недостаточно, чтобы пробить всю толщину покрытия и доставить расплав металла и покрытия на поверхность. Это бы способствовало росту покрытия, а пробой происходит на поверхности или в пузырьках газа в толщине покрытия, что приводит к возникновению дефектов, благоприятных для образования питтингов коррозии. Таким образом, оптимальное время ПЭО магниевого сплава 3-5 минут.

Частота импульсов также оказывает влияние на свойства покрытия, как показано на Рис.3. С ростом частоты наблюдается уменьшение *-Ecorr*. На низкой частоте 62 Гц наблюдалось повышенное значение *Ico*rr в обоих PUP и PBP режимах. В режиме PBP на низких частотах формируется более толстое покрытие.

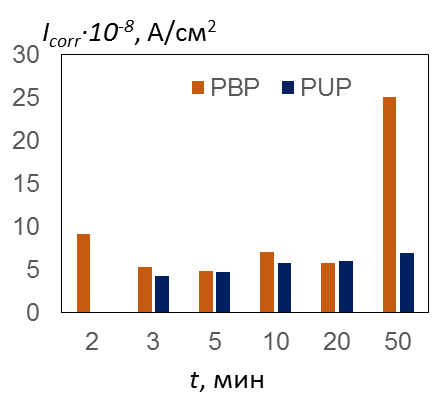


*а)*

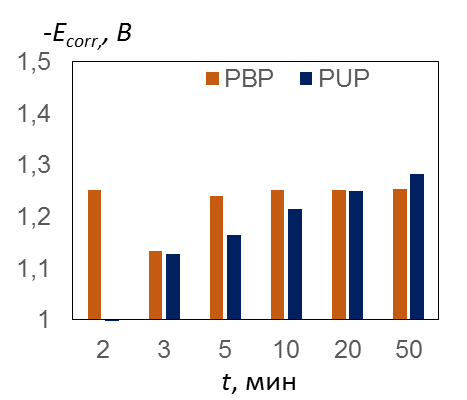


*б)*

*Рис. 1. Изменение толщины покрытия h во времени  
 в режиме PUP (а) и PBP (б) при частоте импульсов 3136 Гц*

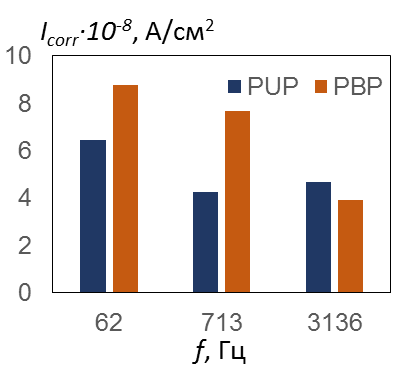


*а)*



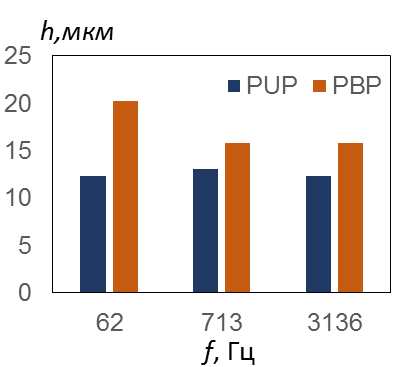
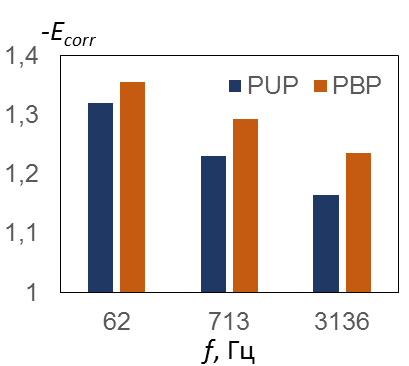
*б)*

*Рис.2. Изменение тока коррозии Icorr (a) и ЭДС коррозии -Ecorr (б)  
во времени для PUP и PBP режимов.*



*а)*

*б)*



*в)*

*Рис. 3. Зависимость тока коррозии Icorr (а) и ЭДС коррозии -Ecorr (б)   
и толщины покрытия h (в) от частоты для PUP и PBP режимов.*

Математические модели построены в виде аддитивных регрессионных уравнений, связывающих значения факторов режима обработки (PUP или PBP), частоты *f* и длительности обработки *t* со значениями тока и ЭДС коррозии *Icorr* и *Ecorr* и толщиной покрытия *h*.

Для анализа значимости коэффициентов регрессионных моделей [4] проводилось масштабирование входных и выходных факторов в диапазон [-1,1].

Получены следующие регрессионные уравнения:







Модели коррозионных свойств *Icorr*, *Ecorr* построены на основе выборки из 23 экспериментов, модель толщины покрытия - на основе выборки из 35 экспериментов. Коэффициент детерминации R2 [5] полученных моделей *Ico*rr, *Ecorr* и *h* составил 0,66; 0,70 и 0,71 соответственно. Анализируя значения коэффициентов уравнений, можно сделать выводы о степени значимости входных факторов, и о влиянии на положительное или отрицательное изменение выходных факторов. Не очень высокие показатели коэффициента говорят, о более сложном, чем линейное влиянии входных факторов обработки на свойства покрытия, для описания которых будет собрана более обширная выборка экспериментальных данных.

Все выбранные входные факторы характеризуются коэффициентами одного порядка и оказывают значительное влияние на выходные факторы. Ток коррозии уменьшается с ростом частоты, увеличивается при увеличении длительности обработки, ток коррозии в PUP режиме меньше. Потенциал коррозии принимает отрицательные значения, но становится более положительным (меньше по модулю) с ростом частоты и в режиме PUP по сравнению с PBP; увеличение длительности обработки сказывается негативно. Толщина покрытия уменьшается с ростом частоты, увеличивается во времени, и в PBP режиме покрытия толще.

Таким образом перспективными режимами для дальнейших исследования является PUP режим при частоте импульсов 700-800 Гц и PBP режим при частоте импульсов 3000-3200 Гц. Оптимальная длительность ПЭО магниевого сплава 3-5 минут.

**Список литературы**

1. *Zheng Y. F., Gu X. N., Witte F.* Biodegradable metals // Mater Sci Eng R Rep. 2014. № 77 pp. 1-34.

2. *Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S. J.* Plasma electrolysis for surface engineering // Surface and Coatings Technology, vol. 122, 1999, pp. 73–93.

3. *Parfenov E. V., Yerokhin A., Nevyantseva R. R., Gorbatkov M. V., Liang C. J., Matthews A.* Towards smart electrolytic plasma technologies: An overview of methodological approaches to process modelling // Surface and Coatings Technology, vol. 269, 2015, pp. 2–22.

4. *Кремер Н. Ш.,* *Путко Б. А.* Эконометрика: Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 311 с.

5. Протасов К. В. Статистический анализ экспериментальных данных. М.: Мир, 2005. 232 с.