

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА АТМОСФЕРНУЮ КОРРОЗИЮ МАГНИЯ

Т.В. Панова, В.С. Ковивчак, Т.В. Черникова  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
пр. Мира 55а, Омск, Россия,  
panovatv@omsu.ru; kvs\_docent@mail.ru; tanya.hryanina@mail.ru

Изучена возможность улучшения сопротивления окислению при облучении мощным ионным пучком наносекундной длительности поликристаллического магния. Показано, что сформированный при облучении мощным ионным пучком с плотностью тока  $150 \text{ A/cm}^2$  поверхностный слой позволил повысить сопротивление окислению в 2.6 раза. Методами рентгеноструктурного и энергодисперсионного анализа обнаружено уменьшение содержания окислов магния в облученных мощным ионным пучком образцах, а также уменьшенное их содержание при выдержке в атмосферной среде при температуре  $100^\circ\text{C}$ .

**Ключевые слова:** мощный ионный пучок; облучение; магний; атмосферная коррозия.

## INFLUENCE OF HIGH-POWER ION BEAM IRRADIATION OF NANOSECOND DURATION ON THE ATMOSPHERIC CORROSION OF MAGNESIUM

T.V. Panova, V.S. Kovivchak, T.V. Chernikova  
F.M. Dostoevsky Omsk State University., 55a Mira Ave., Omsk, Russia  
panovatv@omsu.ru; kvs\_docent@mail.ru; tanya.hryanina@mail.ru

The possibility of improving the resistance to oxidation by irradiation with a high-power ion beam nanosecond duration of polycrystalline magnesium has been studied. It is shown that the formed surface relief under irradiation with a high-power ion beam with a current density of  $150 \text{ A/cm}^2$  made it possible to increase the resistance to oxidation by a factor of 2.6. The methods of X-ray diffraction and energy-dispersive analysis revealed a decrease in the content of magnesium oxides in samples irradiated with a high-power ion beam, as well as a reduced content during exposure to the atmosphere at a temperature of  $100^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** high-power ion beam; irradiation; magnesium; atmospheric corrosion.

### Введение

Обработка мощным ионным пучком (МИП) является одним из эффективных методов воздействия на поверхность металлов и сплавов [1]. При воздействии такого пучка на поверхность мишени поверхностный слой за время наносекундной обработки нагревается до высокой температуры (вплоть до температур фазовых переходов, плавления, испарения) и, затем, охлаждается с высокой скоростью за счет теплопроводности материала. В результате указанных высокоскоростных процессов нагрева и охлаждения наблюдаются изменения фазового состава, микро- и субструктуры материала. В связи с тем, что

сопротивление окислению – одно из важных поверхностных свойств металлических материалов, облучение МИП может оказать на него значительное влияние за счет создания модифицированного слоя [2]. Повышение стойкости поверхностных слоев металлов и сплавов к атмосферной коррозии, окислению является актуальной задачей. В настоящей работе представлены исследования по влиянию облучения мощным ионным пучком наносекундной длительности на сопротивление к атмосферному окислению поликристаллического магния. Магний — это металл, активно окисляющийся и взаимодействующий с различными газами, присутствующими в

атмосфере, а так же с парами воды, что приводит к его высокой атмосферной коррозии [3].

### Материалы и методы исследования

Образцы магния диаметром 12 мм и толщиной 2 мм после шлифовки и полировки облучались на ускорителе ионов «Темп» (Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского) протон-углеродным пучком (30%  $H^+$  и 70%  $C^+$ ) с энергией частиц  $E \approx 200$  кэВ, длительностью импульса облучения  $\tau = 60$  нс в диапазоне плотностей тока пучка 50-150 А/см<sup>2</sup>. С целью ускорения окисления магния необлученные и облученные МИП образцы выдерживались на воздухе при повышенной температуре (100<sup>0</sup>С). Фазовый анализ и оценка напряженно-деформированного состояния проводились по дифрактограммам, снятым на рентгеновском дифрактометре ДРОН 3М на медном  $K\alpha$ -излучении. Морфологию поверхности и элементный состав модифицированных слоев исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (JSM-6610LV, “JEOL” с энергодисперсионным анализатором Inca-350).

### Результаты и их обсуждение

В статье [4] нами было показано, что при воздействии МИП на магний происходит уменьшение оксида магния, связанное с испарением и газодинамическим разлетом тонкого поверхностного слоя, которое с увеличением плотности тока происходит наиболее интенсивно. Анализ зоны теплового влияния показал уменьшение размеров зерен в среднем в 1,6 раза для всех режимов облучения.

На рис. 1 представлены дифрактограммы образцов магния исходного и облученного МИП с плотностью тока 150 А/см<sup>2</sup> после нахождения в среде атмосферы при повышенной температуре в течение одного часа. Анализ показал уменьшенное содержание окисного слоя в облученном образце по сравнению с необлученным (исходным).

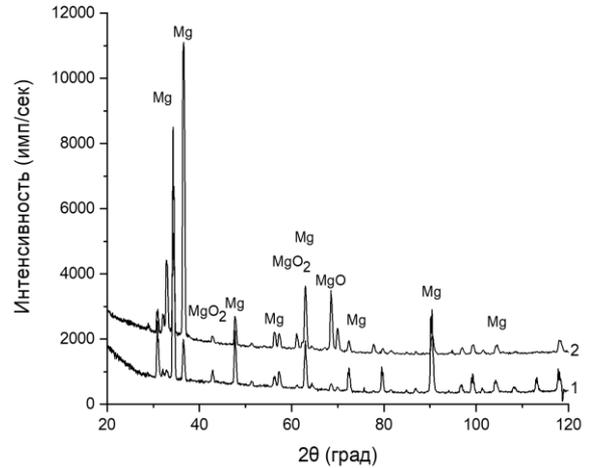


Рис. 1. Дифрактограммы необлученного магния (1) и облученного МИП с плотностью тока 150А/см<sup>2</sup> тремя импульсами после выдержки в среде атмосферы при температуре 100<sup>0</sup>С в течение одного часа

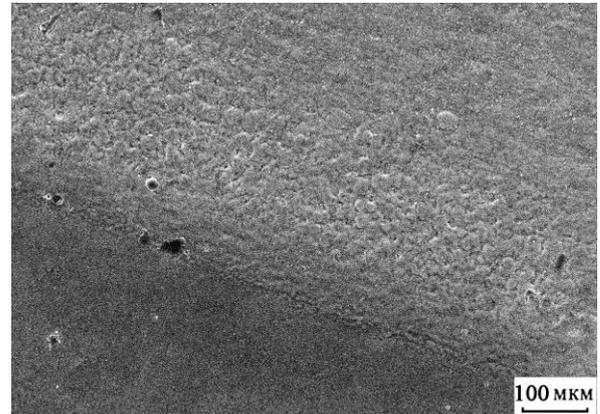


Рис. 2. Переходная зона между облученным ( $j=150$  А/см<sup>2</sup>) и необлученным участками образца магния

Расчет остаточных напряжений показал отрицательное значение, что свидетельствует о формировании растягивающих напряжений в модифицированной зоне.

На рис. 2 представлена переходная область поверхности между необлученной и облученной МИП с плотностью тока 150 А/см<sup>2</sup> зоной. Видно, что при облучении МИП с этой плотностью тока происходит плавление поверхности и формирование характерного для течения расплава рельефа. Кроме этого, на поверхности наблюдаются мелкодисперсные частицы, появление которых связано с возникающим при воздействии МИП импульсом отдачи интенсивно испаряющегося металла (рис. 3).

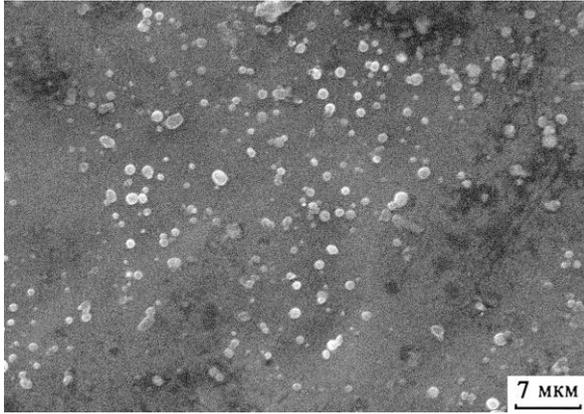


Рис. 3. Морфология поверхности магния, облученного МИП с плотностью тока  $150 \text{ A/cm}^2$  тремя импульсами, выдержанного в среде атмосферы при  $100^\circ\text{C}$  в течение 1 часа

Энергодисперсионный анализ показал, что частицы овальной формы состоят из магния и частично содержат кислород. Исследования осажденных частиц, выполненные авторами в работе [3] для образцов облученного МИП магния, не подверженного атмосферной коррозии, показали присутствие в них только чистого магния. Это свидетельствует о влиянии окружающей атмосферы на поверхность облученного магния. Состав поверхностного слоя оценивался по отношению содержания магния к кислороду  $R_{\text{Mg/O}}$ . Было обнаружено, что в необлученных образцах, выдержанных в воздушной среде  $R_{\text{Mg/O}} \sim 48$ . Тогда как для облученных МИП с плотностью тока  $150 \text{ A/cm}^2$  и выдержанных на воздухе при указанной температуре  $R_{\text{Mg/O}} \sim 126$ . Это свидетельствует об уменьшенном содержании кислорода в облученном МИП поверхностном слое в 2.6 раза. Эти данные хорошо согласуются с результатами рентгеноструктурного анализа. Облученная

область также характеризуется повышенным содержанием углерода. Полученные результаты подтверждают положительное влияние облучения МИП на сопротивление окислению магния.

### Заключение

Таким образом, установлено, что облучение МИП наносекундной длительности приводит к повышению сопротивления поликристаллического магния к окислению в воздушной среде при повышенных температурах. Полученный эффект, по-видимому, связан с присутствием повышенного содержания углерода и протеканием в зоне теплового влияния МИП интенсивной пластической деформации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Омской области № 23-22-10022.

### Библиографические ссылки

1. Грибков В.А., Григорьев В.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М: Круглый год; 2001. 528 с.
2. Панова Т.В., Ковивчак В.С., Блинов В.И., Стукова К.М. Влияние обработки мощным ионным пучком на окислительные свойства металлов и сплавов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2009; (4): 12-16.
3. Волкова Е.Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния (обзор). *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006; (11): 5-9.
4. Панова Т.В., Ковивчак В.С. Модификация поверхностных слоев магния под действием мощного ионного пучка. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2022; (4): 52-57.