

## МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ MA8 И MA14T1 МОЩНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Т.В. Панова, В.С. Ковивчак, А.А. Белозеров  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
пр. Мира 55а, Омск, Россия,  
panovatyv@omsu.ru, kvs\_docent@mail.ru, aleksei.belozеров.fff@yandex.ru

Исследовано влияния облучения мощным ионным пучком (МИП) наносекундной длительности на фазовый состав и микроструктуру поверхностных слоев магниевых сплавов MA8 и MA14T1. Не обнаружено существенной фазовой перестройки в зоне теплового влияния пучка ионов в исследуемых сплавах, за исключением сплава MA14T1, облученного ионным пучком с плотностью тока 100 А/см<sup>2</sup>. В этом случае обнаружено выделение фазы MgZn<sub>2</sub>. Установлено влияние режимов облучения на напряженно-деформированное состояние, размер зерен и величину микротвердости исследуемых сплавов. Обнаружено резкое повышение значения микротвердости в сплаве MA14T1, облученном МИП с плотностью тока 100 А/см<sup>2</sup>, что связано с измельчением зеренной структуры и с повышением плотности дислокаций.

**Ключевые слова:** мощный ионный пучок; облучение; магниевые сплавы; микроструктура; фазовый состав.

## MODIFICATION OF THE STRUCTURE OF MAGNESIUM ALLOYS MA8 AND MA14T1 UNDER THE ACTION OF A HIGH-POWER ION BEAM OF NANOSECOND DURATION

T.V. Panova, V.S. Kovivchak, A.A. Belozеров  
F.M. Dostoevsky Omsk State University., 55a Mira Ave., Omsk, Russia,  
panovatyv@omsu.ru, kvs\_docent@mail.ru, aleksei.belozеров.fff@yandex.ru

The effect of nanosecond high-power ion beam (HPIB) irradiation on the phase composition and microstructure of the surface layers of magnesium alloys MA8 and MA14T1 has been studied. No significant phase change was found in the zone of thermal influence of the ion beam in the studied alloys, with the exception of the MA14T1 alloy irradiated with an ion beam with a current density of 100 A/cm<sup>2</sup>. In this case, the precipitation of the MgZn<sub>2</sub> phase was detected. The influence of irradiation modes on the stress-strain state, grain size, and microhardness of the studied alloys has been established. A sharp increase in the microhardness value was found in the MA14T1 alloy irradiated with a HPIB with a current density of 100 A/cm<sup>2</sup>, which is associated with the grinding of the grain structure and an increase in the density of dislocations.

**Keywords:** high power ion beam; irradiation; magnesium alloys; microstructure; phase composition.

### Введение

Благодаря малой плотности, высокой удельной прочности, демпфирующей способности магниевые сплавы используются в автомобильной, авиакосмической и других отраслях промышленности, а в последние годы и в медицине [1]. Широкое применение магниевых сплавов ограничивается сильной анизотропией их механических свойств, недостаточной формемостью, низкой коррозионной стойкостью. Эксплуатационные свойства этих сплавов существенно зависят от микро-

структуры, введенных легирующих элементов [2]. Одним из решений указанных выше проблем является разработка способа обработки, позволяющего сформировать в магниевых сплавах мелкозернистую структуру с равномерно распределенными частицами вторых фаз. Перспективным методом такой модификации является обработка поверхности мощным ионным пучком (МИП) наносекундной длительности. При воздействии МИП возможны структурно-фазовые превращения, приводящие к оптимизации характе-

ристик магниевых сплавов. Для этого необходимо изучить влияние режимов облучения МИП на микроструктуру, фазовый состав и дефектную структуру сплавов магния.

### Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись деформируемые магниевые сплавы: – МА8 (Mg – 96.8%, Mn – 2% и легирующие добавки Zn, Al, Ce и др.) и МА14Т1 (Mg – 94.1%, Zn – 5%, Zr – 0.9 %). Образцы после шлифовки и полировки облучались на ускорителе ионов «Темп» (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского) ионным пучком (30%  $H^+$  и 70%  $C^+$ ) с энергией частиц  $E \approx 200$  кэВ, длительностью импульса  $\tau = 60$  нс в диапазоне плотностей тока пучка  $j = 50$ – $150$  А/см<sup>2</sup> одним импульсом. 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 приставкой Inca-350). Микротвердость образцов измеряли методом Виккерса на твердомере ПМТ-3.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена дифрактограмма сплава МА8 до и после облучения МИП. РФА показал, что в исходном состоянии поверхностный слой состоит из твердого раствора Mg с гексагональной решеткой, фазы  $\alpha$ -Mn и оксида магния. Также было обнаружено соединение  $Mg_2Al_3$  с гексагональной решеткой. После модификации МИП качественного изменения фазового состава не обнаружено. Однако наблюдаются перераспределение интенсивности пиков и сдвиги дифракционных пиков в сторону больших углов, что свидетельствует о возникновении сжимающих остаточных напряжений.

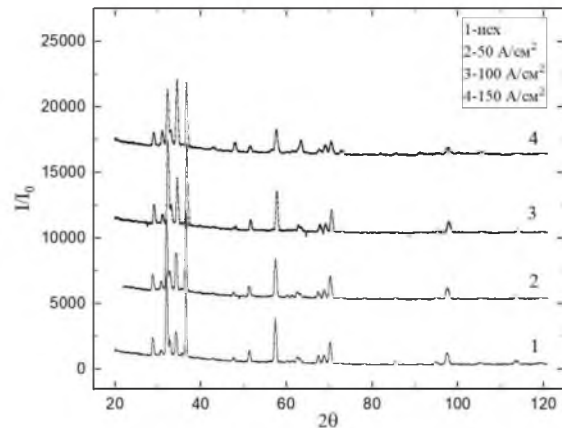


Рис. 1. Дифрактограммы сплава МА8 до и после облучения МИП с различной плотностью тока

Сплав МА14Т1 в исходном состоянии состоит из фазы Mg с гексагональной решеткой, соединения  $MgZn$ , интерметаллического соединения  $Zn_2Zr_3$  с тетрагональной решеткой и оксида магния (рис. 2).

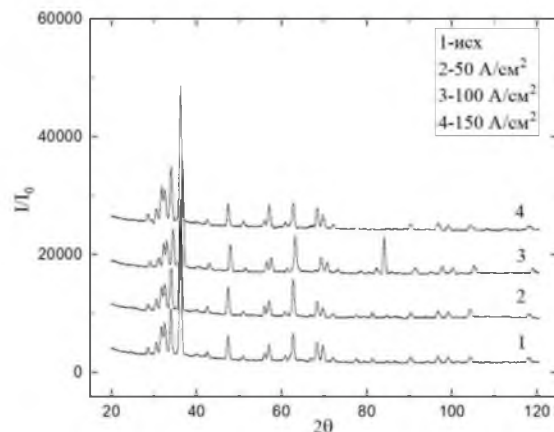


Рис. 2. Дифрактограммы сплава МА14Т1 до и после облучения МИП с различной плотностью тока

После облучения МИП с  $j = 100$  А/см<sup>2</sup> в сплаве МА14Т1 наблюдается выделение фазы  $MgZn_2$ . С увеличением  $j$  происходит увеличение интенсивности фазы Mg, что свидетельствует об удалении части поверхностного слоя и уменьшение фазы оксида магния. Сильное уширение дифракционных пиков и их смещение свидетельствует о появлении микронапряжений, в результате воздействия МИП, а сдвиг в сторону больших углов дифракционного пика образца, облученного МИП с  $j = 100$  А/см<sup>2</sup> говорит о возникновении сжимающих остаточных напряже-

ний Расчет суммы главных напряжений показал их максимальное значение для обоих исследуемых образцов при облучении МИП с  $j=100 \text{ А/см}^2$ .

После облучения МИП происходят значительные изменения морфологии поверхности этих сплавов. Наблюдается образование множества кратеров разных размеров и осажденных дисперсных частиц. Энергодисперсионный анализ показал, что в сплаве МА8 дисперсные частицы содержат алюминий, а в сплаве МА14Т1 - цинк. Травление исследуемых образцов с целью выявления микроструктуры показало, что изначально мелкозернистая структура (2.5-3 мкм) в сплаве МА8 после облучения МИП остается мелкозернистой, но размеры зерен увеличились (4.5 – 6 мкм) (рис.3).

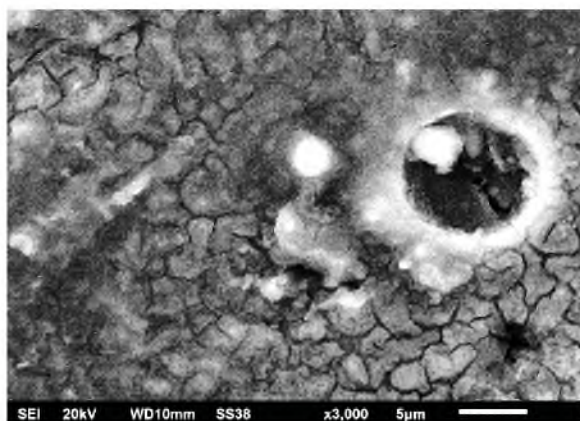


Рис. 3. Морфология поверхности сплава МА8 после облучения МИП с  $j=100 \text{ А/см}^2$

Для сплава МА14Т1 наблюдается вытягивание зерен, особенно заметное при облучении МИП с  $j=50 \text{ А/см}^2$  (рис. 4). При облучении МИП с  $j=100 \text{ А/см}^2$  размеры зерен уменьшились с  $\sim 35 \text{ мкм}$  до  $\sim 20 \text{ мкм}$ .

Изменения микроструктуры отразились на значениях микротвердости. Величина микротвердости в сплаве МА8 после облучения МИП немного снижается, что связано, по-видимому, с отжигом дефектов и ростом зерна при повышении  $j$ . В сплаве МА14Т1, облученном МИП с

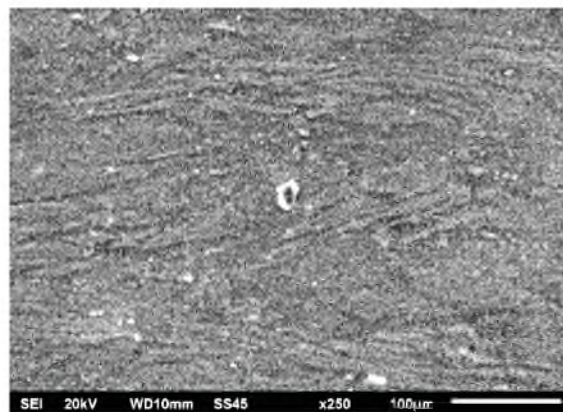


Рис. 4. Морфология поверхности сплава МА14Т1 после облучения МИП с  $j=150 \text{ А/см}^2$

$j=100 \text{ А/см}^2$ , величина микротвердости в два раза превышает исходное значение.

Эти изменения могут быть связаны с измельчением зеренной структуры. При остальных режимах облучения такого резкого увеличения микротвердости не наблюдается.

### Закключение

Таким образом, установлено, что облучение МИП магниевых сплавов МА8 и МА14Т1 не приводит к существенному изменению фазового состава. Однако наблюдаются микроструктурные изменения, связанные с характером воздействия МИП и режимами облучения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Омской области № 25-22-20041.

### Библиографические ссылки

1. Петров А.А., Сперанский К.А. Магниеые сплавы: перспективные отрасли применения, преимущества и недостатки (обзор) Часть 1. Применение в медицине. Кристаллографические факторы, влияющие на коррозионную стойкость магниевых сплавов *Труды ВИАМ* 2021; 10(104): 12-27.
2. Нугманов Д.Р., Ситдииков О.Ш., Маркушев М.В. Эволюция микроструктуры магниевго сплава МА14 в процессе всесторонней изотермическойковки *Письма о материалах* 2011; (1): 213-216.