

05;10;11

## **Поверхностное структурирование поликристаллического магния при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности**

© В.С. Ковивчак, Т.В. Панова, К.А. Михайлов

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского  
E-mail: kvs@univer.omsk.su

Поступило в Редакцию 21 мая 2010 г.

Исследовано формирование периодических структур, микро- и наночастиц на поверхности поликристаллического магния при воздействии мощного протонно-углеродного пучка наносекундной длительности. Определены пространственные параметры возникающих структур и размеры образующихся частиц. Рассмотрены возможные механизмы их формирования.

Воздействие мощного ионного пучка (МИП) на металлы и сплавы может приводить к существенному улучшению их механических и коррозионных свойств. Однако при обработке этих материалов МИП с плотностью тока выше некоторого порогового (для каждого материала) значения наблюдается увеличение шероховатости облученной поверхности. Подобные морфологические изменения поверхности являются негативным фактором такого воздействия и в ряде случаев ограничивают применения МИП для модификации материалов. Поэтому исследование таких изменений представляется актуальным как с научной, так и практической точки зрения.

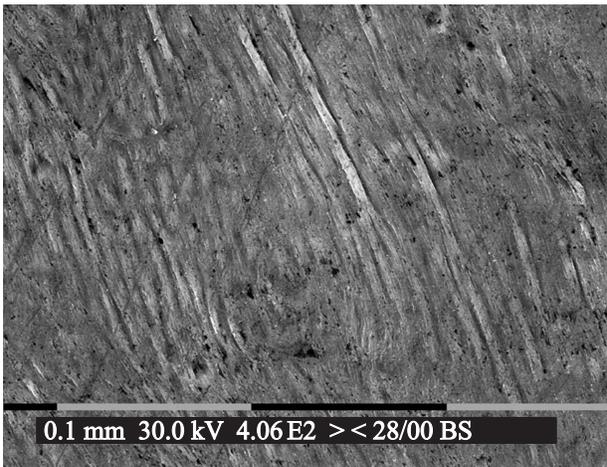
Наиболее часто эти морфологические изменения выражаются в формировании кратеров различной формы и реже в виде образования волнообразного рельефа [1,2]. Формирование подобного поверхностного рельефа в работе [1] связывается с возбуждением поперечных волн на поверхности расплава вследствие действия локального импульса давления, вызванного испарением облучаемого материала. Сверхбыстрая кристаллизация расплава после окончания импульса облучения приводит к фиксации таких волн и появлению волнообразного рельефа.

Учитывая существенную роль процессов испарения в формировании волнообразной структуры на поверхности металла под действием МИП, можно предположить, что в металлах, имеющих высокое давление пара при температуре плавления, эта волнообразная структура будет проявляться наиболее ярко.

В настоящей работе исследовано изменение морфологии поверхности поликристаллического магния при воздействии на него мощного ионного пучка наносекундной длительности. Особенностью магния является то, что он интенсивно сублимирует при температурах ниже точки плавления (923 К). Поскольку для магния давление пара при температуре 875 К составляет 133 Па, а при температуре 1170 К уже 13 кПа [3], то воздействие МИП даже со средней величиной плотности тока должно приводить к генерации большого импульса отдачи, обеспечивающего формирование волнообразной структуры.

Для экспериментов использовали диски поликристаллического Mg (99.9%) диаметром 12 mm и толщиной 2 mm. Перед облучением образцы подвергались стандартной механической обработке — шлифовке и полировке с последующей химической очисткой и термообработкой в вакууме при температуре 100°С в течение 1 часа. Облучение образцов Mg выполнялось на ускорителе „Темп“ протон-углеродным пучком (30% H<sup>+</sup> и 70% C<sup>+</sup>) со следующими параметрами;  $E = 300$  keV,  $j \leq 150$  A/cm<sup>2</sup>,  $\tau = 60$  ns. В экспериментах варьировались средняя плотность тока пучка и число импульсов облучения. Толщина образцов была значительно больше пробега ионов углерода и протонов используемого пучка в магнии. Морфологию облученной поверхности исследовали методами оптической („Neophot-2“) и сканирующей электронной (Philips SEM-515) микроскопии.

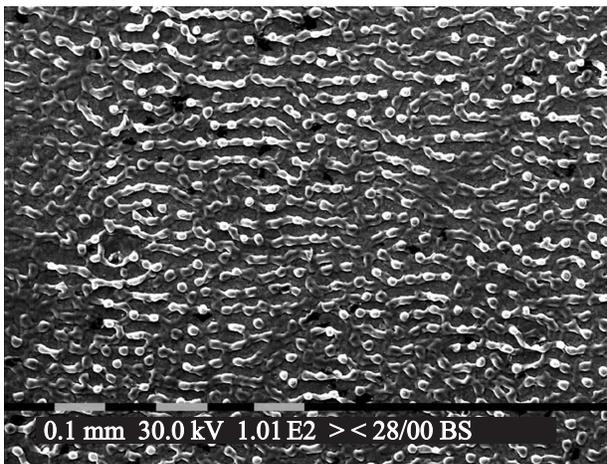
На рис. 1 показана поверхность Mg после однократного воздействия МИП с плотностью тока 50 A/cm<sup>2</sup>. Хорошо видна периодическая структура в виде волнообразного рельефа, наиболее вероятное значение пространственного периода, которой составляет 8.5  $\mu$ m. Волнообразные структуры, формируемые в пределах соседних зерен поликристаллического магния, как правило, имеют значительную разориентацию относительно друг друга, хорошо заметную в оптическом микроскопе при боковом освещении. Это указывает на возможное влияние исходной кристаллографической ориентации зерна на процессы плавления магния, кристаллизации расплава, и на формирование волнообразного рельефа.



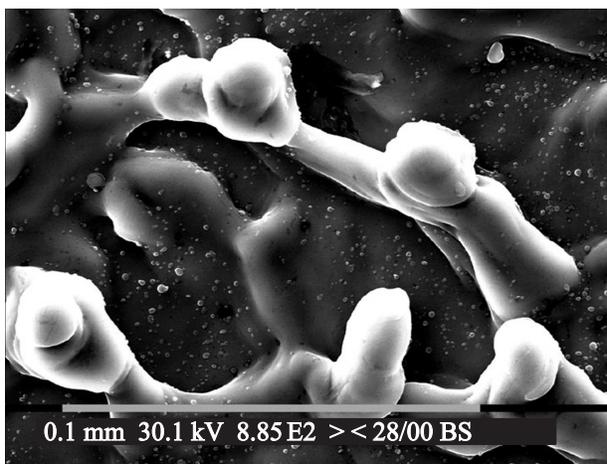
**Рис. 1.** Волнообразный рельеф на поверхности Mg после воздействия МИП с  $j = 50 \text{ A/cm}^2$  и  $n = 1$ .

Увеличение плотности тока пучка выше  $100 \text{ A/cm}^2$  приводит к существенному изменению морфологии поверхности магния — гребни волнообразной структуры становятся более локализованными, увеличивается их высота и крутизна склона рельефа (рис. 2). При этом наиболее вероятное значение пространственного периода структуры увеличивается и достигает  $40 \mu\text{m}$ . Вблизи поверхностных дефектов (царапины и пр.) этот параметр может уменьшаться.

Рост числа импульсов облучения (либо плотности тока) МИП приводит к формированию на гребнях волнового рельефа новых пространственных неоднородностей в виде различной формы выступов (рис. 3). В большинстве случаев они представляют собой сфероидальные капли застывшего расплава, соединенные с гребнем структуры перемычкой различной толщины. Характерный поперечный размер образующихся выступов составляет  $\sim 20 \mu\text{m}$ , а среднее расстояние между ними  $\sim 35 \mu\text{m}$ . Поверхностная плотность выступов при указанных режимах облучения достигает  $5.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}$ . Кроме того, на поверхности образца между гребнями волн наблюдается появление дискообразных микро- и наночастиц, диаметр которых находится в



**Рис. 2.** Периодическая структура на поверхности Mg после воздействия МИП с  $j = 150 \text{ A/cm}^2$  и  $n = 1$ .



**Рис. 3.** Поверхность Mg после воздействия МИП с  $j = 150 \text{ A/cm}^2$  и  $n = 3$ .

диапазоне от 0.1 до 1.5  $\mu\text{m}$ . Поверхностная плотность этих частиц составляет  $9.2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ . Изменение режима облучения также влияет на распределение образующихся частиц по размерам. Изменение числа импульсов облучения с 3 до 5 при плотности тока  $150 \text{ A/cm}^2$  приводит к увеличению наиболее вероятного размера частиц с 0.45 до 0.7  $\mu\text{m}$ .

При существенном увеличении числа импульсов облучения ( $n > 10$ ) наблюдается сглаживание периодической структуры и уменьшение высоты гребней. Это, вероятно, связано с увеличением времени нахождения поверхностного слоя в жидком состоянии при большом числе импульсов облучения.

Известно [4], что эволюция возмущений свободной поверхности расплавленного металла, образующегося при воздействии высокоинтенсивных внешних потоков энергии на конденсированные среды, определяется действием капиллярных и термокапиллярных сил, а также сил давления отдачи паров. Образование волнообразного рельефа на поверхности магния при воздействии МИП с небольшой плотностью тока ( $50 \text{ A/cm}^2$ ), когда процесс испарения протекает не достаточно интенсивно, в большей степени связано с возникновением капиллярных волн на поверхности расплава вследствие уменьшения сил поверхностного натяжения расплава магния с ростом температуры. При увеличении плотности тока пучка выше  $100 \text{ A/cm}^2$  сила давления интенсивно испаряющегося магния начинает играть существенную роль в формировании возмущений свободной поверхности расплава, что приводит к почти пятикратному увеличению пространственного периода формируемой структуры и увеличению амплитуды возмущений. Увеличение числа импульсов облучения (либо плотности тока) МИП приводит к росту амплитуды возбуждаемых капиллярных волн, возникновению турбулентности вследствие неустойчивости этих волн, связанной с их нелинейным взаимодействием. В этом случае при превышении некоторого порогового значения амплитуды этих волн скорость вещества расплава на гребне волны может стать достаточной для полного отрыва капли [5].

Формирование и отрыв капли определяется конкуренцией двух процессов — движения расплава на гребне волны и противодействия этому движению вследствие поверхностного натяжения расплава. При малых временах существования расплава, характерных для воздействия МИП на металлы, и существенной зависимости вязкости

расплава и коэффициента поверхностного натяжения от температуры капли большого размера (порядка десятка микрометров) не успевают оторваться от гребня и кристаллизуются в виде сфероидальных образований, соединенных с гребнем перемычкой разной толщины. Капли меньшего размера (порядка микрометра) успевают оторваться и осаждаются на поверхность магния между гребнями периодической структуры. Часть капель меньшего размера (прежде всего нанометрового диапазона), вероятно, образуется вследствие конденсации испаренного магния в капли различного размера, как это показано в [6] для случая облучения металлов мощным электронным пучком. Наблюдаемое увеличение наиболее вероятного размера частиц, осаждаемых на поверхности при многократном облучении МИП, может быть связано как с объединением мелких капель, так и с частичным их сплавлением с поверхностным слоем при таком режиме облучения.

Сравнение периодических структур, образующихся на поверхности магния при воздействии МИП и импульсного лазерного излучения ( $\lambda = 694.3 \text{ nm}$ ,  $\tau = 18 \text{ ns}$ ) [7], показывает, что величины пространственного периода возникающих структур сопоставимы. Однако характерный размер выступов, образующихся на гребнях волн при облучении МИП, на порядок больше, чем при облучении импульсным лазерным излучением. Наблюдаемые отличия в формировании волнообразного рельефа на поверхности магния при воздействии МИП и лазерного излучения, вероятно, связаны как с различием в пространственном распределении поглощенной энергии, так и с различным влиянием агрегатного состояния поверхностного слоя на поглощение падающей энергии.

Таким образом, воздействие МИП на магний приводит к формированию на его поверхности различных волнообразных структур, сфероидальных выступов на гребнях волн, дискообразных микро- и наночастиц. Параметры наблюдаемых морфологических изменений определяются плотностью тока ионного пучка и числом импульсов облучения. Характерный размер образующихся выступов на порядок величины превышает аналогичный параметр при импульсном лазерном воздействии. Вероятно, определяющую роль в структурировании поверхности играет возникающий при воздействии МИП импульс отдачи интенсивно испаряющегося магния.

## Список литературы

- [1] *Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н.* и др. // Физика металлов и металловедение. 2000. Т. 89. № 1. С. 54–61.
- [2] *Kovivchak V.S., Panova T.K., Burlakov R.B., Michailov K.A.* Surface morphology of zinc after irradiation by high power ion beam // Proc. VII Int. Conf. of modification of materials with particle beams and plasma flows. Tomsk. 2004. P. 201–202.
- [3] *Таблицы физических величин.* Под ред. И.К. Кикоина. М. Атомиздат. 1976.
- [4] *Мирзаде Ф.Х.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 8. С. 32–36.
- [5] *Yule A.J., Al-Suleimani Y.* On Droplet Formation from Capillary Waves on a Vibrating Surface // Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, V. 456. 2000. N. 1997. P. 1069–1085.
- [6] *Волков Н.Б., Фенько Е.Л., Яловец А.П.* ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 10. С. 1–11.
- [7] *Henc-Bartolic V., Kunze H.-J., Kovacevic E., Stubicar M.* // Acta physica slovacica. 2004. V. 54. N 3. P. 251–262.