МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

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

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, пр. Мира, 55, Омск, 644077, Россия, тел: (3812)64-44-92, факс: (3812) 64-77-87, e-mail: kvs@univer.omsk.su

Методами оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии проведено сравнительное исследование модификации поверхности легкоплавких металлов – висмута, олова, цинка и магния при воздействии на них мощного ионного пучка наносекундной длительности.

Введение

Существенное изменение морфологии поверхности при воздействии мощного ионного пучка (МИП) на различные металлы и сплавы может ограничивать его применение для модификации этих материалов. В связи с этим, уточнение механизмов формирования поверхностного рельефа металлов при воздействии МИП является актуальной задачей. Для этих целей предпочтительно использовать легкоплавкие металлы, что позволит уточнить влияние физических процессов (плавления, испарения, кипения) на модификацию поверхности металлов при воздействии МИП. В качестве таких модельных материалов были выбраны легкоплавкие металлы – висмут, олово, магний, цинк.

Низкие температуры плавления висмута (217,4°С), олова (232 °С), цинка (419,5 °С), магния (650°С) позволяют исследовать изменение поверхностного рельефа, связанное с их плавлением, испарением при воздействии МИП в широком интервале плотностей тока пучка. Кроме того, особенностью висмута является значительное (на 3,35%) увеличение объема при кристаллизации, в то время как, например, для олова наблюдается уменьшение объема на 2,8 %. [1]. Кроме того, другой важной особенностью висмута является высокая хрупкость при комнатной температуре, в то время как остальные исследуемые в работе металлы является достаточно пластичным.

Методика и техника эксперимента

В работе проведено сравнительное исследование изменения морфологии поверхности поликристаллических висмута, олова, цинка и магния при воздействии на них мощного ионного пучка наносекундной длительности. Эксперименты выполнены на образцах висмута (99,9%), олова (99,9%), цинка (99,8%), магния (99,8%) подвергнутых механической шлифовке и полировке. Облучение проводилось на ускорителе «Темп» протон-углеродным пучком (30% H^+ + 70% C^+) со средней энергией 300 кэВ, длительностью 60 нсек, в диапазоне плотностей тока 10 - 150 А/см^2 при варьировании числа импульсов облучения n от одного до пяти. Поверхность облученного висмута исследовали с помощью оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии.

Результаты и их обсуждение

В условиях медленной кристаллизации висмута, когда на поверхности образуется твердая фаза, происходит сжатие нижележащего слоя расплава из-за увеличения объема твердой фазы, расплав выдавливается через возникающие на поверхности трещины, кристаллизуется и образует различные выступы. Наиболее ярко это проявляется при кристаллизации висмута в кристаллизаторе цилиндрической формы. Поскольку кристаллизация начинается с боковых поверхностей, то наблюдается симметричное сжатие жидкого висмута и выдавливание расплава на свободную поверхность вдоль оси формирующегося слитка, где он затем кристаллизуется в форме выступающей капли. Для остальных исследованных в работе металлов, объем которых при кристаллизации уменьшается, подобного эффекта не наблюдается.

Ранее при исследовании локального воздействия импульсного лазерного излучения на висмут было обнаружено формирование в области плавления, имеющей малые размеры, выступающей центральной части в виде закристаллизовавшейся капли [2]. Однако, формирование поверхностного рельефа в условиях однородного плавления большой поверхности висмута, олова и последующей быстрой их кристаллизации, характерного для воздействия МИП, не исследовалось.

При однократном воздействии МИП с j ~ 30 А/см^2 как на висмут, так и на олово наблюдается образование кратеров, имеющих небольшую глубину. Это связано, прежде всего, как с низкими температурами плавления этих материалов, так и с малой вязкостью расплавов, что приводит к существенному сглаживанию рельефа на этапе существования жидкой фазы. В тоже время для висмута при плотности тока j ~ 30 А/см^2 и n=3, как правило, наблюдается образование на поверхности кратеров частиц закристаллизовавшегося расплава с характерным поперечным размером 6 мкм (рис. 1). Форма образующихся частиц существенно отличается от наблюдаемой при медленной кристаллизации большого объема расплава в цилиндрическом кристаллизаторе. Вероятно, она определяется геометрией формирующихся трещин, через которые выдавливается расплав. В свою очередь на поверхности самых больших частиц, так же видны выступы и вторичные малые частицы, связанные уже с кри-

сталлизацией выдавленного расплава. Часть этих частиц может падать на поверхность образца.

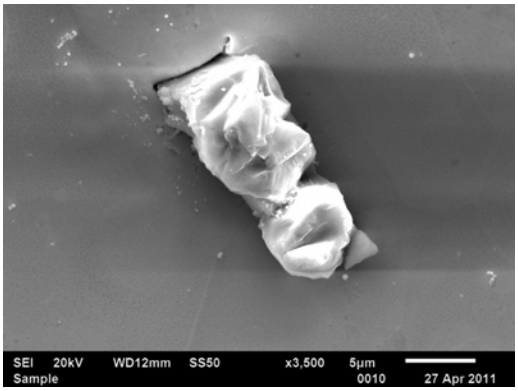

Рис. 1. Поверхность висмута после воздействия МИП с j ~ 30 А/см^2 и n=3.

Наряду с большими и малыми закристаллизовавшимися частицами на поверхности висмута также наблюдаются отверстия различной формы. Вероятно, что это те повреждения трещинами поверхностного слоя висмута, через которые выдавливался расплав.

После удаления образовавшихся частиц они становятся хорошо заметными. Обнаруженное преимущественное выдавливание расплава на боковые поверхности кратера, свидетельствует о неоднородном охлаждении расплава висмута после окончания импульса облучения. Наряду с описанными выше частицами встречаются и частицы почти сферической формы с развитой поверхностью, имеющие диаметр до 2 мкм. Такая форма частиц свидетельствует о наличии в тонких приповерхностных слоях областей расплава, подверженных достаточно симметричному радиальному сжатию из-за происходящей вокруг этой области кристаллизации висмута.

Воздействие МИП с аналогичной плотностью тока на олово приводит к оплавлению поверхности и образованию слабо выраженного рельефа с характерным поперечным размером ~ 180 мкм.)

Рост плотности тока пучка до 100 А/см^2 приводит к дальнейшим изменениям на поверхности висмута. При однократном облучении наблюдаются области с закристаллизовавшимся расплавом, выдавленным через отверстие эллиптической формы (рис. 2). Размеры этих отверстий достигают ~ 20 мкм. Как и для случая облучения с j ~ 30 А/см^2 наблюдается выдавливание мелких капель из закристаллизованного объема. При увеличении числа импульсов до 3 картина существенно меняется. На поверхности образца образуются участки с сетчатой структурой, с характерным размером 140 мкм и с выступами, имеющими размер ~ 40 мкм.

Однократное и многократное (n=3) облучение олова с 100 А/см^2 не приводит к таким существенным изменениям поверхностного рельефа (по сравнению с облучением при j ~ 30 А/см^2) как это наблюдается для висмута. Возможно, это связано с более низким давлением насыщенного пара для олова (10^{-8} Па при 577°С) по сравнению с висмутом (10 Па при 575 °С). Как известно, именно импульс отдачи, связанный с испарением материала, может существенно влиять на морфологию поверхности металла при облучении МИП [3].

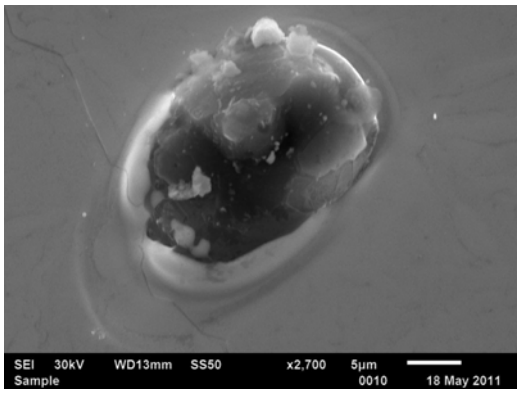

Рис. 2. Поверхность висмута после воздействия МИП с j= 100 А/см^2 и n=1.

Дальнейший рост плотности тока пучка до 150 А/см^2 при однократном воздействии на висмут приводит к формированию более четко выраженной сетчатой структуры и увеличению объема расплава выдавливаемого из выступов этой структуры (рис. 3). Увеличение числа импульсов облучения до трех приводит к образованию областей со значительным выбросом расплава (рис. 4), который кристаллизуется в различные частицы и конгломераты. Подобные выбросы капель расплавленного висмута наблюдали ранее при импульсном лазерном воздействии [4].

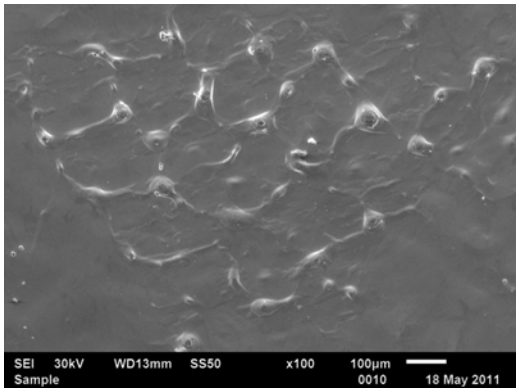

Рис. 3. Поверхность висмута после воздействия МИП с j= 150 А/см^2 и n=1.

Однократное воздействие МИП с плотностью тока 150 А/см^2 на олово несколько увеличивает характерные размеры образующегося непериодического рельефа и приводит к возникновению на поверхности отверстий с размером ~ 2- 5 мкм (рис. 5). Последние, возможно связаны с локальным приповерхностным перегревом олова и выбросом паро-жидкой фазы из этих областей, в пользу чего говорит наличие вокруг отверстий частиц с размерами 0,2 – 0,8 мкм.

Другой особенностью висмута при облучении МИП с плотностями тока более 50 А/см^2 является появление на поверхности трещин. Это, вероятно, связано с возникновением при охлаждении

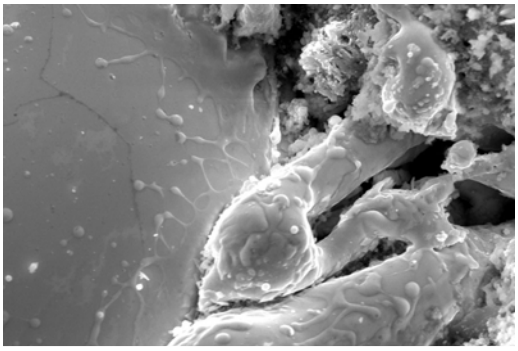

Рис. 4. Поверхность висмута после воздействия МИП с j= 150 А/см^2 и n=3.

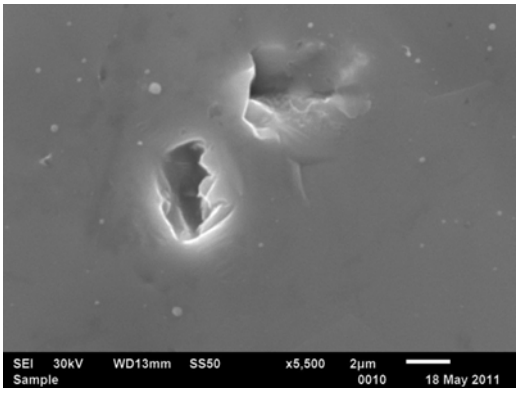

Рис. 5. Поверхность олова после воздействия МИП с j= 150 А/см^2 и n=1.

поверхностного слоя высоких растягивающих механических напряжений, которые приводят к разрушению висмута, имеющего высокую хрупкость в области комнатных температур.

Воздействие МИП на цинк и магний приводит к значительному изменению морфологии поверхности – к образованию волнообразного рельефа (рис. 6). Возникновение подобного поверхностного рельефа 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 [3]. Наиболее ярко этот волнообразный рельеф проявляется на магнии, имеющем из исследованных металлов наиболее высокую температуру плавления и значительное давление насыщенного пара (100 Па при 587,6 °С). При плотности тока пучка более 100 А/см^2 на гребнях волнового рельефа наблюдается формирование различной формы выступов, а на поверхности между ними микро- и наночастиц. Волнообразный рельеф на поверхности цинка менее выражен (по сравнению с магнием) из-за сглаживания, связанного с более длительным нахождением поверхностного слоя в жидком состоянии (вследствие более низкой температуры плавления).

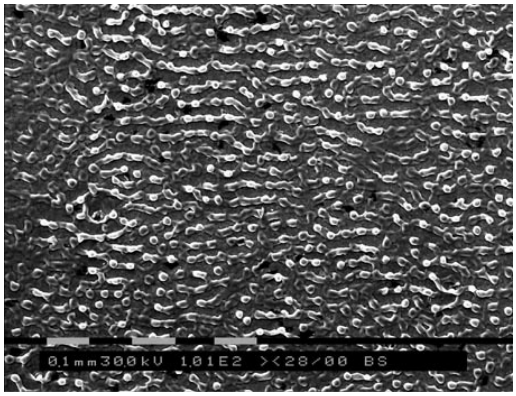

Рис. 6. Поверхность магния после воздействия МИП с j= 150 А/см^2 и n=1.

Заключение

Таким образом, сравнительное исследование модификации поверхности легкоплавких металлов – висмута, олова, цинка и магния показало, что поверхностный рельеф в значительной степени определяется вязкостью расплава, временем нахождения металла в жидком состоянии, величиной давления его насыщенного пара, а также особенностями изменения объема при кристаллизации.

Увеличение объема висмута при кристаллизации наряду с сильно неоднородным характером охлаждения области облучения может приводить к существенному увеличению шероховатости поверхности после воздействия МИП. Однако из-за этой особенности висмут может быть использован в качестве модельного материала для экспериментального исследования быстрой кристаллизации при импульсном плавлении.

Список литературы

1. *Стишов С.М.* // УФН. - 1968. - 96. - 3. - С. 467.
2. *Swamy V.T., Ranganathan S. and Chattopadhyay K.*// Journal of Crystal Growth. - 1989. - 96. - P. 628.
3. *Ковивчак В.С., Панова Т.В., Михайлов К.А.*//Письма в ЖТФ. - 2010. - 36. - 23. - С. 55.
4. *Toth Z., Hopp B., Smausz T., Kantor Z., Ignacz F.* // Applied Surface Science. - 1999. -138–139. - P. 130.

SURFACE MODIFICATION OF LOW-MELTING POINT METALLS AT IRRADIATION HIGH POWER ION BEAM OF NANOSECOND DURATION

V.S. Kovivchak, T.V. Panova, K.A. Michailov

Omsk State University, pr. Mira, 55a, Omsk, 644077, Russia

Tel: (3812) 64-44-92, fax: (3812) 64-77-87, e-mail: kvs@univer.omsk.su

Features of surface morphology of bismuth, tin, zinc and magnesium at irradiation by high power ion beam of nanosecond duration was investigated. The formation of particles of the various form was founded on surface bismuth. The generation of this particles was connected with increase of bismuth volume at crystallization. The formation of periodical structures, micro- and nanoparticles on surface polycrystalline zinc and magnesium was investigated also. Spatial parameters of this structures and particle sizes was measured. The possible mechanisms of formation of periodical structures was considered.