

05;10

Особенности воздействия мощного ионного пучка наносекундной длительности на поликристаллический висмут

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

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

E-mail: kvs@obisp.oscsbras.ru

Поступило в Редакцию 28 июля 2011 г.

Исследованы особенности образования поверхностного рельефа на поликристаллическом висмуте при воздействии мощного протон-углеродного пучка наносекундной длительности. Наблюдаемые локальные выдавливания расплава из приповерхностных слоев и его кристаллизация на поверхности объяснены с точки зрения значительного (3.35%) увеличения объема висмута при переходе из жидкого состояния в твердое.

Изменение поверхностного рельефа при воздействии мощных ионных пучков (МИП) зачастую становится той причиной, которая ограничивает их применение для модификации свойств различных материалов. Поэтому исследование механизмов формирования морфологии поверхности, особенно при кристаллизации расплавленного МИП поверхностного слоя является актуальной задачей как с фундаментальной, так и прикладной точки зрения. Изучение процесса быстрой кристаллизации после импульсного плавления твердых тел (в том числе и МИП) ограничивается, главным образом, теоретическими исследованиями, что связано с проблемами их экспериментального изучения. Однако уточнение ряда деталей механизмов быстрой кристаллизации возможно косвенным методом — при исследовании воздействия МИП на материалы, имеющие особенности кристаллизации (увеличение объема при переходе из жидкого состояния в твердое). Наиболее удобным для исследования представителем этой немногочисленной группы твердых тел является висмут. Его низкая температура плавления (217.4°C) и значительное (3.35%) увеличение объема при кристаллизации [1] позволяют с помощью оптической и электронной микроскопии исследовать

изменение поверхностного рельефа, связанное с его плавлением и кристаллизацией при воздействии МИП в широком интервале плотностей тока пучка.

Эксперименты выполнены на образцах поликристаллического висмута (99,9%) диаметром 15 и толщиной 3 mm, подвергнутых механической шлифовке, полировке и химической очистке. Облучение проводилось на ускорителе „Темп“ протон-углеродным пучком ($30\% \text{H}^+ + 70\% \text{C}^+$) со средней энергией 300 keV, длительностью 60 ns, в диапазоне плотностей тока j — 10–150 A/cm² при варьировании числа импульсов n облучения от одного до пяти. Поверхность облученного висмута исследовали с помощью оптической и растровой электронной (JSM-6610LV, „JEOL“) микроскопии.

Для конкретизации механизма формирования поверхностного рельефа на висмуте при воздействии МИП целесообразно сравнить особенности рельефа в зависимости от условий плавления и кристаллизации.

Наиболее ярко вышеупомянутая особенность висмута проявляется при его кристаллизации в кристаллизаторе цилиндрической формы. Поскольку кристаллизация в этом случае начинается с боковых поверхностей, то наблюдается симметричное сжатие жидкого висмута и выдавливание на свободную поверхность вдоль оси формирующегося слитка, где он затем кристаллизуется в форме выступающей капли, как это показано на рис. 1. В то же время при исследовании локального воздействия на монокристаллический висмут импульсного микросекундного лазерного излучения было обнаружено формирование в области плавления после кристаллизации выступающей центральной части в форме конуса, окруженного углублением [2]. Таким образом, образующийся при кристаллизации висмута поверхностный рельеф существенно зависит от условий, при которых происходит кристаллизация. Однако формирование поверхностного рельефа в условиях квазиоднородного плавления и кристаллизации при воздействии МИП на большую площадь висмута до настоящего времени не исследовалось.

При однократном воздействии МИП с $j \sim 30 \text{ A/cm}^2$ на поверхности висмута наблюдается образование кратеров, имеющих небольшую глубину. Это связано как с низкой температурой плавления, так и с малой вязкостью расплава, что приводит к существенному сглаживанию рельефа на этапе существования жидкой фазы. При плотности тока $j \sim 30 \text{ A/cm}^2$ и $n = 3$, как правило, наблюдается образование на стенках кратеров частиц закристаллизовавшегося расплава с характерным поперечным



Рис. 1. Вид стержня из висмута, полученного при кристаллизации в цилиндрическом кристаллизаторе.

размером $\sim 6 \mu\text{m}$ (рис. 2, *a*). Лентообразная форма образующихся частиц существенно отличается от наблюдаемой при кристаллизации большого объема расплава в цилиндрическом кристаллизаторе и кристаллизации при микросекундном лазерном воздействии. Очевидно, она определяется геометрией трещин, формирующихся в затвердевшем поверхностном слое висмута, через которые выдавливается расплав. Кроме того, возникающие при кристаллизации и остывании таких частиц механические напряжения могут также влиять на их форму. В свою очередь на поверхности этих „первичных“ (больших) частиц также видны выступы — „вторичные“ (малые) частицы, обусловленные процессом кристаллизации „первичных“ частиц. Часть этих „вторичных“ частиц может падать на поверхность кратера.

Обнаруженное преимущественное выдавливание расплава на стенках кратера свидетельствует о сильно неоднородном охлаждении расплава висмута после окончания импульса облучения. Наряду с описан-

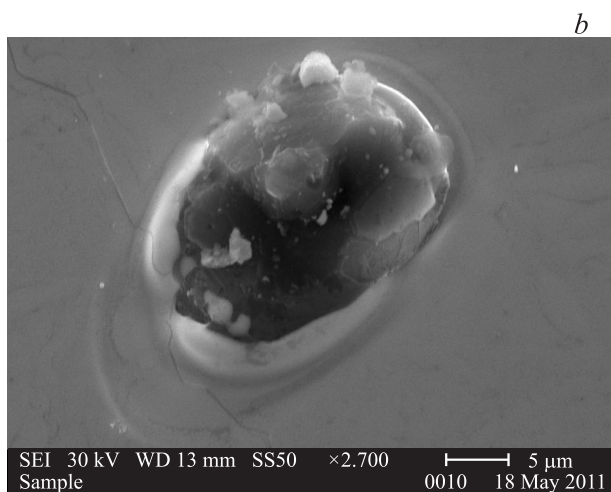
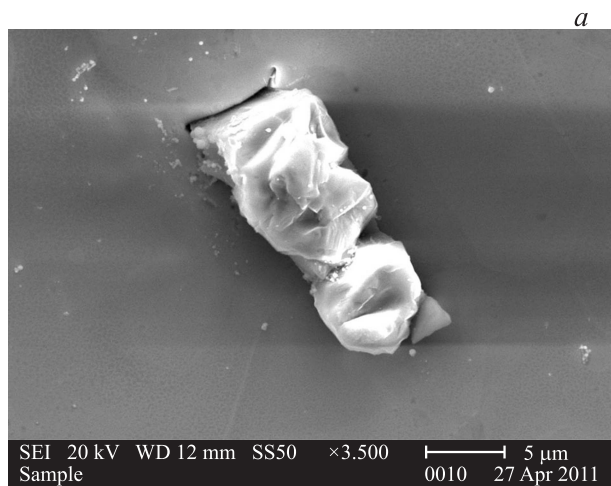


Рис. 2. Поверхность висмута после воздействия МИП при: *a* — $j \sim 30 \text{ A/cm}^2$ и $n = 3$, *b* — $j = 100 \text{ A/cm}^2$ и $n = 1$, *c* — $j = 150 \text{ A/cm}^2$ и $n = 3$.

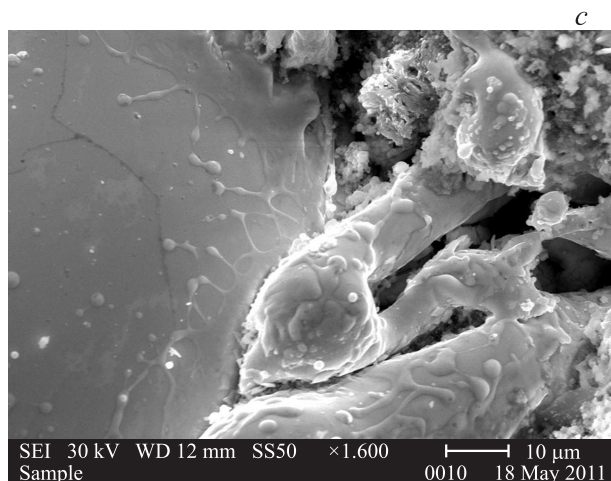


Рис. 2 (продолжение).

ными выше частицами встречаются и частицы закристаллизовавшегося выдавленного расплава почти сферической формы с развитой поверхностью, имеющие диаметр до $2\text{ }\mu\text{m}$. Такая форма частиц свидетельствует о наличии под затвердевшим поверхностным слоем висмута областей расплава, подтвержденных достаточно симметричному сжатию из-за происходящей вокруг этой области кристаллизации.

Рост плотности тока пучка до 100 A/cm^2 приводит к дальнейшим изменениям на поверхности висмута. При однократном облучении наблюдается выдавливание и кристаллизация расплава через отверстие эллиптической формы (рис. 2, *b*). Размеры этих отверстий достигают $\sim 20\text{ }\mu\text{m}$. Как и в случае облучения с $j \sim 30\text{ A/cm}^2$, на закристаллизовавшемся расплаве наблюдается образование „вторичных“ частиц. При увеличении числа импульсов до 3 существенно меняется картина рельефа поверхности. При охлаждении расплава поверхностные возмущения фиксируются в виде локальных участков, представляющих собой сетчатую структуру, с ячейками с характерным размером $140\text{ }\mu\text{m}$, в узлах которой происходит выдавливание расплава, аналогичного показанному на рис. 2, *b*.

Дальнейший рост плотности тока пучка до 150 A/cm^2 при однократном воздействии на висмут приводит к формированию более четко выраженной сетчатой структуры и увеличению объема расплава, выдавливаемого из узлов этой структуры. Увеличение числа импульсов облучения до трех приводит к образованию на поверхности областей со значительным выбросом расплава, который при кристаллизации в свою очередь формирует различные частицы и их конгломераты (рис. 2, с).

Наличие на облученном МИП висмуте выдавленного и закристаллизовавшегося расплава свидетельствует о том, что кристаллизация расплавленного ионным пучком слоя начинается как с границы раздела расплав–твердая фаза, так и границы вакуум–расплав. Как известно, процесс кристаллизации требует отвода скрытой теплоты из области границы раздела фаз. Теплота, высвобождающаяся при кристаллизации на движущейся границе раздела между жидкой и твердой фазами, уравнивается теплоотводом в подложку [3]. Отвод тепла при кристаллизации поверхностного слоя может осуществляться путем теплового излучения, но в силу невысокой температуры этого слоя он незначителен. Возможно, значительное кратковременное переохлаждение поверхностного слоя расплава возникает сразу после окончания импульса облучения за счет интенсивного испарения висмута, поскольку он имеет высокое давление пара даже при невысоких температурах (10 Pa при 575°C) [4]. Однако последнее предположение требует дополнительных исследований.

Таким образом, исследование воздействия мощного ионного пучка на висмут показало, что поверхностный рельеф в значительной степени определяется не только вязкостью расплава, временем нахождения металла в жидком состоянии, величиной давления его насыщенного пара, как это было установлено ранее, но и особенностями изменения объема при кристаллизации. При этом кристаллизация может начинаться с границы раздела вакуум–расплав. Увеличение объема висмута при кристаллизации наряду с сильно неоднородным характером охлаждения области облучения может приводить к существенному увеличению шероховатости поверхности после воздействия МИП. В то же время из-за этой особенности висмут может быть использован в качестве модельного материала для экспериментального исследования быстрой кристаллизации при импульсном плавлении.

Авторы выражают благодарность доценту кафедры прикладной и медицинской физики Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского О.В. Кривоzubову за обсуждение материалов статьи.

Список литературы

- [1] *Стишов С.М.* // УФН. 1968. Т. 96. В. 3. С. 467–496.
- [2] *Swamy V.T., Ranganathan S., Chattopadhyay K.* // Journal of Crystal Growth. 1989. V. 96. P. 628–636.
- [3] *Модифицирование* и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. М. Поута, Г. Форти, Д.К. Джекобсона. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
- [4] *Физические величины: Справочник* / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1234 с.