

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

05;11;12
© 1994 г.

Журнал технической физики, т. 64, в. 3, 1994

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОРЯДОК В АМОРФНОМ СПЛАВЕ $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{30}\text{B}_{20}$

Л.И. Федорова, И.М. Михайловский, В.А. Ксенофонов, П.Я. Полтинин

Особые свойства аморфных сплавов, такие как большая магнитная проницаемость, высокие прочность и пластичность, радиационная стойкость, в значительной мере определяются особенностями их внутреннего строения на мезоскопическом уровне [1]. Исследования структуры металлических стекол, выполненные с помощью высокоразрешающих микроскопических и микродифракционных методик, позволили обнаружить наличие локальной топологической регулярности в расположении атомов, лежащих за пределами первой координационной сферы [2,3]. В рентгеноаморфных сплавах были выявлены области с поперечником нанометрового диапазона, состоящие из плотноупакованных квазиплоскостей, — области промежуточного топологического порядка (квазимикрокристаллиты). К настоящему времени отсутствует экспериментальная информация о состоянии композиционного порядка в квазимикрокристаллических областях в аморфных сплавах. В данной работе впервые показано, что квазимикрокристаллиты в металлических стеклах являются областями не только топологического, но и композиционного порядка.

Исследования проводились в высокоразрешающем низкотемпературном двухкамерном ионном полевым микроскопе. В качестве изображающего газа использовался гелий при давлении 10^{-3} Па. Изучалась тонкая структура сплава $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{30}\text{B}_{20}$ в аморфном и кристаллизованном состояниях. Осесимметричные острия с радиусом кривизны у вершины порядка 10 нм изготавливались электрохимической полировкой фольг толщиной 25 мкм. Атомногладкая поверхность острий формировалась путем испарения в электрическом поле. Реализация атомного разрешения достигалась за счет охлаждения образцов до 21 К. Применение контролируемого поатомного полевого испарения позволило анализировать строение сплава на глубину 10^3 – 10^4 нм. Кристаллизация осуществлялась путем нагрева острийных образцов до температуры 400°C в течение 2' непосредственно в камере ионного микроскопа при пропускании тока через дужку держателя. Анализ ионно-микроскопических изображений производился на основе сопоставления с расчетными изображениями, полученными методом ма-

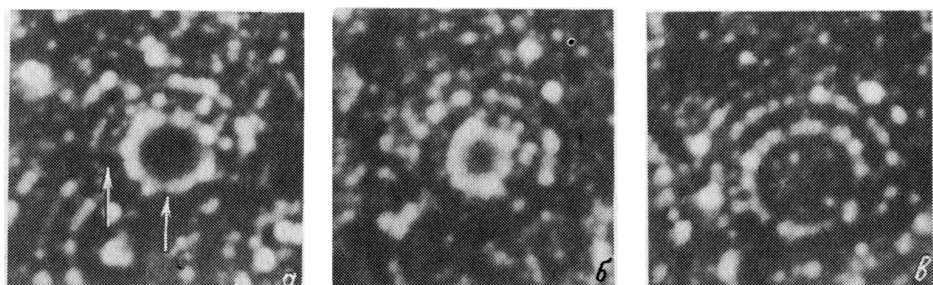


Рис. 1. Ионно-микроскопическое изображение грани (001) кристаллизованного сплава $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{30}\text{V}_{20}$.

a — после формирования атомногладкой поверхности; *б* и *в* — после дополнительного частичного и полного испарения моноатомного слоя.

тематического моделирования на ЭВМ при использовании геометрической методики тонких оболочек Мура [4]. В соответствии с данными рентгенодифракционных исследований [5] основным продуктом кристаллизации сплава $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{30}\text{V}_{20}$ является метастабильный борид $(\text{Fe},\text{Ni})_3\text{B}$, имеющий объемно-центрированную тетрагональную решетку [6].

Как показали проведенные исследования, на ионно-микроскопических снимках образцов сплава в кристаллизованном состоянии (рис. 1, *a*–*в*) выявляются чередующиеся ступени плотноупакованных плоскостей с низкими индексами, резко отличающиеся четкостью контуров (перемежающиеся плотные и рыхлые атомные кольца отмечены стрелками). Согласно результатам математического моделирования ионно-микроскопических изображений, чередование контраста контурных линий, представляющих собой края плоских атомных сеток, характерно только для плоскостей (001), другие плоскости с низкими индексами подобного последовательного чередования контраста не обнаруживают. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных изображений грани (001) (рис. 1 и 2) показывает, что отличие контраста соседних контурных линий обусловлено различием атомного состава кристаллографических плоскостей — за слоем атомов металла (светлые точки на рис. 2) следует слой, состоящий из атомов металла и металлоида (светлые точки и кружки на рис. 2).

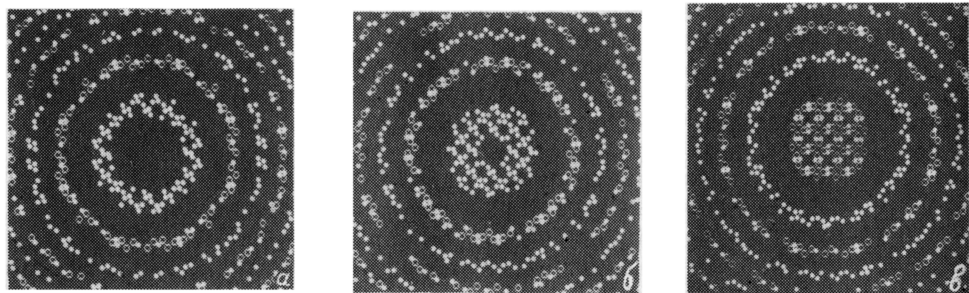


Рис. 2. Ионно-микроскопическое изображение борида Fe_3B , смоделированное на ЭВМ, соответствующее фазам испарения, приведенным на рис. 1.

○ — атомы В, ● — атомы Fe.

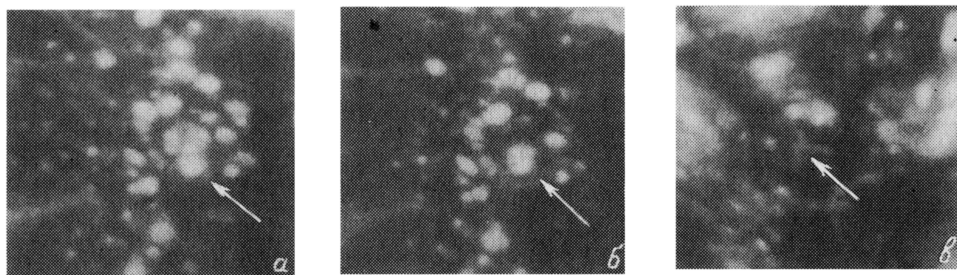


Рис. 3. Квазимикрокристаллит в аморфном сплаве $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{30}\text{B}_{20}$.

Стрелками отмечены центральные группы атомов на квазиплоскостях (001). Фазы испарения (а-в) приблизительно соответствуют последовательности серии микрофотографий на рис. 1, а-в.

На рис. 1 представлены характерные ионно-микроскопические изображения грани (001) на различных стадиях низкотемпературного полевого испарения: а — непосредственно после удаления предыдущего атомного слоя, б — после дополнительного испарения 20 атомов со ступеньки этой грани, в — после полного удаления атомного слоя (001). Как видно из серии рисунков, при полевым испарении наблюдается чередование на вершине образца атомных плоскостей с существенно отличающимся контрастом (в центре изображения яркие контуры, стягивающиеся в светлое пятно непосредственно перед испарением (а, б на рис. 1), темное поле на рис. 1, в). Математическое моделирование ионно-микроскопических изображений грани (001) Fe_3B на различных этапах испарения (рис. 2) также выявило чередование контраста в центре изображения. Стадия испарения, представленная на рис. 1, а, б и 2, а, б, как следует из сравнительного анализа экспериментальных и расчетных изображений, соответствует выходу на вершину образца кристаллографической атомной плоскости, полностью состоящей из атомов металла, рис. 1, в и 2, в соответствуют выходу на вершину плоскости с эквивалентной концентрацией металла и металлоида. Такое чередование контраста с периодом идентичности, равным двум межплоскостным расстояниям (001), сохраняется при испарении всего кристаллического зерна, что является свидетельством наличия дальнего топологического и композиционного порядка в пределах зерна.

На ионно-микроскопических изображениях сплавов в аморфном состоянии расположение атомов, как правило, имело нерегулярный характер, однако приблизительно на площади менее 10% поверхности наблюдались частично упорядоченные области. На микрофотографиях (рис. 3) на фоне хаотически расположенных по полю изображения атомов выделяются замкнутые атомные цепочки, которые следует рассматривать как контурные линии, обрамляющие края квазиплоскостей, пересекающих поверхность острия. Такие участки соответствуют случайным образом благоприятно ориентированным для ионно-микроскопических наблюдений квазимикрокристаллитам — областям промежуточного топологического порядка [2,3]. В отличие от изображения кристаллизованного сплава в аморфном состоянии края слоев различного атомного состава по контрасту практически не отличаются. Чередование контраста, характерное для композиционного порядка, выявляемого в кристаллизованном состоянии (рис. 1 и 2), наблюдается

в аморфном сплаве преимущественно в центральной области изображения при послойном полевым испарении. Отмеченные стрелками на рис. 3,а,б компактные группы атомов в центре снимка характеризуются повышенной яркостью и по аналогии с изображениями, приведенными на рис. 1,а,б и 2,а,б, соответствуют выходу на вершину образца квази-плоскостей (001), преимущественно заселенных атомами металла.

После удаления монослоя полевым испарением наблюдается слабый диффузный контраст (рис. 3,в), подобный представленному на рис. 1,в, характерный для плоскостей, имеющих в своем составе атомы металла и металлоида. Такая последовательность изменения контраста, связанная с различием планарного атомного состава квази-плоскостей, сохраняется при полевым испарении в пределах объема квази-микрористаллита. Исследованные в настоящей работе квазимикрористаллиты в соответствии с поликластерной концепцией аморфных твердых тел [1] могут рассматриваться как локально регулярные кластеры (либо их ядра), играющие определяющую роль в формировании физико-механических свойств аморфных материалов. Полученные результаты указывают на то, что по крайней мере ядра локально регулярных кластеров в аморфных сплавах характеризуются как топологическим, так и композиционным промежуточным порядком.

В заключение авторы выражают благодарность А.С.Бакаю и Э.П.Фельдману за обсуждение результатов.

Работа финансируется Государственным комитетом по вопросам науки и технологий Украины.

Список литературы

- [1] Бакай А.С. Поликластерные аморфные тела. М.: Энергоиздат, 1987. 193 с.
- [2] Hirotsu Ya., Uehara M., Ueno M. // J. Appl. Phys. 1986. Vol 59. N 9. P. 3081-3086.
- [3] Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Асадчиков В.Е., Серебряков А.В. // ФММ. 1986. Т. 62. № 3. С. 496-502.
- [4] Мюллер Э., Цонь Т. Автоионная микроскопия. М.: Металлургия, 1972. 360 с.
- [5] Walter J.L., Bartram S.F., Russell R.R. Met. Trans. 1978. Vol 9a. N 6. P. 803-814.
- [6] Лирсон У. Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. Ч. 2. М.: Мир, 1977. С. 394-395.

Харьковский физико-технический
институт

Поступило в Редакцию
19 августа 1993 г.