

сингулярность в «нуле» времени, те же изменения всех существенных параметров на много порядков величин, та же смена «эпох» по мере течения времени и роста характерных размеров задачи.

Отдельные замечательные главы в науке о наноконтактах – исследование электрических токов и химических реакций в области между зондом и поверхностью твердого тела. В перспективе – это и наноэлектроника нового поколения («одноэлектроника» – т. е. приборы, управляемые одним единственным электроном), это и конструкции, использующие фуллереновые нанотрубки, и нанолитография – высокоразрешающая технология локального химического модифицирования поверхности атомарно острыми иглами с целью получения сверхвысокой плотности элементов на кремниевой подложке, записи информации и многое другое. Но описание этих бурно развивающихся разделов физики наноконтактов выходит за пределы объема настоящей статьи.

Несмотря на значительное продвижение в понимании природы наноконтактов, достигнутое в последние годы, ряд принципиальных вопросов остается тем не менее открытым. Чем обусловлена смена механизмов массопереноса и пластической деформации по мере погружения индентора – изменением масштаба отпечатка и зоны деформации, течением времени, понижением действующих напряжений и скорости относительной деформации или необходимостью иметь большую концентрацию точечных дефектов для зарождения мелких дислокационных петель в условиях очень стесненной деформации? Какова природа время-зависимой части поглощаемой энергии в зоне деформации и механизмы восстановления отпечатка после разгрузки? И, уж если пометать, то нельзя ли добиться в конце концов такого режима сверхскольжения, в котором трение бы вовсе отсутствовало, подобно отсутствию сопротивления при сверхпроводимости или сверхтекучести? Можно надеяться, что развитие прецизионных динамических методов нанотестирования позволит со временем ответить и на эти вопросы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дедков Г.В. // УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 585-618.
2. Ball S.J. // Wear. 1999. V. 233-235. P. 412-423.
3. Pethica J.B., Hutchings R., Oliver W.C. // Phil. Mag. A. 1983. V. 48. № 4. P. 593-606.
4. Oliver W.C., Pharr G.M. // J. Mater. Res. 1992. V. 7. № 6. P. 1564-1583.
5. Wolf B. // Cryst. Res. Technol. 2000. V. 35. № 4. P. 377-399.
6. Venkatesh T.A., Van Hiet K.J., Giannakopoulos A.E., Suresh S. // Scripta Materialia. 2000. V. 42. P. 833-839.
7. Bhushan B., Kulkarni A.V., Bonin W., Wyrobeck J.T. // Phys. Mag. 1996. V. A74. № 5. P. 1117-1128.
8. Бульчев С.И., Алексин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
9. Gerberich W.W., Yu.W., Kramer D., Stroyny A., Bahr D., Lilleodden E., Nelson J. // J. Mater. Res. 1998. V. 13. № 2. P. 421-439.
10. Syed Asif S.A., Wahl K.J., Colton R.J. // J. Mater. Res. 2000. V. 15. P. 546-553.
11. Farber B.Ya., Orlov V.I., Nikitenko V.I., Heuer A.N. // Phil. Mag. A. 1998. V. 78. № 3. P. 671-677.
12. Farber B.Ya., Orlov V.I., Heuer A.N. // Phys. Stat. Sol. (a). 1998. V. 166. № 1. P. 115-126.
13. Головин Ю.И., Тюрин А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1994. № 60. № 10. С. 722-726.
14. Головин Ю.И., Тюрин А.И. // ФТТ. 1996. № 6. С. 1812-1819.
15. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Иволгин В.И., Коренков В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 23. № 16. С. 15-19.
16. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Иволгин В.И., Коренков В.В. // ЖЭТФ. 2000. Т. 70. № 5. С. 82-91.
17. Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Farber B.Y. // J. Mater. Sci. 2002. V. 37. P. 895-904.
18. Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Farber B.Ya. // Phil. Mag. A. 2002. V. 82. № 10. P. 1857-1864.
19. Golovin Yu.I., Ivolgin V.I., Korenkov V.V., Korenkova N.V., Farber B.Ya. // Phil. Mag. A., 2002. V. 82. № 10. P. 2173-2177.
20. Rozhanskii V.N., Veldeinskaya M.A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1971. V. 8. № 2. P. 551-564.
21. Akchurin M.Sh., Regel V.R. // Chemistry Reviews. 1998. V. 23. Pt. 2. P. 61-90.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №04-02-17198 и 06-08-01433).

Поступила в редакцию 20 октября 2006 г.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИЕЙ СТРУКТУРЫ И КОМПЛЕКСОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

© И.В. Ушаков, В.М. Поликарпов, А.Е. Калабушкин, Ю.Ф. Титовец, О.Р. Людчик, А.П. Бурмаков, А.С. Перминов, Ю.Ф. Лебедев

Ushakov I.V., Polikarpov V.M., Kalabushkin A.E., Titovets J.F., Ljudchik O.R., Burmakov A.P., Perminov A.S., Lebedev J.F. Modern management methods of evolution of the structure and complex of physical and chemical properties of amorphously-nanocrystalline metal alloys.

В последние годы отмечается возрастающий интерес к новому классу нанокристаллических материалов: аморфно-нанокристаллическим металлическим сплавам, получаемым контролируемой кристаллизацией исходно аморфных металлических сплавов. Новый класс нанокристаллических материалов характеризует-

ся уникальным сочетанием физико-химических характеристик, что обусловлено спецификой его получения. В последние годы появляются работы, посвященные исследованию особенностей формирования аморфно-нанокристаллической матрицы. К настоящему времени экспериментально установлена возможность получения

в многокомпонентных исходно аморфных металлических сплавах термостабильной аморфной наноразмерной матрицы, стабилизирующей нанокристаллическую структуру [1–3].

Существование термостабильной наноразмерной матрицы, контролирующей процессы кристаллизации и определяющей, таким образом, комплекс физико-химических характеристик, позволяет поставить задачу управления процессом структурных преобразований и соответственно комплексом характеристик таких материалов.

Определение взаимосвязи между изменением комплекса физико-химических характеристик и структурного состояния позволяет расширить представления о структуре аморфных и аморфно-кристаллических наноматериалов.

Незначительное изменение структуры аморфно-нанокристаллических материалов может приводить к значительному изменению некоторых характеристик. Однако в настоящее время отсутствует комплексное представление от том, какое структурное состояние нанокристаллической составляющей и аморфной наноразмерной матрицы соответствует оптимальным магнитным, коррозионным или механическим характеристикам, тем более не вполне ясно, возможно ли сочетание оптимальных характеристик, и к какому структурному состоянию надо стремиться при исследовании возможностей управления структурой аморфно-нанокристаллических металлических сплавов.

Исследование взаимосвязи между изменением комплекса физико-химических характеристик и структурного состояния требует точного контроля как изменений структуры, выявляемой современными методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии, так и изменений механических свойств, магнитных характеристик, комплекса химических свойств и пр. Осуществление намеченных исследований обеспечивает возможность получения новой информации, представляющей значительный интерес как для фундаментальной науки, так и для промышленности.

Комплексное исследование аморфно-нанокристаллических металлических сплавов по указанным направлениям, с выполнением соответствующего уровня конкретизации, предъявляемого в настоящее время к подобным исследованиям, возможно только при условии соответствующей кооперации научно исследовательских групп, в целом специализирующихся на более или менее узких направлениях. Например, таких как: исследования структуры аморфно-нанокристаллических материалов; исследования комплекса механических характеристик; исследование современных методов лазерного управления процессами в твердых материалах;

исследование химических свойств; исследование магнитных свойств и пр.

Проведенные за последние годы исследования на качественном уровне показали принципиальную возможность управления структурными характеристиками и комплексом физико-химических свойств аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. Проводимые исследования, основанные на эффективном разделении между исследовательскими группами экспериментальных и теоретических задач, показали свою эффективность, а возможности современных информационных систем позволяют в реальном времени обмениваться полученными результатами, проводить их обсуждение, эффективно координировать проводимые исследования в целом.

В качестве принципиальных задач проводимых и намеченных исследований является разработка современных методов управления структурой нанокристаллической и аморфной наноразмерной составляющих. Задача управления наноразмерной структурой может быть решена использованием высокоточных методов лазерного воздействия. Используя импульсы соответствующей длительности, энергии, распределения интенсивности, длины волны, целенаправленно подбирая другие характеристики излучения (т. е. используя специфические возможности лазерного излучения по обработке материала, когда эффект в первую очередь определяется нетермическими эффектами), можно осуществлять избирательную обработку материала на наноуровне. Соответствующий оперативный контроль взаимосвязи структурных превращений и изменений комплекса физико-химических характеристик позволяет определять требования к структурным характеристикам материала и соответственно к методам управления аморфно-кристаллической наноструктурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абросимова Г.Е., Арошин А.С., Зверькова И.И., Гуров А.Ф., Кирьянов Ю.В.* Образование, структура и микротвердость нанокристаллических сплавов // ФТТ. 1998. Т. 40. № 1. С. 10–16.
2. *Абросимова Г.Е., Арошин А.С., Илатьева Е.Ю.* Метастабильная фаза, образующаяся при кристаллизации аморфного сплава $\text{Ni}_{70}\text{Mo}_{10}\text{P}_{20}$ // ФТТ. 2006. Т. 48. № 1. С. 114–119.
3. *Ушаков И.В., Людчик О.Р., Казабушкин А.Е., Михай В.Н., Поликарпов В.М.* Изменение структурных особенностей и механических свойств металлического стекла 82К3ХСР, подвергнутого термической печной и импульсной лазерной обработке // Фазовые превращения и прочность кристаллов: тез. докл. IV междунар. конф. Черноголовка, 2006. С. 48–49.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-01-00215).

Поступила в редакцию 20 октября 2006 г.