

Видно, что увеличение числа проходов резко увеличило число границ с большими разориентациями. Именно в области большеугловых границ наблюдались крупные поры (рис. 5), количество которых на завершающей стадии ползучести достаточно велико (рис. 6). Можно предполагать, что образование таких микронных пор связано, в частности, с диффузионным развитием и коалесценцией нанопор, зародившихся после РКУ-прессования.

Список литературы

1. С.П. Никоноров, Б.К. Кардашев. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. Наука, М (1985). 254 с.
2. V. Sklenicka, J. Dvorak, M. Svoboda. Mater. Sci. Eng. **389**, 696 (2004)
3. T.R. McNelley, D.L. Swisher, Z. Horita, T.G. Langdon. Ultrafine Grained Mater, II Eds Y.T. Zhu TMS, Warrendale, USA, 15 (2002)
4. В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев. ФТТ, **47**, 5, 801 (2005)
5. В.И. Бетехтин, М.М. Мышляев, А.И. Петров. ФММ, **36**, 4 (1973)
6. В.И. Бетехтин, А.М. Глезер, А.Г. Кадомцев. ФТТ, **40**, 1, 85 (1998)
7. A. Guinier, G. Fournet. Small-Angle Scattering of X-rays. J. Willey. N.Y. (1955)
8. В.И. Владимиров, А.Е. Романов. Дисциплины в кристаллах. Наука, Л (1986). 221 с.
9. В.И. Бетехтин, А.И. Петров, А.Г. Кадомцев. ФММ, **40**, 4, 89 (1975)
10. В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, Б.К. Кардашев. ФТТ, **49**, 8, 142 (2006)

УДК 620.178.15:539.52

МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛОС СДВИГА С НАНОЧАСТИЦАМИ В АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ

Глезер А. М., Манаенков С. Е., Пермякова И. Е.

*Институт металловедения и физики металлов, ФГУП «ЦНИИчермет
им. И.П. Бардина», Москва,
glezer@imph.msk.ru*

При отжиге аморфного состояния и получении при этом аморфно-кристаллических композитов, как известно, можно добиться уникального сочетания свойств, которые становятся даже лучшими, чем у обычных аморфных сплавов [1]. Механические свойства аморфных и аморфно-кристаллических сплавов тесно связаны с таким понятием, как полосы сдвига (ПС), за счет которых происходит процесс их гетерогенной пластической деформации. Во многом тем, как ПС взаимодействуют друг с другом и с выделяющимися частицами, определяется уровень механических характеристик в аморфно-кристаллических сплавах. Однако до настоящего времени этому вопросу не уделялось должного внимания в экспериментальных исследованиях. Целью настоящей работы являлось проведение статистического анализа результатов, полученных при электронно-микроскопическом изучении механизмов взаимодействия ПС с нановключениями кристаллической фазы в аморфно-нанокристаллических сплавах.

Методика и материалы

Объектами исследования являлись ленты исходно аморфного сплава $Fe_{58}Ni_{25}B_{17}$, полученные методом спиннингования. Изучение структуры и фазового состава производили с помощью просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе «TESLA BS-540» с ускоряющим напряжением 120 кВ. Фольги приготавливали электролитической полировкой при напряжении 24 В в растворе, состоящем из ортофосфорной кислоты и хромового ангидрида в пропорции 100 г CrO_3 на 430 мл H_3PO_4 . При изучении фазовых превращений также использовали метод ДСК – калориметр Rigaku 8230 со скоростью нагрева 20 К/мин, с помощью которого для исследуемого сплава установлена температура кристаллизации $T_{срз} = 723$ К. Изохронно отожженные образцы ($T_{от} = 623-673$ К в течение 1 ч в вакууме) после электролитической полировки подвергали индентированию по Виккерсу на микротвердомере ПМТ-3М с целью инициирования ПС и последующего электронно-микроскопического изучения.

Обсуждение результатов

В нашей работе [2] дана подробная классификация наблюдаемых вариантов поведения ПС с кристаллическими включениями (огибание, торможение, перерезание, аккомодация – первичная и вторичная), которая хорошо согласуется и является прямым доказательством теоретически предсказанных механизмов их взаимодействия в работе [3].

Анализ вероятности реализации того или иного механизма показал, что наиболее распространенным является механизм перерезания ПС наночастиц – 52%, в то время как вторичная аккомодация реализуется реже всего – 6% (рис. 1). На приведенном рис. 2 прослеживается тенденция, что по мере достижения наночастицами определенного критического размера происходит смена приоритетного механизма их взаимодействия с ПС. Таким образом, установлена реализация размерного эффекта при анализе поведения ПС с нанокристаллами.

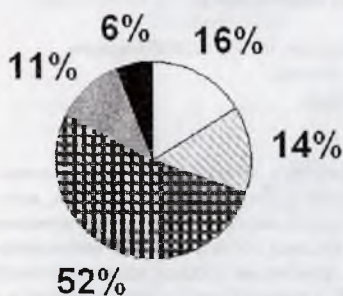


Рис. 1. Диаграмма распределения вероятности реализации механизмов взаимодействия ПС с нанокристаллами при $T_{от} = 643$ К: □ – огибание, □ – торможение, ▨ – перерезание, □ – аккомодация первичная, ■ – аккомодация вторичная.

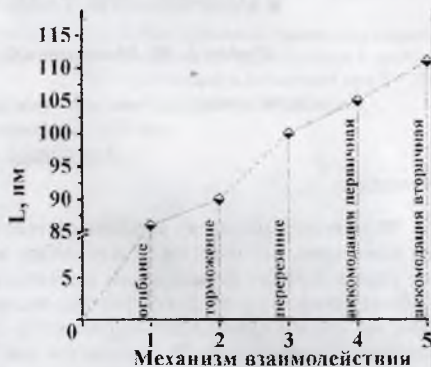


Рис. 2. Явление размерного эффекта при взаимодействии ПС с наночастицами.

В контексте этого, можно обратиться к работе [4], в которой проведена теоретическая оценка устойчивости дислокаций в нанокристаллах. С учетом действия конфигурационных сил и сил трения решетки был определен характерный размер свободного нанокристалла L , ниже которого вероятность существования внутри него подвижных дислокаций заметно снижается. Автор работы [5], проводя теоретические расчеты, предполагает, что в случае, когда размеры кристаллических фаз соизмеримы с толщиной полосы сдвига (10–40 нм), возможны процессы выгибания фронта полосы между наночастицами и, как следствие, изменение её траектории. Наши экспериментальные исследования показали, что для выбранного сплава механизм огибания происходит вплоть до 85 нм. Движение ПС при огибании встречной наночастицы напоминает процесс двойного поперечного скольжения дислокации, преодолевающей жесткий барьер.

Из диаграммы на рис.1 следует, что главными механизмами взаимодействия ПС с наночастицами являются перерезание (52%) и огибание (16%). Промежуточным вариантом между этими механизмами является торможение ПС на наночастицах. Проводя аналогии с работой [4], установлен критический размер нанокристаллов, при превышении которого ПС способна проникнуть в него и застрять, таким образом реализуя механизм торможения: $L_{кр} \approx 90$ нм (рис. 1). При размере кристаллов выше 90 нм происходит механизм перерезания, когда ПС, распространяющаяся в аморфной матрице, может стимулировать дислокационное течение в наночастице, которая, в свою очередь, может стимулировать образование ПС в аморфную компоненту по другую сторону от наночастицы.

Первичная аккомодация состоит в упругой эстафете ПС от одной частицы к другой. Вторичная аккомодация состоит в том, что упруго напряженный нанокристалл инициирует образование нескольких ПС в аморфную матрицу от своей границы.

Среди факторов, влияющих на поведение ПС с наночастицами, следует выделить и такие, как мощность ПС; их скорость распространения; взаимную ориентацию ПС и нанокристаллов; форму, химический состав и кристаллическое строение выделяющихся наночастиц; различие коэффициентов теплового расширения аморфной матрицы и нанокристаллов; соотношение упругих модулей аморфной и кристаллической структурной составляющих. Какой из этих вышеперечисленных факторов является однозначно определяющим осуществление того или иного варианта взаимодействия ПС с наночастицами, установить достаточно сложно. Вероятно, необходимо рассмотреть и учет ряда факторов в комплексе для интерпретации результатов исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 06-02-17075-а).

Список литературы

1. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. Механическое поведение аморфных сплавов. – Новокузнецк: Издательство СибГИУ, 2006. 416 с.
2. Глезер А.М., Манаенков С.Е., Пермякова И.Е. Особенности пластической деформации аморфно-нанокристаллических сплавов // IV Международная конференция «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений»: Сборник научных трудов молодых ученых. (24-30 июня 2007 г., Тамбов). – 2007. – С. 65-70.
3. Glezer A.M., Posdnyakov V.A. Structural mechanism of plastic deformation of nanomaterials with amorphous intergranular layers // Nanostructural materials. – 1995. – V. 6. – P. 767-769.
4. Gryaznov V.G., Polonsky I.A., Romanov A.E., Trusov L.I. Size effect of dislocation stability in nanocrystals // Physical Review. – 1991. – V. B44. – P. 42-46.
5. Поздняков В.А. Развитие полос сдвига в аморфно-кристаллических металлических сплавах // ФММ. – 2004. – Т. 97. – № 1. – С. 9-17.