

ных предположение о том, что металл-металлоидные кластеры могут быть зародышами кристаллической фазы и, следовательно, имеют ближний порядок. Тогда теплопроводность включения должна значительно превышать теплопроводность окружающей матрицы. В этом случае  $\zeta \sim -1$ . Следует отметить тот факт, что сама поверхность так же будет двигаться со скоростью:

$$v_{\text{пов}} = -\alpha T^{-1} D \nabla T_{\infty}. \quad (3)$$

Кстати, при построении подобных моделей часто не учитывается этот факт. Если принять вышеприведенные положения, то получается, что металл-металлоидные кластеры будут двигаться в направлении поверхности со скоростью, в три раза превышающей скорость движения самой поверхности. В этом случае будет наблюдаться эффект, сходный с эффектом, описанным в работе [1]. Попробуем оценить величину коэффициента диффузии, необходимую для того, чтобы было возможно объяснить изучаемый эффект в рамках описанной модели. Если предположить, что  $v \sim 10^{-10}$  м/с,  $\zeta = -1$ ,  $\nabla T \sim 10^{12}$  К/м,  $T \sim 300$  К,  $\alpha \sim 10$ , то  $D \sim 10^{-21}$ , что хорошо совпадает с данными работы [5]. При этом следует понимать, что основное перераспределение компонент будет происходить в области температуры 300 К. Если предложенный подход верен, то в случае разогрева поверхности аморфного сплава должно наблюдаться обратное перераспределение компонент. Подобное исследование было проделано в рамках метода молекулярной динамики. Параметры компьютерного эксперимента совпадали с параметра-

ми, указанными выше, но направление градиента температур было изменено на противоположное (результаты приведены на рис. 2). Видно хорошее качественное согласие с предложенной моделью.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, методом молекулярной динамики исследовано поведение аморфной системы  $\text{Fe}_{80}\text{V}_{20}$  при температурных воздействиях в области низких и высоких температур. Результаты компьютерного эксперимента находятся в качественном согласии с результатами реального эксперимента. Анализ полученных результатов позволил предложить механизм перераспределения компонентов (прежде всего, атомов металлоидов) в верхних слоях аморфной системы при температурном воздействии. В основе предложенной модели лежит теория движения макроскопических включений, подробно разработанная Гегузиным и Кривоглазом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баянкин В.Я., Васильев В.Ю., Волкова И.Б. // *Металлы*. 1997. № 1. С. 164-167.
2. Волкова И.Б., Баранов М.А., Баянкин В.Я. // *Материаловедение*. 1998. № 6. С. 2-8.
3. Баранов М.А., Баянкин В.Я. // *Материаловедение*. 1999. № 4. С. 18-25.
4. Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А. Движение макроскопических включений в твердых телах. М.: *Металлургия*, 1971. 344 с.
5. Бокштейн Б.С., Клиггер Л.М., Уварова Е.Н. Аморфные металлические сплавы: Науч. тр. № 147. МИСиС / Под ред. Ю.А. Скакова. М.: *Металлургия*, 1983. С. 81-86.

УДК 669.715:669

### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ОТЖИГЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА $\text{Al} - 3\% \text{Mg}$

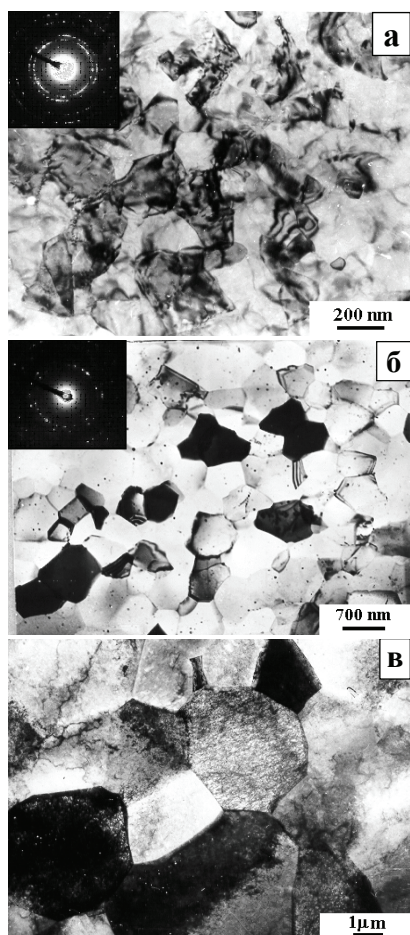
© Н.К. Ценев, А.М. Шаммазов, В.Д. Суханов, Б.А. Козачук

*Россия, Уфа, Государственный нефтяной технический университет*

Tsenev N.K., Shammazov A.M., Suhanov V.D., Kozachuk B.A. Features of structure changes and mechanical properties during the annealing of submicrocrystalline of alloy  $\text{Al} - 3\% \text{Mg}$ . Using the pattern  $\text{Al}$ -based alloy ( $\text{Al} - 3\% \text{Mg}$ ) processed by severe plastic deformation techniques, the article looks at the TEM studies of the specific submicrocrystalline (SMC) structure. The annealing of the alloy results in considerable changes in microstructure: grain boundary structure, grain size. It is revealed that abnormal grain growth leads to a sharp increase of lattice dislocation density enhancing the microhardness. Two possible reasons of the unusual behaviour in the SMC alloy during annealing are considered.

В последние годы субмикроструктурные материалы ( $d < 1\text{мкм}$ ), получаемые методами интенсивной пластической деформации, привлекают пристальное внимание специалистов в области физики прочности и пластичности [1–3]. Этот интерес обусловлен необычными механическими свойствами, проявляемыми СМК материалами: при комнатной температуре наблюдается одновременное повышение значений прочности и пластичности, обнаруживается эффект низкотемпературной высокоскоростной сверхпла-

стичности (НВССП) [4–6] и др. Очевидно, что столь необычное поведение СМК сплавов обусловлено протяженностью и состоянием границ зерен, их термостабильностью. Однако структурные изменения, происходящие в процессе роста зерен в таких материалах, практически не изучены. В этой связи данная работа посвящена экспериментальным наблюдениям изменений дислокационной структуры, происходящих при отжиге на примере субмикроструктурного модельного сплава  $\text{Al} - 3\% \text{Mg}$ .

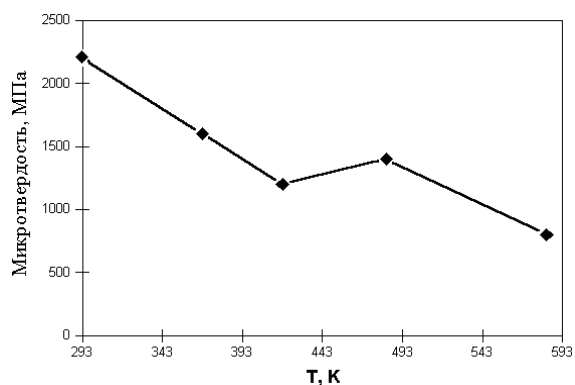


**Рис. 1.** Структура сплава Al – 3 % Mg,  $P = 5$  ГПа. а – после деформации кручением под давлением; б – после отжига при  $T = 423$  К,  $\tau = 1$  ч; в – после отжига при  $T = 473$  К,  $\tau = 1$  ч

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлено типичное светлопольное изображение структуры сплава Al – 3 % Mg после деформации кручением под давлением 5 ГПа со средним размером зерен 170 нм. Из рис. 1а видно, что внутри тела зерен решеточные дислокации не обнаруживаются. Наличие изгибных контуров экстинкции внутри тела зерен, отсутствие четких внутренних границ и размытие многочисленных точечных рефлексов, расположенных по окружности на картине микродифракции, указывает на высокий уровень внутренних напряжений в образце. Все перечисленные выше особенности являются признаками неравновесного состояния полученной структуры.

Измерение микротвердости в этом состоянии показало самые высокие значения (рис. 2). Отжиг образцов с СМК структурой приводит к снижению значений микротвердости, что указывает на релаксацию внутренних напряжений. Однако отжиг при температуре 473 К приводит к неожиданному заметному увеличению значений микротвердости, которые в дальнейшем при отжиге при температуре 573 К вновь снижаются. Рассмотрим возможные причины, приведшие к появлению пика значений микротвердости.



**Рис. 2.** Зависимость значений микротвердости от температуры отжига

Электронномикроскопические исследования показали, что при повышении температуры отжига происходят существенные структурные изменения. Изменяется структура границ зерен, наблюдается рост зерен (рис. 1б). Причем укрупняется вся масса зерен без заметных изменений однородности микроструктуры. На границах зерен появляется более четкий полосчатый дифракционный контраст. Вид электронограммы, по сравнению с исходным состоянием (рис. 1а), не изменяется. Однако размытость точечных рефлексов исчезает. Структурные изменения, происшедшие в процессе отжига до 423 К, являются признаками равновесного состояния субмикроструктуры сплава Al – 3 % Mg. Аналогичные изменения микроструктуры наблюдали в этом сплаве и авторы [7].

Необычные структурные изменения наблюдаются при температуре отжига 473 К (рис. 1в). Во-первых, после отжига в течение 1 часа происходит резкий рост зерен. Средний размер зерен становится равным 5 мкм. При этом наблюдается существенная разноразмерность (встречаются зерна  $d < 1$  мкм и  $d > 1$  мкм). Во-вторых, необычным, на наш взгляд, является появление при отжиге 473 К высокой плотности решеточных дислокаций  $\rho = 10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в теле зерен (см. рис. 1в). В отдельных зернах плотность решеточных дислокаций настолько велика, что происходит появление изгибных контуров экстинкции.

Что же стало причиной появления столь высокой плотности дислокаций при отжиге? Одной из причин может быть появление мощных зернограницных потоков магния по границам зерен. В результате существующих диффузионных зернограницных потоков, как показали авторы [8, 9], на границах зерен возникает мощное осмотическое давление и возникающие напряжения на границах зерен могут существенно превысить значение модуля сдвига. В этом случае в качестве релаксационного механизма может быть испускание границей решеточных дислокаций.

Другой возможной причиной появления высокой плотности решеточных дислокаций может быть распад «старых» границ в процессе собирательной рекристаллизации.

Для проверки первой гипотезы был проведен спектальный анализ, который показал, что после отжига при 473 К в течение 1 часа атомы магния находятся, главным образом, в окрестности границ зерен (рис. 3). Однако после дальнейшего отжига при 573 К в течение 1 часа атомы магния на границах зерен не об-

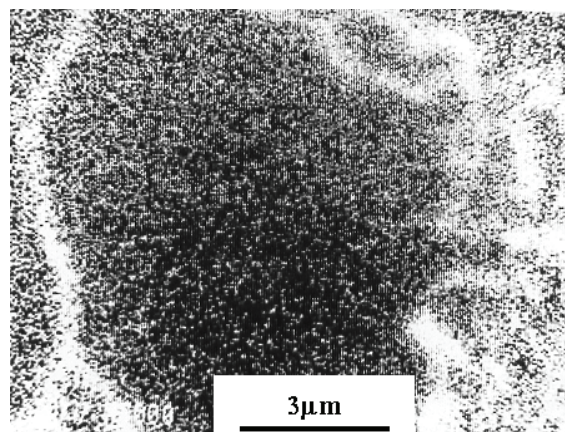


Рис. 3. Структура сплава Al – 3 % Mg в оже-электронах магния после отжига при  $T = 473$  К,  $\tau = 1$  ч. (Видно распределение магния вблизи границы зерна.)

наруживаются. В то же время формируется однородная микроструктура со средним размером зерен 6 мкм, а по границам зерен наблюдаются дисперсные выделения  $Al_3Mg_2$ .

Электронномикроскопические исследования показали, что отжиг при 473 К приводит к бурному росту зерен. Наблюдаемая разнотернистость свидетельствует о процессах протекания собирательной рекристаллизации. Процессы собирательной рекристаллизации могут сопровождаться распадом «старых» границ с образованием высокой плотности дислокаций. Повышение плотности дислокаций в теле зерен и является основной причиной повышения значений микротвердости.

Таким образом, обе гипотезы не опровергают причины появления высокой плотности дислокаций в теле зерен при отжиге СМК сплава. Для более точного ответа на причину появления решеточных дислокаций в теле зерен при отжиге субмикрозернистых материалов необходимо провести дальнейшие экспериментальные исследования с теоретическим обоснованием.

### ВЫВОДЫ

1. Показано, что деформация кручением под давлением приводит к формированию неравновесной суб-

микроструктурной структуры с размером зерен 170 нм.

2. Обнаружено, что рост неравновесных субмикронных зерен происходит в два этапа. На начальных этапах отжига субмикроструктурного сплава Al – 3 % Mg происходит нормальный рост зерен. В последующем, повышение температуры приводит к собирательной рекристаллизации, сопровождающейся образованием высокой плотности дислокаций в теле зерен и, соответственно, к повышению значений микротвердости.

3. Оже-спектральным анализом установлено, что процесс собирательной рекристаллизации сопровождается мощными зернограницными диффузионными потоками магния.

4. Установлено, что в процессе отжига при температуре 473 К наблюдается аномальное повышение значений микротвердости. Это повышение обусловлено появлением высокой плотности решеточных дислокаций в теле зерен.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gleiter H. Nanocrystalline materials // *Progr. Mater. Sci.* 1989. V. 33. P. 223-315.
2. Furukawa M., Iwahashi Y., Horita Z., Nemoto M., Tsenev N.K., Valiev R.Z., Langdon T.G. Structural evolution and the Hall-Petch relationship in an Al-Mg-Li-Zr alloy with ultrafine grain size // *Acta Mater.* 1997. V. 45. № 11. P. 4751-4757.
3. Weertman J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // *Mater. Sci. Eng. A.* 1993. V. 166. P. 161-171.
4. Valiev R.Z., Salimonenko D.A., Tsenev N.K., Berbon P.B., Langdon T.G. Observations of high strain rate super-plasticity in commercial aluminum alloys with ultrafine grain sizes // *Scripta Materialia.* 1997. V. 37. № 12. P. 1945-1950.
5. Tsenev N.K., Valiev R.Z., Obratsov O.V., Fridlander I.N. Mechanical properties of submicron grained Al-Li alloys // *Proceedings of Sixth International Aluminium Conference* / Ed. by M. Peters, P.-J. Winkla. 1992. P. 1125-1132.
6. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure // *Mat. Sci. & Eng.* 1991. V. 137. P. 35-40.
7. Wang J., Iwahashi Y., Horita Z., Furukawa M., Nemoto M., Valiev R.Z., Langdon T.G. An investigations of microstructural stability in an Al-Mg alloy with submicrometer grain size // *Acta Mater.* 1996. V. 44. № 7. P. 2973-2982.
8. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. М.: Наука, 1979. 344 с.
9. Колобов Ю.Р., Марвин В.Б. О диффузионном режиме активации границ потоком примеси // *ФММ.* 1989. Т. 67. № 6. С. 1204-1208.