

- [6] Орлов А.Н., Паршин А.М., Трушин Ю.В. // ЖТФ. 1983. Т. 53. С. 2367-2372.
- [7] Orlov A.N., Pompe W., Trushin Yu.V. In: Proc. Int. Conf. "Energy Pulse Modification of Semiconductors and Related Materials", Sept. 1984. Dresden. Berlin-Verlag. P. 635-639.
- [8] Трушин Ю.В., Орлов А.Н. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1302-1310.
- [9] Трушин Ю.В. В сб.: Вопросы теории дефектов в кристаллах. Л.: Наука, 1987. С. 133-144.
- [10] Pompe W., Bahr H.-A., Gille G. In: Modern Theories and Experimental Evidence. Amsterdam, 1985. V. 12. P. 213-471.
- [11] Теодосиу К. Упругие модели дефектов в кристаллах. М.: Мир, 1985. 306 с.
- [12] Brailsford A.D. // J. Nucl. Mater. 1981. V. 102. P. 54-65.
- [13] Brailsford A.D., Bullough R. // J. Nucl. Mater. 1972. V. 44. P. 121-138.
- [14] Heald P.T. // Phil. Mag. 1975. V. 31. P. 555-558.
- [15] Bullough R., Quigley T.M. // J. Nucl. Mater. 1981. V. 104. P. 1397-1402.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
7 декабря 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 5

12 марта 1991 г.

05.1

© 1991

МЕЛКИЕ МЕЖУЗЕЛЬНЫЕ КЛАСТЕРЫ КАК РЕКОМБИНАТОРЫ В РАСПАДАЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ

Ю.В. Трушин

В экспериментальных работах [1, 2] показано, что в материалах с однородным интенсивным распадом происходит подавление радиационного распухания. В предложенной нами модели [3-7], объясняющей этот эффект, снижение распухания связывается с усилением рекомбинации разноименных дефектов в таких материалах. Для этого необходимо формирование дополнительных рекомбинаторов. Как известно, таковыми могут являться, например, дислока-

ционные диполи [8] при деформационных нагрузках или „полумежузлия и полувакансии“ на некогерентных границах [9].

В работе [7] на основе решения системы уравнений для средних пересыщений дефектов проведен учет би- и тримежузлий в кинетике точечных дефектов и оценена их роль как при наличии, так и в отсутствии когерентных предвыделений вторичных фаз. Из расчетов следует, что в распадающихся под облучением твердых растворах рекомбинация с участием би- и тримежузлий идет значительно быстрее, чем напрямую, а при формировании когерентных предвыделений эта разница еще усиливается. Таким образом, межузельные кластеры, не превратившиеся еще в дислокационные петли, могут являться наиболее вероятными, образующимися в процессе распада твердого раствора, рекомбинаторами. В продолжение работы [7] проведем оценки размеров таких мелких межузельных кластеров.

Из работ [1, 2] по изучению структуры и подавлению радиационного набухания в дисперсионно-твердеющих сплавах с развитым однородным распадом следует, что в таких материалах, как правило, либо не наблюдаются поры, либо их концентрация мала. Если на мелких межузельных кластерах Q , образующихся при развитом распаде твердого раствора, происходит интенсивная рекомбинация с вакансиями, то и не должно быть свободных вакансий для формирования пор, а эти кластеры являются рекомбинаторами. Исходя из этого и пользуясь результатами работ [5, 6], можно записать условие

$$\alpha_{\nu}^i D_i \tilde{c}_i^+ \left(1 + \frac{\alpha_Q^i}{\tilde{c}_i^+}\right) \bar{R}_Q C_Q = \alpha_Q^{\nu} D_{\nu} \tilde{c}_{\nu}^+ \left(1 + \frac{\alpha_Q^{\nu}}{\tilde{c}_{\nu}^+}\right) \bar{R}_Q C_Q, \quad (1)$$

где $j=i$, ν - индекс дефектов: $j=i$ - межузельные атомы, $j=\nu$ - вакансии, α_Q^j - преференциальные множители для стоков Q , D_j - коэффициент диффузии дефектов, j ; \bar{R}_Q и C_Q - средний размер и концентрация стоков Q , α_Q^j - выражение, зависящее от полей напряжений стоков Q ,

$$\tilde{c}_j^+ = c_{j_0}^+ \left(1 + \frac{\delta_j}{g_j}\right) - \quad (2)$$

стационарное пересыщение по точечным дефектам j при наличии выпадающих предвыделений вторичной фазы, g_j - скорость генерации дефектов, $c_{j_0}^+ \approx g_j / D_j k_j^2$, k_j^2 - сумма сил стоков для дефектов типа j , $\delta_j = (1 - \nu_p)^{-1} \int J_p^j(R_p) J_p(R_p) dR_p$,

а ν_p , R_p , $f_p(R_p)$, $J_p^j(R_p)$ - соответственно, объемная доля, радиус, функция распределения по размерам и скорость поглощения дефектов j для предвыделений. Пользуясь выражением (2), получим из (1) условие для сумм сил стоков

$$k_{\nu}^2 = (\alpha_Q^{\nu} g_{\nu} / \alpha_Q^i g_i) k_i^2 \left[1 + k_i^2 (\alpha_Q^i \alpha_Q^i D_i - \alpha_Q^{\nu} \alpha_Q^{\nu} D_{\nu}) / \alpha_Q^i g_i\right]^{-1} \quad (3)$$

Если пренебречь x_Q^j , считая, что $x_Q^j / \tilde{c}_j^+ \ll 1$, то имеем

$$k_v^2 = k_i^2 (\alpha_Q^v g_v / \alpha_Q^i g_i). \quad (4)$$

Пренебрегая величинами x_Q^j / \tilde{c}_j^+ , а также полагая, что в распадомея твердом растворе межузлия не успевают образовать межузельные дислокационные петли, формируя лишь кластеры Q , получим из (4) следующее выражение:

$$\bar{R}_Q C_Q = \frac{g_i}{g_i - g_v} \left[\rho_D \frac{g_v \alpha_D^i}{g_i \alpha_Q^i} \left(1 - \frac{g_i \alpha_Q^i \alpha_D^v}{g_v \alpha_Q^v \alpha_D^i} \right) - \frac{\alpha_P^v}{\alpha_Q^v} \bar{R}_P C_P \right]. \quad (5)$$

Эффективные скорости генерации вакансий и межузлий в твердом растворе с когерентными предвыделениями как раз и различаются величиной выхода дефектов в свободном состоянии. В нашем случае межузельные атомы из сжатых предвыделений выходят в матрицу (см. δ_i). Число межузлий N_Q^i , содержащихся в кластерах Q в единице объема, можно оценить как $N_Q^i = C_Q \pi R_Q^2 / \alpha_0^2$, полагая, что кластеры плоские. Тогда можно ввести верхнюю границу для полного числа межузлий в единице объема материала при облучении в течение времени t в виде $N_i = g_i t$. Поэтому всегда должно выполняться условие

$$\bar{R}_Q < \alpha_0^2 g_i t (\pi \bar{R}_Q C_Q)^{-1}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) соотношение (5) для $\bar{R}_Q C_Q$, имеем с учетом δ_i следующее выражение:

$$R_Q < \frac{\alpha_0^2 (g_i - g_v) t}{\pi} \left[\rho_D \frac{g_v \alpha_D^i}{g_i \alpha_Q^i} \left(1 - \frac{g_i \alpha_Q^i \alpha_D^v}{g_v \alpha_Q^v \alpha_D^i} \right) - \frac{\alpha_P^v}{\alpha_Q^v} \bar{R}_P C_P \right]^{-1} = \\ = \frac{\alpha_0^2 v_p g^p t}{\pi} \left\{ \rho_D \left[1 + \frac{g^p v_p}{g(1-v_p)} \right]^{-1} \frac{\alpha_D^i}{\alpha_Q^i} \left[1 - \left(1 + \frac{g^p v_p}{g(1-v_p)} \right) \frac{\alpha_Q^i \alpha_D^v}{\alpha_Q^v \alpha_D^i} \right] - \frac{\alpha_P^v}{\alpha_Q^v} \bar{R}_P C_P \right\}^{-1}. \quad (7)$$

Выбирая параметры материала для никеля, получим

$$\bar{R}_Q < 3 \cdot 10^{-1} v_p^{-1} (1-v_p)^{-1} t \frac{\alpha_Q^i}{\alpha_D^i} \left[1 - (1-v_p)^{-1} \frac{\alpha_Q^i \alpha_D^v}{\alpha_Q^v \alpha_D^i} - \frac{(1-v_p)^{-1} \alpha_Q^i \alpha_P^v}{5 \alpha_Q^v \alpha_P^i} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Поскольку кластеры Q являются рекомбинаторами, то, следовательно, их предпочтительные множители должны удовлетворять соотношению $\alpha_Q^i < \alpha_Q^v$. Такое соотношение следует, в частности, из факта существования критического размера зародыша скопления R_Q^c , при котором свободная энергия скоплений достигает своего максимального значения. При $R_Q < R_Q^c$ свободная энергия материала с ростом зародыша увеличивается [10]. Мелкие кластеры обладают

относительно большой поверхностной энергией и длительное их существование в материале энергетически невыгодно. Если скорость растворения таких кластеров увеличить, скажем, за счет дополнительной силы, действующей в нашем случае с вакансиями со стороны межузельного кластера ($\alpha_{\tilde{Q}} > \alpha_Q^i$), то скопления Q не достигнут своих критических размеров R_Q^c , а значит, не смогут превратиться в устойчивые и энергетически выгодные кластеры межузельных атомов больших размеров, т.е. в дислокационные петли. На них произойдет аннигиляция приходящих вакансий, и кластеры исчезнут, повысив тем самым эффективность рекомбинации разноименных дефектов. Отсюда следует, что размеры \bar{R}_Q таких кластеров должны быть небольшие, они должны содержать всего несколько межузельных атомов. Кстати (см. [11]), вывод об образовании двойных и тройных межузельных атомов был сделан на основе измерения диффузного рассеяния рентгеновских лучей, рассеяния по Хуангу и измерений механической релаксации. Отбрасывая в (8) спадаемые в знаменателе в силу соотношений $\alpha_Q^i < \alpha_{\tilde{Q}}, \alpha_D^v < \alpha_D^i, \alpha_P^v < \alpha_P^i$, получим оценку для среднего размера кластеров Q в виде

$$\bar{R}_Q < \frac{\alpha_Q^i}{\alpha_Q^v} \frac{v_p}{1-v_p} t \cdot 3 \cdot 10^{-2} (\text{Å}).$$

Значит, например, для $v_p = 0.1$ и $t \approx 10^3$ с величина $\bar{R}_Q < 10 \text{ Å}$.

Следовательно, пересыщение матрицы по межузельным атомам при наличии сжатых когерентных предвыделений должно способствовать образованию мелких связанных состояний межузельных атомов, которые, с одной стороны, не дают возможности межузлиям уйти на структурные стоки (дислокации, границы зерен, поверхность и др.) и тем самым внести вклад в набухание материала, а с другой стороны, являются центрами дополнительной рекомбинации на них вакансий, что приводит к исчезновению самих кластеров.

Стабильные бимежузлия $2i$ состоят из двух параллельных гантелей в положении ближайших соседей, наклоненных на небольшой угол ($< 10^\circ$) в плоскостях $\{110\}$. Стабильные тримежузлия $3i$ образуются из взаимно-ортогональных гантелей в положениях ближайших соседей (см. [11]).

Таким образом, показано, что при выпадении когерентных предвыделений при распаде твердых растворов под облучением пересыщение матрицы по межузельным атомам в случае сжатых предвыделений способствует образованию межузельных атомов, что, в свою очередь, усиливает рекомбинацию разноименных дефектов за счет процессов осаждения вакансий на образующихся в окрестностях предвыделений мелких межузельных кластерах, не являющихся еще дислокационными петлями малого радиуса.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Матвеев В.В. и др. В кн.: Реакторное материаловедение. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1978. Т. 2. С. 21.

- [2] Горынин И.В., Паршин А.М. // Атомная энергия. 1981. Т. 50. С. 319-324.
- [3] Паршин А.М., Трушин Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. С. 561-564.
- [4] Орлов А.Н., Паршин А.М., Трушин Ю.В. // ЖТФ. 1983. Т. 53. С. 2367-2372.
- [5] Трушин Ю.В., Орлов А.Н. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1302-1310.
- [6] Трушин Ю.В. В кн.: Вопросы теории дефектов в кристаллах. Л.: Наука, 1987. С. 133-144.
- [7] Орлов А.Н., Трушин Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 1363-1366.
- [8] Турчин С.И., Альтовский И.В. В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. Харьков, 1983. В. 4(27). С. 18-21.
- [9] Бакан А.С. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. С. 89-93.
- [10] Любов В.Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых телах, М.: Наука, 1981. 295 с.
- [11] Физическое материаловедение. / Ред. Р. Кан. П. Хаазен. Т.1-3, М.: Металлургия, 1987.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
10 декабря 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 5

12 марта 1991 г.

05.1

© 1991

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО СКОРОСТЯМ ВЕЩЕСТВА,
ЭМИТТИРОВАННОГО В РЕЗУЛЬТАТЕ
ГИПЕРСКОРОСТНОГО УДАРА

С.И. Анисимов, С.Б. Житенев,
Н.А. Иногамов, А.Б. Константинов

Последнее время активно изучаются проблемы, связанные с ударом быстролетающих частиц. Это обусловлено как фундаментальностью проблем, так и широким кругом важных приложений, среди которых достаточно упомянуть такие, как пробой высоковольтных промежутков [1-3] вследствие пылевых ударов, ускорение пылевых частиц на линейных ускорителях [4-7], бомбардировку космических объектов микрометеоритами [8-12].