

УДК 621.039.548.3

©1994

ЭВОЛЮЦИЯ АНСАМБЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ И НЕКОГЕРЕНТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НОВОЙ ФАЗЫ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ

А.С.Абызов, В.В.Слезов, Л.В.Танатаров

Теоретически исследовано поведение системы когерентных и некогерентных частиц новой фазы в пересыщенном твердом растворе под облучением. Показано, что механизм радиационно-диффузионного растворения приводит к перекачке материала от когерентных к некогерентным частицам, что может привести к полному растворению первых. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментом.

В обычных условиях пересыщенный твердый раствор нестабилен — он распадается с образованием новой фазы. Облучение, как правило, лишь усиливает эту нестабильность за счет ускорения диффузионных процессов, радиационно-стимулированной сегрегации атомов примеси в окрестностях стоков точечных дефектов (см., например, [1]). В то же время в работе [2] показано, что при определенных условиях облучение может затормозить рост выделений с когерентной (прозрачной по отношению к прохождению точечных дефектов) границей (радиационно-диффузионное растворение). Этот эффект возникает в результате выхода точечных дефектов, порожденных облучением в объеме включения, в матрицу. Междоузельные атомы, покидающие включение, уносят его массу, а вакансии — объем. Скорость производства точечных дефектов пропорциональна объему выделения, а интегральный поток атомов примеси замещения, обеспечивающий рост выделения, пропорционален его радиусу. В результате при определенном размере выделений возникает баланс между их диффузионным ростом и растворением под облучением, т.е. пересыщенный твердый раствор стабилизируется. В данной работе рассмотрена система, в которой помимо когерентных содержатся также выделения с некогерентной границей, не подверженные радиационно-диффузионному растворению. Наличие некогерентных выделений, как будет показано ниже, может привести к полному растворению когерентных.

1. Эволюция ансамбля когерентных и некогерентных включений

Скорость роста когерентных включений под облучением определяется выражением [2]

$$\dot{R}_c = \frac{D}{R_c} \left(\Delta - \frac{\sigma a^3}{TR_c} \right) - \frac{KR_c}{3}. \quad (1)$$

Здесь R_c — радиус когерентного включения, D — коэффициент диффузии, Δ — пересыщенность, σ — коэффициент поверхностного натяжения, T — температура, a — постоянная решетки, K — скорость образования точечных дефектов.

Скорость роста некогерентных включений определяется обычным выражением

$$\dot{R}_u = \frac{D}{R_u} \left(\Delta - \frac{\sigma a^3}{TR_u} \right). \quad (2)$$

Индексы c и u в (1) и (2) относятся к когерентным и некогерентным частицам соответственно. Эту систему необходимо дополнить уравнением сохранения общего количества примеси

$$\Delta_0 = \Delta + \frac{4\pi}{3} \left(\int_0^\infty f_c(R, t) R^3 dR + \int_0^\infty f_u(R, t) R^3 dR \right), \quad (3)$$

где Δ_0 — начальная пересыщенность раствора (излишек примеси над его равновесным значением в отсутствие частиц новой фазы без облучения); $f_{c,u}(R, t)$ — функции распределения частиц по размерам, которые удовлетворяют уравнению непрерывности в пространстве размеров и соответствующим начальным условиям.

Аналитическое решение такой системы в общем случае невозможно (ее частным случаем в отсутствие облучения является задача о коалесценции [3]). Для упрощения предположим, что функция распределения частиц обоих видов имеет δ -образный вид. Тогда уравнение (3) примет вид

$$\Delta_0 = \Delta + \frac{4\pi}{3} (n_c R_c^3 + n_u R_u^3),$$

где n_c и n_u — плотности распределения когерентных и некогерентных частиц. Вводя безразмерные величины

$$r_{c,u} = R_{c,u}/L, \quad \tau = t/t_0, \quad n = n_u/n_c, \quad j = KL^2(3D\Delta_0)^{-1}, \quad \gamma = \sigma a^3(LT\Delta_0)^{-1},$$

получим

$$r_c \frac{dr_c}{d\tau} = 1 - r_c^3 - nr_u^3 - \frac{\gamma}{r_c} - jr_c^2, \quad (4)$$

$$r_u \frac{dr_u}{d\tau} = 1 - r_c^3 - nr_u^3 - \frac{\gamma}{r_u}. \quad (5)$$

Здесь

$$L = (3\Delta_0/4n_c)^{1/3}, \quad t_0 = L^2/D\Delta_0.$$

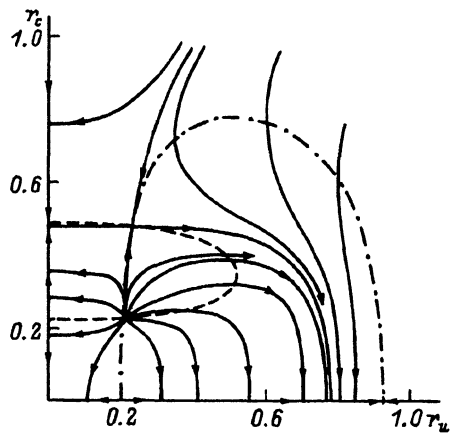


Рис. 1. Фазовый портрет системы (1), (2) для $j = 2$, $\gamma = 0.2$, $n = 1$.

Отметим, что задача в такой постановке фактически свелась к задаче об эволюции системы, состоящей из двух выделений — когерентного и некогерентного, — растущих с различными скоростями.

Проведем качественный анализ системы (4), (5). Построим на фазовой плоскости (r_u, r_c) кривые $\dot{r}_u = 0$ и $\dot{r}_c = 0$. Область между кривой и пересекаемой ею координатной осью является областью роста соответствующего включения. Заметим, что положение кривой $\dot{r}_u = 0$ не зависит от величины j , в то время как для кривой $\dot{r}_c = 0$ возможны три варианта.

а) Малые значения j . Фазовый портрет для этого случая приведен на рис. 1 ($j = 2$ и $\gamma = 0.2$). Кривые $\dot{r}_c = 0$ (прерывистая линия) и $\dot{r}_u = 0$ (штрихпунктир) пересекаются. Анализ показывает, что существуют лишь две точки пересечения: нижняя — неустойчивый узел, верхняя — седло. Меньшая точка пересечения $R_c^{(-)}$ кривой $r_c = 0$ с осью r_c является неустойчивой и соответствует критическому радиусу, большая точка $R_c^{(+)}$ устойчива и соответствует максимальному размеру когерентных выделений [2]. Для некогерентных выделений ситуация аналогична, однако следует отметить, что устойчивый характер точки $R_u^{(+)}$ является следствием предположения о δ -образном распределении включений по размерам, в то время как для когерентных устойчивость $R_c^{(+)}$ обусловлена физически — механизмом диффузионно-радиационного растворения [2].

Исследуем поведение системы со временем. Обозначим через A (B) открытую область, ограниченную кривой $\dot{r}_c = 0$ ($\dot{r}_u = 0$) и осью r_c (r_u). Если в начальный момент фазовая точка находилась в пересечении областей A и B , то производная $dr_c/dr_u > 0$ и со временем возрастают размеры выделений обоих сортов. Фазовая траектория пересекает границу области A (B), либо пересекая кривую $\dot{r}_u = 0$, либо $\dot{r}_c = 0$: В первом случае некогерентные выделения растворяются, фазовая точка выходит на ось r_c и перемещается по ней до точки $R_c^{(+)}$, расположенной на пересечении кривой $\dot{r}_c = 0$ с осью r_c . Второй случай аналогичен первому, только растворяются когерентные выделения. Область вбли-

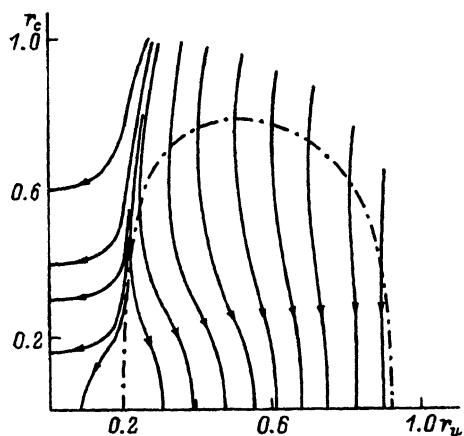


Рис. 2. Фазовый портрет системы (1), (2) для $j = 10$, $\gamma = 0.2$, $n = 1$.

зи начала координат, ограниченная кривыми $\dot{r}_{c,u} = 0$, соответствует докритическим выделениям.

б) Большие j . Фазовый портрет в этом случае более прост (рис. 2, $j = 10$, $\gamma = 0.2$). На физической части фазовой плоскости ($r_c > 0$, $r_u > 0$) остается лишь кривая $\dot{r}_u = 0$. В этом случае растворяются когерентные выделения любых размеров, поведение некогерентных аналогично случаю малых j .

с) Промежуточные значения параметра j . Анализ показывает, что кривая $\dot{r}_c = 0$ появляется в положительной части фазовой плоскости при $j \approx 3.5$. Перестройка портрета оказывается достаточно резкой — малому изменению j соответствует быстрое перемещение кривой $\dot{r}_c = 0$ вправо до пересечения с кривой $\dot{r}_u = 0$.

2. Обсуждение результатов и сравнение с экспериментом

В работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований растворения под облучением системы когерентных и некогерентных выделений. Пересыщенный твердый раствор на основе меди с примесью хрома и кремния подвергался предварительному старению. При этом образовывались когерентные включения хрома и некогерентные включения Cr_3Si . После отжига в течение 10^4 s размер когерентных включений составлял 12 nm. Под облучением ионами меди с энергией 300 keV размеры когерентных включений начинали уменьшаться, и через некоторое время они полностью исчезали, в то время как некогерентные продолжали расти. При температуре 803 K и интенсивности облучения $2.3 \cdot 10^{-2}$ dpa/s время растворения составило 10^3 s. Оценки показали, что в этом случае $j \approx 10$, что соответствует фазовому портрету (рис. 2). Время растворения легко оценить, учитывая, что в этом случае в формуле (1) первое слагаемое пренебрежимо мало, $t_{\text{sol}} \sim 3/K \sim 150$ s, что соответствует наблюдаемому в эксперименте. При низких и комнатных температурах экспериментально наблюдаемые скорости растворения выше расчетных, что, по-видимому, объясняется тем обстоятельством, что наблюдалось исчезновение упругих напряжений в матрице и включениях, а не изменение размеров включения.

Таким образом, воздействие облучения на систему, состоящую из когерентных и некогерентных включений новой фазы, приводит, как правило, к полному растворению последних в отличие от случая, когда существуют только когерентные включения и возможно квазистационарное состояние под облучением [2].

Настоящая работа частично финансировалась в рамках проекта № U29000 Международного Научного Фонда (ISF).

Список литературы

- [1] Russell R.C. // Progress in Materials Science. 1984. V. 28. P. 229-434.
- [2] Абызов А.С., Слезов В.В., Танатаров Л.В. // ФТТ. 1991. Т. 33. С. 834-839.
- [3] Лифшиц И.М., Слезов В.В. // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 472-492.
- [4] Wanderka et al. // J. Nucl. Mat. 1992. V. 189. P. 9-13.

Харьковский
физико-технический институт ННЦ

Поступило в Редакцию
28 февраля 1994 г.