

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЕТЕРОФАЗНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

*Комарь Е.В.*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*

**Ключевые слова:** дислокационная подсистема, плотность дислокаций, гетерофазные сплавы, стационарное устойчивое и неустойчивое состояние, математическое моделирование.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования эволюции дислокационной подсистемы на основе математической модели пластической деформации гетерофазных сплавов с некогерентными частицами, включающей одно уравнения баланса дислокаций. Показано, что для эволюции дислокационной подсистемы в условии пластической деформации при постоянном нагружении наблюдается два стационарных состояния – устойчивое и неустойчивое.

## INVESTIGATION OF THE EVOLUTION OF THE DISLOCATION SUBSYSTEM OF HETEROPHASE ALLOYS UNDER CONDITIONS OF PLASTIC DEFORMATION UNDER CONSTANT STRESS

*Komar E.V.*

*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk*

**Keywords:** dislocation subsystem, dislocations, heterophase alloys, stationary stable and unstable state, mathematical modeling.

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the evolution of the dislocation subsystem based on a mathematical model of plastic deformation of heterophase alloys with incoherent particles, including one dislocation balance equation. It is shown that for the evolution of the dislocation subsystem in the condition of plastic deformation under constant loading, two stationary states are observed – stable and unstable.

Математическое моделирование пластической деформации позволяет исследовать эволюцию дислокационной подсистемы при деформирующих воздействиях, удобных для экспериментального воспроизведения. С этой целью в данной работе приведем результаты исследования дислокационной подсистемы гетерофазных сплавов, деформируемых в условиях постоянной величины приложенного напряжения сдвига  $\tau$ .

Данное исследование проведем на основе математической модели, состоящей из одного уравнения баланса дислокаций [1]:

$$\frac{d\rho}{da} = \frac{FP_j \xi \langle \Delta E_k \rangle}{8\left(\tau - \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta} - \tau_f - \alpha Gb\rho^{1/2}\right)b^3} \rho + \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} + \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{16\left(\tau - \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta} - \tau_f - \alpha Gb\rho^{1/2}\right)q}{3Gb} \rho^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь  $a$  – деформация сдвига;  $\rho$  – суммарная плотность дислокаций;  $F$  – безразмерный параметр, определяемый геометрией зоны сдвига;  $b$  – модуль вектора Бюргерса;  $G$  – модуль сдвига;  $\tau$  – приложенное напряжение;

$\tau_f$  – напряжение трения, обусловленное статическими стопорами недислокационной природы;  $\xi \approx 0,5$  – фактор Смоллмена;  $\langle \chi \rangle$  – параметр, характеризующий геометрию дислокаций на частицах;  $\Lambda_p$  – расстояние между частицами;  $\delta$  – диаметр частицы;  $P_j$  – доля порообразующих дислокаций леса [1-3].

Для определения стационарных решений запишем уравнение:

$$\frac{FP_j \xi \langle \Delta E_k \rangle}{8(\tau - \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta} - \tau_f - \alpha Gb \rho^{1/2}) b^3} \rho + \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} + \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{16(\tau - \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta} - \tau_f - \alpha Gb \rho^{1/2}) q}{3Gb} \rho^{\frac{1}{2}} = 0.$$

Это уравнение в зависимости от набора значений параметров модели имеет одно или три стационарных решения. При этом существует особая точка  $\rho^* = (\tau - \tau_f - \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta}) / \alpha Gb$ , в которой знаменатель уравнения обращается в нуль

(т.е. решение не существует).

Исследование стационарных решений и  $\rho^*$  показало, что возможны два случая [1].

1) Существует одно стационарное решение  $\rho_s$ , для которого значение плотности дислокаций выше значения плотности дислокаций в особой точке  $\rho^*$ . В этом случае фазовое пространство можно разделить на три области (рис. 1,а): первая, при  $\rho < \rho^*$  плотность дислокаций монотонно возрастает до значений  $\rho^*$ . Вторая область,  $\rho^* < \rho < \rho_s$ , плотность дислокаций монотонно убывает до значений  $\rho^*$ . При  $\rho > \rho_s$ , что имеет место в третьей области, с увеличением деформации будет происходить нарастание плотности дислокаций. Таким образом, стационарное решение  $\rho_s$  является неустойчивым. Заметим, что возрастание плотности дислокаций при  $\rho > \rho_s$  в рамках рассматриваемой модели не ограничено.

2) Существуют три стационарных решения  $\rho_s^1$ ,  $\rho_s^2$ ,  $\rho_s^3$ . В этом случае фазовое пространство можно разделить на пять областей (рис. 1, б). Первая, при  $\rho < \rho_s^1$  плотность дислокаций монотонно возрастает до значений  $\rho_s^1$ . Вторая область,  $\rho_s^1 < \rho < \rho_s^2$ , плотность дислокаций монотонно убывает до значений  $\rho_s^1$ . И, следовательно, стационарное состояние, характеризуемое плотностью  $\rho_s^1$ , устойчиво, то есть при любом отклонении плотности дислокаций от стационарной величины дислокационная подсистема возвращается к стационарному значению плотности дислокаций  $\rho_s^1$ . Третья область,  $\rho_s^2 < \rho < \rho^*$ , плотность дислокаций монотонно возрастает до значений  $\rho^*$ . Четвертая область,  $\rho^* < \rho < \rho_s^3$ , плотность дислокаций монотонно убывает до значений  $\rho^*$ . Пятая область,  $\rho < \rho_s^3$ , с увеличением деформации будет происходить нарастание плотностей дислокаций. Таким образом, состояния, характеризуемые стационарными значениями плотности дислокаций  $\rho_s^2$  и  $\rho_s^3$ , соответствуют неустойчивому равновесию (рис. 1,б). При любом отклонении плотности дислокаций от стационарных значений дислокационная подсистема удаляется от стационарного состояния.

Таким образом, в зависимости от соотношения между исходной плотностью дислокаций, характеристиками материала и избыточным напряжением кинетика дислокационной подсистемы может иметь существенно различный характер.

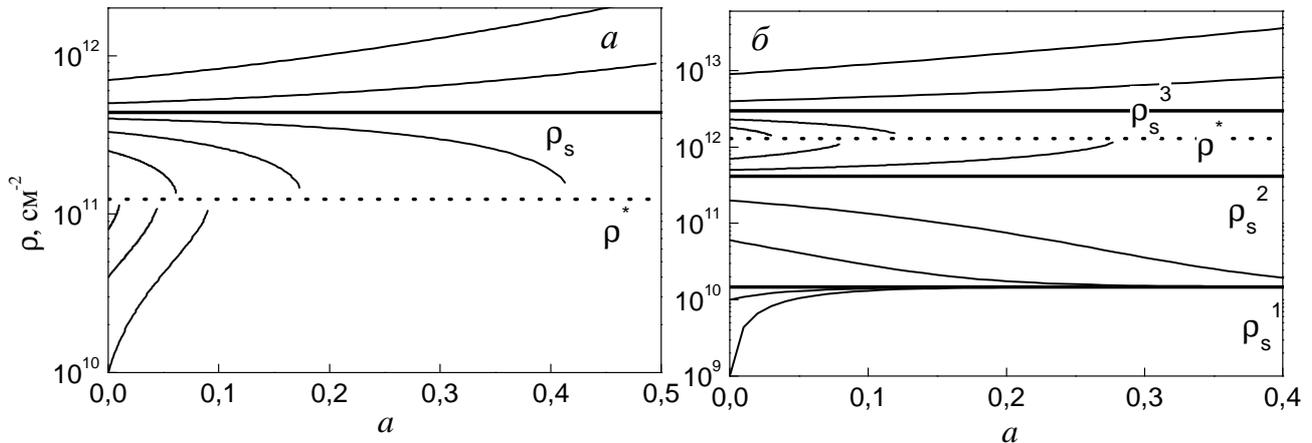


Рис. 1. Зависимость плотности дислокаций  $\rho$  от степени деформации сдвига.  $A_p=7 \cdot 10^{-5}$  см,  $G=10^5$  МПа,  $\delta=5 \cdot 10^{-6}$  см,  $\tau_f=10$  МПа,  $\alpha=0,5$ : а)  $\tau=500$  МПа; б)  $\tau=1500$  МПа

На рисунке 2. представлены диаграммы стационарных решений для модели дисперсно-упрочненного материала, деформируемого в условиях постоянного напряжения сдвига  $\tau$ . При наборе значений параметров модели, характерных для гетерофазного материала на основе Ni, три стационарных решения появляются при высоких значениях напряжения, при этом с ростом  $\tau$  область динамического разупрочнения  $\rho_s^1 < \rho < \rho_s^2$  расширяется (рис. 2,а).

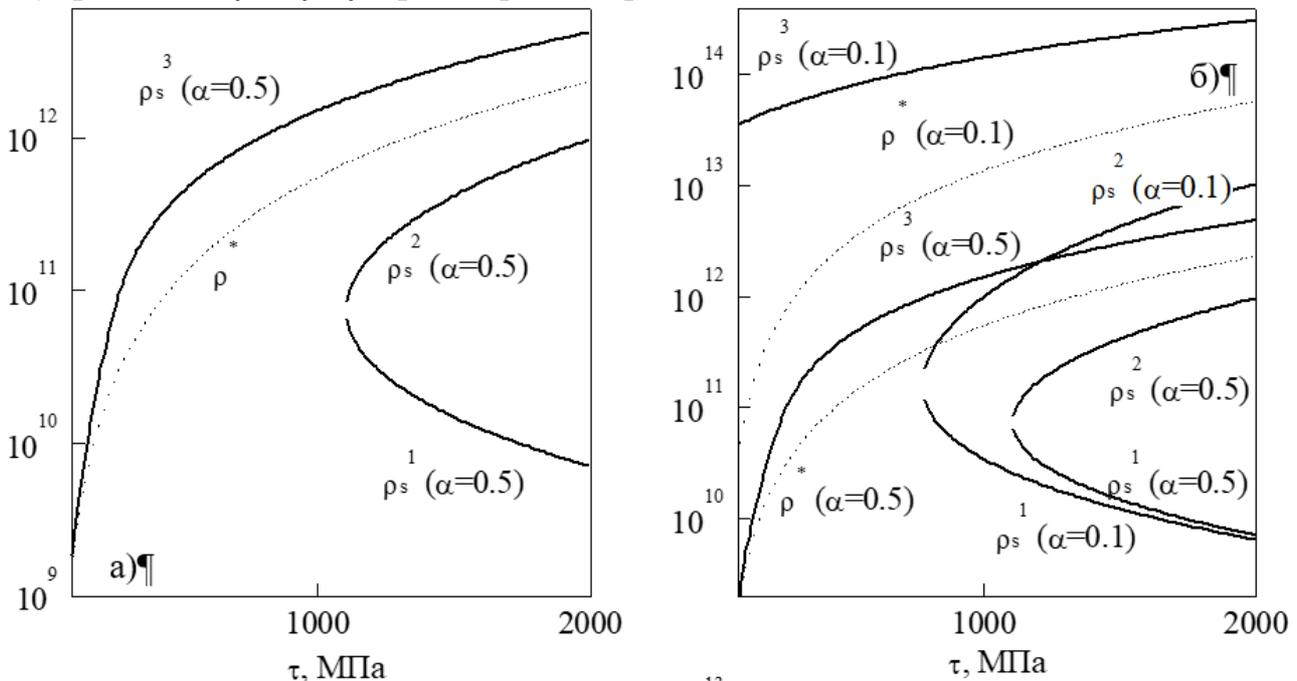


Рис. 2. Стационарные значения плотности дислокаций: а)  $A_p=7 \cdot 10^{-5}$  см,  $G=10^5$  МПа,  $\delta=5 \cdot 10^{-6}$  см,  $\tau_f=10$  МПа,  $\alpha=0,5$ ; б)  $A_p=7 \cdot 10^{-5}$  см,  $G=10^5$  МПа,  $\delta=5 \cdot 10^{-6}$  см,  $\tau_f=10$  МПа,  $\alpha=0,5$  и  $\alpha=0,1$

Параметрическое исследование модели показало следующие закономерности. С уменьшением  $\alpha$  три стационарных состояния дислокационной

подсистемы появляются при меньших значениях  $\tau$  (рис. 2 б). Такая же зависимость наблюдается с увеличением расстояния между частицами, при больших значениях  $\Lambda_p$  три стационарных состояния появляются при меньшем напряжении, при этом уменьшается значение плотности дислокаций  $\rho_s^1$ , соответствующее устойчивому стационарному состоянию.

Отметим, что при высоких значениях напряжения  $\tau$ , когда  $\tau \gg \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta} + \tau_f + \alpha Gb\rho^{1/2}$ , характер развития дефектной структуры,

практически, аналогичен наблюдаемому в случае, рассмотренном выше при постоянном избыточном напряжении  $\tau_{dyn}$  [1, 3], так как в области «реальных» значений плотности дислокаций будут наблюдаться два стационарных состояния, значение третьего стационарного состояния и особой точки  $\rho^*$  будут превышать  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Таким образом, проведенный анализ позволяет предполагать, что в зависимости от характеристик материала и его исходной дефектности возможно так подобрать деформирующее напряжение  $\tau$ , чтобы добиться желаемого режима деформирования.

#### Список литературы

1. Комарь Е.В. Математическое моделирование деформационного упрочнения и эволюции дефектной подсистемы гетерофазных г.ц.к. материалов с некогерентной упрочняющей фазой: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2003. – 302 с.
2. Колупаева С.Н., Ерыгина Е.В., Ковалевская Т.А., Попов Л.Е. Качественное исследование эволюции дефектной подсистемы гетерофазных сплавов с некогерентной упрочняющей фазой при интенсивных воздействиях // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3, Вып. 2. – С. 63-79.
3. Комарь Е.В., Колупаева С.Н. Исследование кинетики дефектной подсистемы гетерофазных сплавов // Фундаментальные основы механики. – 2022. – №10. – С. 77-81.

#### Сведения об авторе:

Комарь Елена Васильевна – к.ф.-м.н., доцент.