

## ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЕТЕРОФАЗНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКЕ

*Комарь Е.В.*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*

**Ключевые слова:** дефектная подсистема, дислокации, гетерофазные сплавы, одноосное растяжение, избыточное напряжение, математическое моделирование.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования развития деформационной подсистемы на основе математической модели пластической деформации гетерофазных сплавов с некогерентными частицами, включающей одно уравнения баланса дислокаций. Показано, что для эволюции деформационной подсистемы в условии пластической деформации при постоянной нагрузке наблюдается три или пять зон различного поведения: зоны упрочнения и зоны разупрочнения.

## EVOLUTION OF THE DEFECTIVE SUBSYSTEM OF HETEROPHASE ALLOYS UNDER CONDITIONS OF PLASTIC DEFORMATION UNDER CONSTANT LOAD

*Komar E.V.*

*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk*

**Keywords:** dislocation subsystem, dislocations, heterophase alloys, uniaxial tension, excessive stress, mathematical modeling.

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the development of a deformation 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 deformation subsystem under the condition of plastic deformation under constant load, three or five zones of different behavior are observed: hardening zones and softening zones.

Моделирование различных процессов, происходящих при пластической деформации, занимательная вещь. Можно выявить некоторые особенности развития дефектной подсистемы, а далее попытаться экспериментально это воспроизвести. В данной работе приведем результаты исследования деформационной подсистемы гетерофазных сплавов, деформируемых при постоянной нагрузке в случае высоких напряжений.

Рассмотрим деформацию дисперсно-упрочненного сплава, которая осуществляется в динамическом режиме при постоянной нагрузке ( $P = const$ ). Величину избыточного напряжения можно представить в виде [1]:

$$\tau_{dyn} = \tau - \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta} - \tau_f - \alpha G b \rho^{1/2}. \text{ Здесь } \rho - \text{ суммарная плотность дислокаций; } b -$$

модуль вектора Бюргерса;  $G$  – модуль сдвига;  $\tau$  – приложенное напряжение;  $\tau_f$  – напряжение трения;  $\Lambda_p$  – расстояние между частицами;  $\delta$  – диаметр частицы.

В условиях одноосного растяжения цилиндрического образца при постоянной нагрузке напряжение возрастает с изменением поперечного сечения

образца в процессе деформации по закону  $\tau = \tau_0 \exp(a/k)$  [1], где  $a$  – деформация сдвига;  $k$  – множитель Закса; в дальнейших расчетах принимаем  $k \approx 2$ . Тогда имеем:  $\tau_{dyn} = \tau_0 \exp(a/k) - \frac{Gb}{\Lambda_p - \delta} - \tau_f - \alpha Gbp^{1/2}$ .

Уравнение баланса дислокаций при постоянной нагрузке в условиях динамического нагружения запишем в виде [1]:

$$\frac{d\rho}{da} = \frac{FP_j \xi \langle \Delta E_k \rangle}{8\tau_{dyn} b^3} \rho + \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} + \frac{1}{\Lambda_p b} - q \frac{16\tau_{dyn}}{3Gb} \rho^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь  $F$  – безразмерный параметр зоны сдвига;  $\xi \approx 0,5$  – фактор Смоллмена;  $\langle \chi \rangle$  – параметр, характеризующий геометрию дислокаций на частицах;  $P_j$  – доля порообразующих дислокаций леса [1-3].

Для выявления основных тенденций развития дислокационной подсистемы гетерофазного материала, найдем изоклины нуля, т. е. кривые, в точках которых  $d\rho/da = 0$ . Это означает, что точки указанных кривых могут оказаться для интегральных кривых точками максимума или минимума. Эти кривые разбивают фазовое пространство на области, в которых производная будет иметь разные знаки, а, следовательно, и поведение интегральных кривых  $\rho(a)$  иметь аналогичный характер.

Запишем уравнение для нахождения изоклин нуля:

$$\frac{FP_j \xi \langle \Delta E_k \rangle}{8(\tau_{dyn}) b^3} \rho + \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} + \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{16(\tau_{dyn}) n^*}{3Gb} \rho^{\frac{1}{2}} = 0.$$

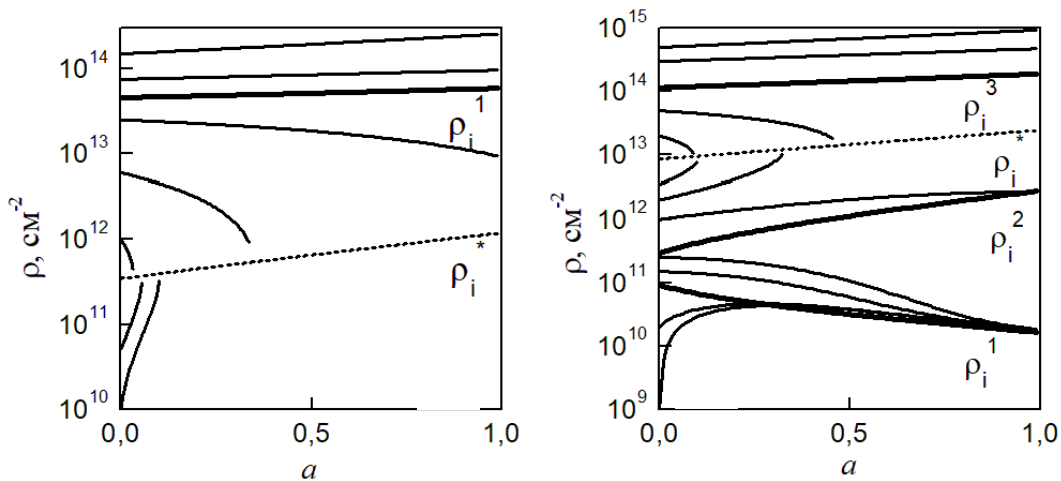


Рис. 1. Зависимость плотности дислокаций  $\rho$  от деформации:  $\Lambda_p = 7 \cdot 10^{-5}$  см,  $G = 10^5$  МПа,  $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$  см,  $\tau_f = 10$  МПа,  $\alpha = 0,1$ : а)  $\tau_0 = 200$  МПа; б)  $\tau_0 = 800$  МПа

Уравнение имеет в зависимости от значений параметров одно или три решения в области действительных значений переменных, которые найдены аналитически, но в силу громоздкости выкладок явный вид решений приводить не будем. Параметрическое исследование данного уравнения показало, что в этом случае важным управляющим параметром при таком виде деформации является начальное напряжение  $\tau_0$ . На рисунке 1 приведены два возможных варианта развития дислокационной подсистемы в зависимости от значений  $\tau_0$ . Первый –

когда дифференциальное уравнение имеет одну изоклину нуля  $\rho_i^1$  и одну «особую» изоклину, при которой знаменатель обращается в нуль  $\rho_i^*$  (рис. 1, а). Второй – дифференциальное уравнение имеет три изоклины нуля  $\rho_i^1$ ,  $\rho_i^2$ ,  $\rho_i^3$  и «особую» изоклину  $\rho_i^*$  (рис. 1, б). На рисунке 2 представлены диаграммы изоклин, где можно наблюдать, как разбивается фазовое пространство модели на области между изоклинами в зависимости от деформации (рис. 2, а), а также в зависимости от  $\alpha$  (рис. 2, б). Влияние параметра  $\tau_f$ , как и в случае деформации с постоянным напряжением незначительно.

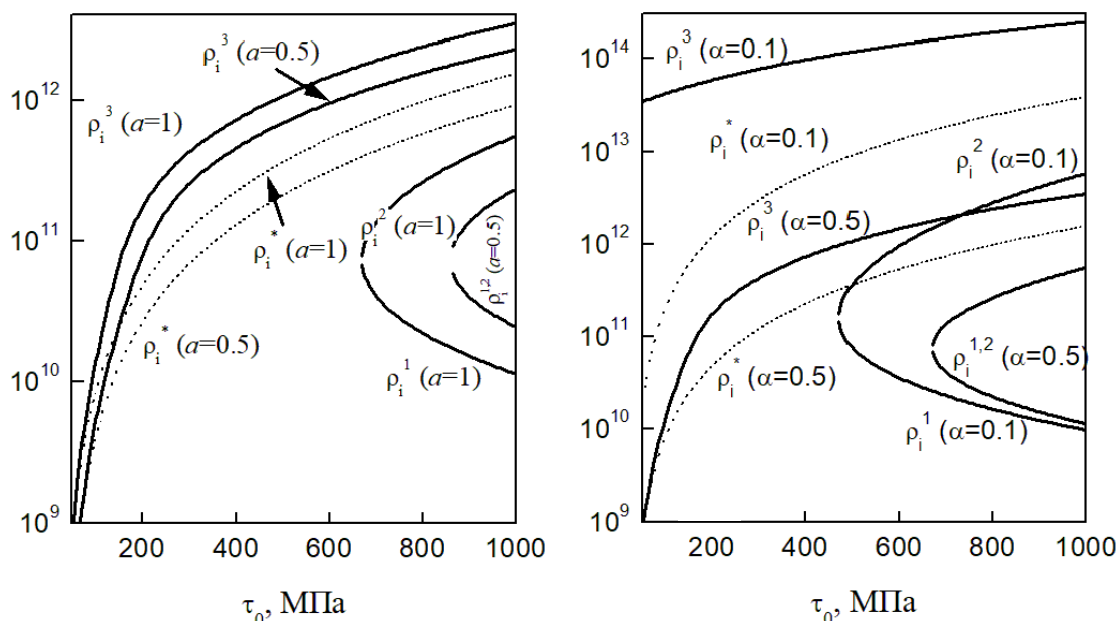


Рис. 2. Зависимость изоклин нуля от начального напряжения  $\tau_0$ :  $L_p = 7 \cdot 10^{-5}$  см,  $G = 10^5$  МПа,  $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$  см,  $\tau_f = 10$  МПа,  $\alpha = 0,5$ : а) при различной степени деформации сдвига  $a = 0.5$  и  $a = 1$ ; б) при различных значениях  $\alpha$ :  $\alpha = 0,1$  и  $\alpha = 0,5$ ; обозначения:  $\rho_i^1, \rho_i^2, \rho_i^3$  – изоклины нуля,  $\rho_i^*$  – особая изоклина

Таким образом, установлено, что при постоянной нагрузке фазовое пространство модели имеет особую точку, но эта точка имеет физически нереализуемые значения плотности дислокаций. Но в целом, анализ показывает, что 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: Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2003. – 302 с.
2. Комарь Е.В. Исследование эволюции дислокационной подсистемы гетерофазных сплавов в условиях пластической деформации при постоянном напряжении // *Фундаментальные основы механики*. – 2023. – №12. – С. 142-145.
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.