

УДК 539.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ГЦК СПЛАВОВ

© С.Н. Колупаева, Е.В. Ерыгина, Т.А. Ковалевская

Россия, Томск, Томский государственный архитектурно-строительный университет

Kolupaeva S.N., Erygina E.V., Kovalevskaya T.A. Modelling for dislocation subsystem in deforming dispersion hardening f.c.c. alloys. The model of a dislocation subsystem evolution in heterophase alloys, containing noncoherent particles, is considered. The model includes three differential equations of a balance for: 1) matrix dislocations, 2) vacancies prismatic loops, and 3) interstitials prismatic loops. The qualitative research of the dynamic system and the parametrical analysis is carried out. The phase portraits are calculated.

В качестве базового структурного элемента модели удобно использовать зону элементарного кристаллографического сдвига, которая является связующим звеном между микро- и макропроявлениями пластичности [1 - 2]. В гетерофазных материалах дефектная структура зоны сдвига сложнее, чем в чистых металлах и однофазных сплавах [3 - 6]. Вместе с генерацией сдвигообразующих дислокаций в этом случае развиваются элементарные процессы, обусловленные взаимодействием дислокаций с частицами. Результатом является генерация новых типов дефектов - призматических петель, колец Орована, петель вторичного скольжения и др. [3 - 6].

Для гетерофазных материалов с недеформируемыми частицами существует некоторая критическая плотность дислокаций ρ_c , при превышении которой изменяется характер дислокационной структуры зоны сдвига [7]. В условиях докритической плотности дислокаций смещение дислокаций в третьем измерении - в направлении нормали к плоскости скольжения - невелико, и расширение дислокационной петли, испущенной источником, можно рассматривать как двумерный процесс. При этом накопление сдвигообразующих дислокаций происходит на барьерах дислокационной природы, ограничивающих зону сдвига. Внутризонные

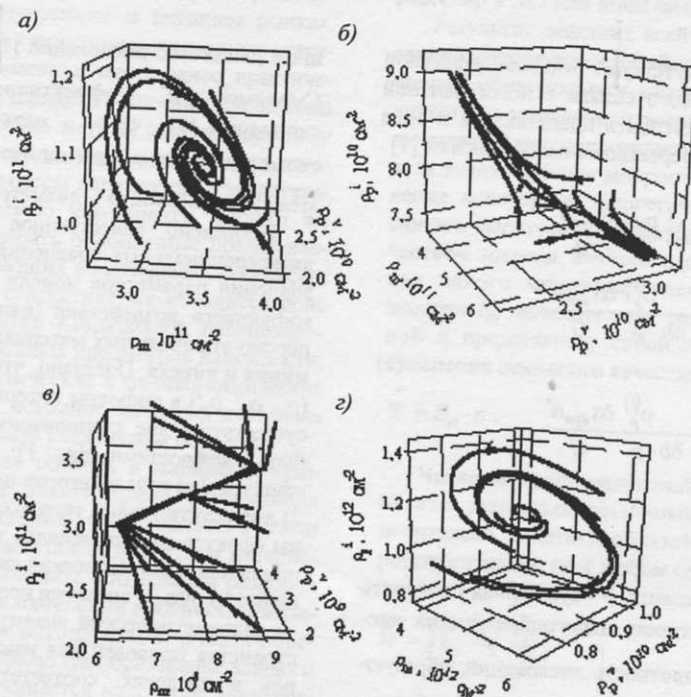


Рис. 1. Локальные фазовые портреты при $\Lambda_p = 7 \cdot 10^{-5}$ см, $G = 10^5$ МПа, $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$ см, $n^* = 2$, $F = 2$: а) устойчивый фокус при $\tau_{dyn} = 1000$ МПа ($\rho_m = 3,43 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$, $\rho_v = 2,25 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$, $\rho_i = 1,06 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$), б) неустойчивое стационарное состояние при $\tau_{dyn} = 1000$ МПа ($\rho_m = 4,975 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$, $\rho_v = 2,8876 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$, $\rho_i = 7,73 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$), в) устойчивый узел при $\tau_{dyn} = 2000$ МПа и $G = 4 \cdot 10^4$ МПа ($\rho_m = 7,91 \cdot 10^9$ см $^{-2}$, $\rho_v = 3,122 \cdot 10^9$ см $^{-2}$, $\rho_i = 3,153 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$), г) неустойчивый фокус при $\tau_{dyn} = 1800$ МПа и $\delta = 1,15 \cdot 10^{-6}$ см ($\rho_m = 4,98 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$, $\rho_v = 8,63 \cdot 10^9$ см $^{-2}$, $\rho_i = 1,15 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$).

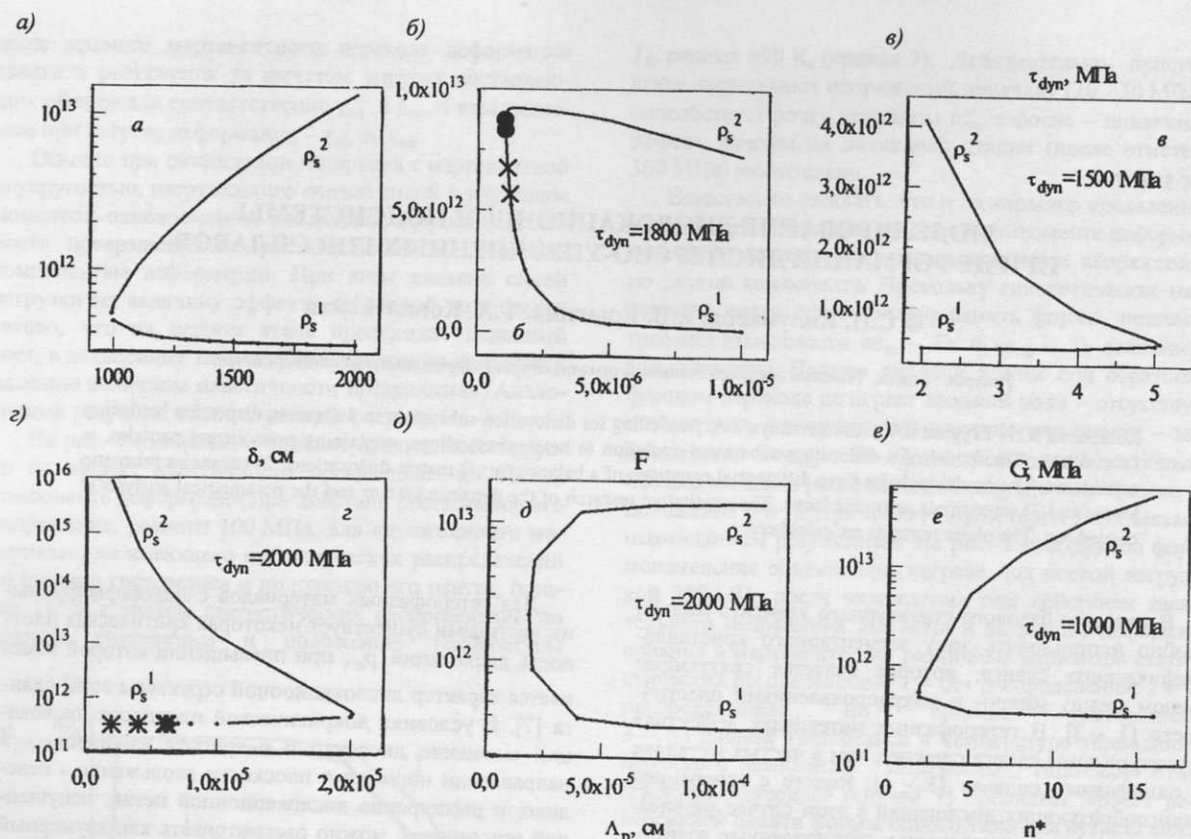


Рис. 2. Стационарные значения суммарной плотности дислокаций при различных значениях параметров, при $n^* = 2$, $F = 2$, $\Lambda_p = 7 \cdot 10^{-5}$ см, $G = 10^5$ МПа, $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$ см: — - устойчивое стационарное состояние (фокус); --- - неустойчивое стационарное состояние; * - устойчивый узел; x - неустойчивый фокус.

протяженные барьеры отсутствуют. Модель дефектной подсистемы деформируемого сплава с некогерентной упрочняющей фазой может быть представлена в виде следующей системы дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_m}{da} &= \frac{F}{D(\rho_m, \tau_2)b} - \frac{16}{3} (\xi\rho)^{\frac{1}{2}} \frac{\rho_m}{\rho} \frac{\Delta\tau_{dyn} n^*}{Gb}, \\ \frac{d\rho_p^{(v)}}{da} &= \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} - \frac{128}{3} \frac{\rho_p^{(v)}}{\chi > \delta b} \frac{\rho_p^{(v)}}{\rho} \frac{\Delta\tau_{dyn} n^*}{G}, \\ \frac{d\rho_p^{(i)}}{da} &= \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} + \frac{128}{3} \frac{\rho_p^{(i)}}{\chi > \delta b} \frac{\rho_p^{(i)}}{\rho} \frac{\Delta\tau_{dyn} n^*}{G} - \\ &\quad - \frac{16}{3} (\xi\rho)^{\frac{1}{2}} \frac{\rho_p^{(i)}}{\rho} \frac{\Delta\tau_{dyn} n^*}{Gb}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь a - деформация сдвига, ρ - суммарная плотность дислокаций, ρ_m - плотность сдвигообразующих дислокаций, $\rho_p^{(v)}$ и $\rho_p^{(i)}$ - плотность дислокаций, образующих вакансионные и межузельные петли, F - безразмерный параметр, определяемый геометрией зоны сдвига [1], $D(\rho_m, \tau_2)$ - диаметр зоны сдвига, b - модуль вектора Бюргерса, G - модуль сдвига, $\Delta\tau_{dyn}$ - напряжение, избыточное над статическим сопротивле-

нием движению дислокаций [2, 3, 7], $\xi \approx 0,5$ - фактор Смоллмена, n^* - эффективное число дислокаций в скоплении [7], $\langle \chi \rangle$ - параметр, характеризующий геометрию дислокаций на частицах, Λ_p - расстояние между частицами, δ - диаметр частицы.

Проведено качественное исследование системы дифференциальных уравнений (1) в широком спектре значений параметров модели и интенсивности деформирующего воздействия (напряжения $\Delta\tau_{dyn}$) для дисперсно-упрочненных материалов на основе меди, алюминия и никеля. Показано, что в фазовом пространстве $(\rho_m, \rho_p^{(v)}, \rho_p^{(i)})$ в широком интервале значений параметров существуют две стационарные точки, которые могут быть следующими (рис. 1): 1) одна устойчивая типа «фокус» или «узел», вторая неустойчивая типа «седло»; 2) две неустойчивые типа «седло» или «фокус». Термины «фокус», «узел», «седло» традиционно применяются при анализе динамических систем на плоскости, но, как видно из рис. 1, аналогии вполне уместны.

Параметрический анализ структуры фазового пространства проведен для изменения значений параметров в пределах, соответствующих их физическому смыслу: $F = 2 \div 5,7$; $n^* = 2 \div 16$; $\Lambda_p = 2 \cdot 10^{-5} \div 7 \cdot 10^{-5}$ см; $G = 2 \cdot 10^4 \div 10^5$ МПа; $\delta = 10^{-6} \div 10^{-5}$ см; $\tau_{dyn} = 100 \div 2000$ МПа. С ростом Λ_p , τ_{dyn} , n^* , значение стационарной плотности дислокаций $\rho_s^{(1)}$ уменьшается, а $\rho_s^{(2)}$ - увеличивается (рис. 2); с

увеличением F значение $\rho_s^{(1)}$ увеличивается, а $\rho_s^{(2)}$ — уменьшается; с ростом δ меняется тип стационарных состояний (отмечено различными символами на кривых рис. 2).

Расчеты фазовых траекторий показали, что в зависимости от исходного дефектного состояния при данном воздействии возможна существенно различная эволюция дислокационной подсистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. М.: Металлургия, 1984. 182 с.
2. Попов Л.Е., Пудан Л.Я., Колупаева С.Н. и др. Математическое моделирование пластической деформации. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. 185 с.
3. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивости пластической деформации кристаллов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 300 с.
4. Ashby M.F. Work hardening of dispersion hardened crystals // Phil. Mag. 1966. V. 14. P. 1157-1178.
5. Хири П.Б., Хэмфри Ф. Дж. Пластическая деформация двухфазных сплавов, содержащих малые недеформируемые частицы / Физика прочности и пластичности. М.: Металлургия, 1972. С. 158-186.
6. Коротаев А.Д., Чумляков Ю.И., Бушнев Л.С. Механизмы деформации и природа упрочнения гетерофазных сплавов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1983. С. 135-162.
7. Ковалевская Т.А., Виноградова И.В., Попов Л.Е. Математическое моделирование пластической деформации гетерофазных сплавов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1992. 168 с.

УДК 621.38.019.3

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

© Е.В. Семакин, С.Ф. Подборонников, В.Е. Громов, Д.С. Поварник

Россия, Новокузнецк, СибГИУ

Semakin E.V., Podboronnikov S.F., Gromov V.E., Povarnik D.S. Principles of the reliability theory of materials and goods. The theoretical approaches to the design of refusals distribution and the definition of reliability characteristics of materials and products have been made in this paper. The energetic concept of materials fracture has been put in the base of the developed ideas. The properties of the phase plane are used for the definition of average period of exploitation.

Обеспечение качества и надежности изделий имеет решающее значение для создания продукции, конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынках. Традиционные подходы к описанию надежности статистическими методами, имевшие место ранее, практически полностью себя исчерпали. Конечно, полностью отбрасывать статистические методы нельзя, поскольку всегда есть случайные отклонения в технологии изготовления изделий, и процессы нагружения в эксплуатации имеют стохастическую компоненту. Однако же главную роль должны играть обобщенные представления о сущности протекающих в материалах процессов, изменения их свойств, статистике же отводится роль инструмента для обработки наблюдений, прогнозирования и расчета традиционных параметров надежности.

Многие реальные физические и физико-химические процессы, изменяющие исходное качество материала изделия, можно представить следующим образом.

Существует некоторая область в материале изделия, где накапливаются элементарные повреждения структуры (микрповреждения); такую область в целом будем отождествлять с растущими дефектами материала. Рост дефекта может состоять в изменении размеров дефектной области, или в изменении плотности микрповреждений (отношения накопленного числа к объему), или в том и другом сразу. На образование каждого микрповреждения затрачивается некоторое количество энергии. Если микрповреждение необратимо, «не залечивается», это означает, что соответствующие атомы, активированные затрачиваемой энергией, попали в потенциальную яму, а количество энергии, соответст-

вующее элементарному акту повреждения материала, рассеяно в том или ином виде.

Результат действия всей затрачиваемой на образование микрповреждений энергии можно выразить числом образующихся микрповреждений или же количеством затраченной энергии, а в ряде случаев — количеством диссипированной энергии. Принимая модель возникновения микрповреждения в виде преодоления некоторого энергетического барьера E_a , будем считать высоту этого барьера тем элементарным количеством энергии, которое необходимо для возникновения одного микрповреждения. Тогда произведение энергии E_a на количество возникших микрповреждений n представляет собой энергию, затраченную на изменение исходного качества материала изделия:

$$W = E_a \cdot n. \quad (1)$$

Число микрповреждений n меняется во времени. Можно задаваться различными предположениями относительно кинетики образования и накопления микрповреждений, но в любом случае

$$\dot{W} = \int_0^t E_a \cdot n_t^I \cdot dt, \quad (2)$$

где $n_t^I = \frac{\partial n}{\partial t}$ — скорость (интенсивность) накопления микрповреждений.