

УДК 539.37:691.32

О.В. МАТВИЕНКО^{1,2}, О.И. ДАНЕЙКО^{1,2}, Т.А. КОВАЛЕВСКАЯ^{1,2}

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОЙ РАВНОМЕРНЫМ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ТРУБЫ ИЗ СПЛАВА, УПРОЧНЕННОГО НЕКОГЕРЕНТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ*

Проведено исследование формирования дислокационной структуры толстостенной трубы из дисперсно-упрочнённого сплава на основе меди, нагруженной равномерным внутренним давлением. Увеличение генерации сдвигообразующих дислокаций и призматических дислокационных петель с ростом давления приводит к утолщению области пластической деформации. С увеличением размеров упрочняющих частиц и уменьшением расстояния между ними генерация элементов дислокационной структуры возрастает, как и прочностные характеристики материала.

Ключевые слова: дисперсно-упрочнённые материалы, наноразмерные частицы, пластическая деформация, математическая модель, деформационное упрочнение.

Введение

Пластическая деформация и деформационное упрочнение гетерофазных сплавов с некогерентными упрочняющими частицами изучается, начиная с работ Орована, Эшби, Хирша и др. [1–15]. В этих исследованиях впервые были предложены новые виды дислокаций, генерируемые в процессе пластического сдвига: кольца Орована, призматические петли.

Математическая модель пластической деформации дисперсно-упрочнённых сплавов с некогерентными частицами и физические механизмы, лежащие в её основе, представлены в работах [16–20]. Модель включает уравнения баланса деформационных линейных и точечных дефектов с учетом их генерации, аннигиляции и трансформации в процессе пластической деформации.

В работах [15, 17, 19] проведено исследование влияния масштабных характеристик некогерентных упрочняющих частиц (размеров и расстояния между ними) на деформационное упрочнение ГЦК-кристаллических материалов и формирование их дислокационной структуры: призматических петель, диполей, сдвигообразующих дислокаций. В рамках математической модели пластической деформации монокристаллов дисперсно-упрочнённых ГЦК-материалов с наноразмерными частицами в [16] проведено исследование влияния температуры и скорости деформации на поведение материала и эволюцию его дислокационной подсистемы. Установлено, что для материалов с разной матрицей (алюминиевой, медной, никелевой) существенно не различается вид кривых температурной зависимости деформационного упрочнения и плотностей составляющих дислокационной подсистемы. В [15, 16] выявлено, что в материалах с наноразмерной и нанодисперсной упрочняющей фазой независимо от её сопряжения с матрицей наблюдается более интенсивное деформационное упрочнение, чем в материалах с более крупными частицами при одинаковой объёмной доле упрочняющей фазы.

В работе [21] с целью описания процессов локализации пластической деформации проводился синтез модели дислокационной кинетики с моделью механики в терминах упругопластической среды. Выявлено, что немонотонное деформационное упрочнение элемента деформируемой среды приводит к потере устойчивости пластической деформации.

Авторами [22, 23] на основе модели эволюции элементов деформационной дефектной среды проведено исследование пластической деформации толстостенной трубы из сплава на основе меди, упрочнённой некогерентными наночастицами и находящейся под действием однородного внутреннего давления. В результате проведенных исследований получена зависимость положения зоны пластической деформации от давления, определен предел упругого и пластического сопротивления трубы, получено изменение степени деформации по толщине стенки трубы, выявлено влияние размера упрочняющих частиц на прочностные свойства материала.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-13-01252).

В рамках настоящей работы проведено исследование формирования элементов дислокационного ансамбля (сдвигообразующих дислокаций, призматических петель) в процессе пластической деформации гетерофазных сплавов с некогерентными упрочняющими частицами и их влияние на расширение пластической зоны в трубе, нагруженной равномерным внутренним давлением.

Математическое моделирование деформационного упрочнения

В основе модели пластической деформации дисперсно-упрочнённых материалов лежит концепция упрочнения и отдыха [17, 18]. В дисперсно-упрочнённых материалах дефектная структура зоны сдвига сложнее, чем в чистых металлах и однофазных сплавах. Взаимодействие дислокаций с частицами в процессе пластической деформации помимо упрочняющего эффекта приводит к появлению ряда новых элементов дислокационной структуры. Вместе с генерацией сдвигообразующих дислокаций в этом случае развиваются элементарные процессы, обусловленные взаимодействием дислокаций с частицами и порождающие кольца Орована, призматические петли, петли вторичного скольжения, дипольные конфигурации. Между структурными элементами в ходе деформации и последующих релаксационных процессов возможны взаимные превращения. При этом характер и результат взаимодействий элементов дислокационной структуры с частицами может меняться с изменением соотношений масштабных характеристик упрочняющей фазы (размера частиц, расстояния между частицами) и расстояния между дислокациями.

При моделировании процесса пластической деформации и деформационного упрочнения предполагается, что в процессе пластического сдвига дисперсно-упрочнённых материалов с ГЦК-матрицей, содержащих некогерентную дисперсную фазу, формируется зона сдвига и образуются следующие типы деформационных дефектов: линейные – сдвигообразующие дислокации (их плотность ρ_m), призматические петли вакансионного и межузельного типа, дислокационные диполи вакансионного и межузельного типа, точечные деформационные дефекты – межузельные атомы (концентрация c_i), моновакансии (концентрация c_v), бивакансии (концентрация c_{2v}).

Математическая модель включает уравнения баланса деформационных дефектов, в которых учтены следующие процессы: генерация и аннигиляция матричных сдвигообразующих дислокаций, генерация и аннигиляция призматических петель вакансионного и межузельного типа, а также генерация и аннигиляция дислокаций в дипольных конфигурациях. Генерация и аннигиляция призматических петель происходит вблизи некогерентных упрочняющих частиц. В модели учтено, что при возрастании размера призматических петель в результате осаждения точечных дефектов соответствующего типа (например, в результате осаждения межузельных атомов на межузельные призматические петли) они могут терять устойчивость и переходить в разряд сдвигообразующих дислокаций.

Таким образом, уравнения баланса элементов деформационной дефектной среды могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_m}{da} &= (1 - \omega_s P_{as}) \frac{F}{Db} - \frac{2}{a} (1 - \omega_s) \rho_m^2 b \min(r_a, \rho_m^{-1/2}) (c_{2v} Q_{2v} + c_{1v} Q_{1v} + c_i Q_i) + \\ &+ \frac{2\alpha}{a} b \sqrt{\rho} (\rho_p^v (c_{1v} Q_{1v} + c_{2v} Q_{2v}) + \rho_p^i c_i Q_i) + \frac{2b}{a r_a} (\rho_d^i c_i Q_i + \rho_d^v (c_{1v} Q_{1v} + c_{2v} Q_{2v})), \\ \frac{d\rho_p^i}{da} &= \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} - \frac{2\alpha}{a} \sqrt{\rho} \rho_p^i b (2c_{2v} Q_{2v} + c_i Q_i + 2c_{1v} Q_{1v}), \\ \frac{d\rho_p^v}{da} &= \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} - \frac{2\alpha}{a} \sqrt{\rho} \rho_p^v b (c_{2v} Q_{2v} + 2c_i Q_i + c_{1v} Q_{1v}), \\ \frac{d\rho_d^v}{da} &= \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{2b}{a r_a} \rho_d^v (c_{2v} Q_{2v} + c_i Q_i + c_{1v} Q_{1v}), \\ \frac{d\rho_d^i}{da} &= \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{2b}{a r_a} \rho_d^i (c_{2v} Q_{2v} + c_i Q_i + c_{1v} Q_{1v}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dc_i}{da} &= q \frac{\tau_{\text{dyn}}}{G} - \frac{c_i}{\dot{a}} [((1-\omega_s)\rho_m + \rho_p + \rho_d)b^2 Q_i + Q_{1v}c_{1v} + Q_{2v}c_{2v} + Q_i(c_{1v} + c_{2v})], \\ \frac{dc_{1v}}{da} &= \frac{q\tau_{\text{dyn}}}{6G} - \frac{1}{\dot{a}} [(((1-\omega_s)\rho_m + \rho_p + \rho_d)b^2 + c_i + c_{1v})Q_{1v}c_{1v} + Q_i c_i c_{1v} - (Q_{2v} + Q_i)c_i c_{2v}], \\ \frac{dc_{2v}}{da} &= \frac{5q\tau_{\text{dyn}}}{6G} - \frac{1}{\dot{a}} [(((1-\omega_s)\rho_m + \rho_p + \rho_d)b^2 + c_i)Q_{2v}c_{2v} + Q_i c_i c_{2v} - Q_{1v}c_{1v}^2]. \\ \dot{a} &= \frac{8}{\pi} \frac{\nu_D B \beta_r^{1/2}}{\xi^{1/6} F (1 - \beta_r)} \frac{\tau^3 (((1 - \beta_r)\rho_m + \rho_p + \rho_d)(\tau - \tau_a))^{1/3}}{G^{4/3} b^{1/3} (\tau^2 - G^2 b^2 \xi \beta_r \rho_m) \rho_m^{1/2}} \exp \left[-\frac{0.2Gb^3 - (\tau - \tau_a)\Lambda b^2}{kT} \right]. \end{aligned}$$

Здесь a – деформация сдвига; \dot{a} – скорость деформации; D – диаметр зоны сдвига; F – параметр, определяемый формой дислокационных петель и их распределением в зоне сдвига; τ_{dyn} – напряжение, избыточное над статическим сопротивлением движению дислокаций; $Q_j = Z_j \nu_D \exp(-U_j^{(m)}/kT)$ – кинетический коэффициент; $U_j^{(m)}$ – энергия активации миграции точечных дефектов j -го типа; Z_j – число мест, возможных для прыжка дефекта j -го типа ($j = i, v$); ν_D – частота Дебая; k – постоянная Больцмана; T – температура деформирования; ω_s – доля винтовых дислокаций; $\langle \chi \rangle$ – средняя величина параметра, характеризующего «геометрию» дислокаций на частицах; Λ_p – расстояние между частицами второй фазы; δ – размер частиц; q – параметр, определяющий интенсивность генерации точечных дефектов; G – модуль сдвига; b – модуль вектора Бюргерса; ρ – плотность дислокаций; $\rho_p = \rho_p^i + \rho_p^v$ – плотность призматических дислокационных петель; $\rho_d = \rho_d^i + \rho_d^v$ – плотность дислокаций в дипольных конфигурациях; α – параметр междислокационных взаимодействий; ξ – доля дислокаций леса; β_r – для реагирующих дислокаций; τ_f – напряжение трения; ν – коэффициент Пуассона; P_{as} – вероятность аннигиляции винтовых дислокаций [24–27]:

$$P_{as} = \begin{cases} V_{as}, & \text{если } V_{as} < 1, \\ 1, & \text{если } V_{as} \geq 1, \end{cases} \quad V_{as} = \left(\frac{Gb}{\pi} \right)^2 \frac{\rho_m \omega_s}{12\tau_f(\tau - \tau_f)}, \quad r_a = \frac{Gb}{4\pi\tau_f} \frac{(2 - \nu)}{(1 - \nu)}.$$

Атермическая составляющая сопротивления движению дислокаций τ_a в дисперсно-упрочнённом сплаве с некогерентными частицами обусловлена напряжением трения τ_f , взаимодействием с реагирующими дислокациями леса τ_d и напряжением обхода частиц τ_{Or} : $\tau_a = \tau_f + \tau_d + \tau_{Or}$.

Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих баланс деформационных линейных и точечных дефектов, необходимо задать начальные значения концентраций точечных дефектов и плотностей дислокаций. Начальная концентрация точечных дефектов соответствует концентрации термодинамически равновесных точечных дефектов при данной температуре, начальная плотность сдвигообразующих дислокаций – состоянию недеформированного кристалла, предполагается отсутствие дислокационных призматических петель и дислокаций в дипольных конфигурациях при $a = 0$: $\rho_m^{(0)} = 10^{12} \text{ м}^{-2}$, $\rho_p^{(0)} = \rho_d^{(0)} = 0$, $c_i^{(0)} = c_{2v}^{(0)} = c_v^{(0)} = \exp\left(\frac{-U_j}{kT}\right)$.

Основные расчеты проведены при следующих значениях параметров для монокристаллов дисперсно-упрочнённых сплавов с медной матрицей: $b = 2.5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $F = 4$; $\nu_D = 10^{13} \text{ с}^{-1}$; $\alpha = 0.5$; $\alpha_a = 0.45$; $\alpha_r = 0.3$; $\beta_r = 0.14$; $\xi = 0.5$; $\tau_f = 10 \text{ МПа}$; $G = 51.9 \text{ ГПа}$; $\alpha_{\text{dyn}} \approx 0.33$; $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$; $\omega_s = 0.3$; $U_v^f = 1.26 \text{ эВ}$; $U_{2v}^f = 2.16 \text{ эВ}$; $U_i^f = 3.28 \text{ эВ}$; $U_v^m = 0.88 \text{ эВ}$; $U_{2v}^m = 0.69 \text{ эВ}$; $U_i^m = 0.117 \text{ эВ}$.

Решение уравнений баланса элементов деформационной дефектной среды осуществлялось методом Рунге – Кутты – Мерсона четвертого порядка точности [28], позволяющим решать умеренно и сильно жесткие системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Схема Мерсона требует на каждом шаге вычислять правую часть обыкновенного дифференциального уравнения в пяти точках. При этом за счет только одного дополнительного коэффициента по сравнению с классической схемой Рунге – Кутты на каждом шаге можно определить погрешность реше-

ния Δ . Для автоматического выбора шага интегрирования используется следующий критерий. Если абсолютное значение величины окажется больше допустимой заданной погрешности Δ_{\max} , то шаг интегрирования уменьшается в 2 раза и вычисления повторяются. При условии $|\Delta| < 1/32 \Delta_{\max}$ шаг интегрирования по времени Δt можно удвоить. Автоматический выбор шага позволяет значительно сократить время вычислений.

Аппроксимация полученных в результате численных расчетов баланса элементов деформационной дефектной среды зависимостей предельного напряжения сдвига от степени деформации позволяет с погрешностью, не превышающей 0.1 %, предложить следующие функциональные зависимости $\tau_s(a)$:

$$\tau_s = \tau_0 + \tau_1 \frac{a}{(a_1 - \tau_0/G) + a} - \frac{\tau_0 \tau_1 / G}{(a_1 - \tau_0/G) + a}, \quad (2)$$

где τ_0 , τ_1 , a_1 – параметры, определяющие свойства материала.

Математическая модель напряженно-деформационного состояния

Рассмотрим напряжения и деформации в толстостенной трубе, нагруженной внутренним давлением p . Будем считать, что материал, из которого изготовлена труба, является упругопластическим упрочняющимся и несжимаемым. При рассмотрении процесса пластической деформации трубы, находящейся под действием однородного внутреннего давления, будем полагать, что внутренние слои трубы $r \leq R_{pl}$ находятся в пластически деформированном состоянии, а внешние слои трубы $r > R_{pl}$ деформированы упруго ($p_1 < p < p_*$).

Распределение напряжений по толщине стенки трубы определяется уравнением равновесия, описывающим баланс напряжений в радиальном направлении [29]:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0. \quad (3)$$

Уравнение равновесия (3) содержит две неизвестные величины: компоненты тензора напряжений σ_{rr} и $\sigma_{\varphi\varphi}$. Дополнительное соотношение в случае упругой деформации можно получить с помощью уравнения совместности напряжений, которое в случае плоской осесимметричной задачи имеет вид [30]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} (\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}) \right) = 0. \quad (4)$$

В случае пластической деформации дополнительным условием, связывающим компоненты тензора напряжений, является условие пластичности [31]

$$|\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}| = \tau_s(a), \quad (5)$$

где τ_s – предел текучести, являющийся функцией интенсивности сдвиговых деформаций a .

Сформулируем граничные условия для уравнения (3). На внутреннюю поверхность трубы $r = R_{in}$ действует однородное поле давления p . Давление на внешнюю стенку трубы $r = R_{ex}$ полагаем отсутствующим. Таким образом, условия на границах принимают вид

$$r = R_{in}: \quad \sigma_{rr} = -p, \quad r = R_{ex}: \quad \sigma_{rr} = 0. \quad (6)$$

Определим закон изменения интенсивности деформаций по радиусу трубы. Запишем условие несжимаемости ($\varepsilon_V = 0$) в виде [32]

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} = 0. \quad (7)$$

Отметим, что соотношение (7) справедливо как в упругой, так и в пластической областях.

Решение уравнения равновесия (3) с граничными условиями (6), условием несжимаемости материала (7), физическим соотношением (2), а также условием совместности напряжений (4) и пластичности (5) позволяет определить распределение деформаций в стенке трубы. Эти распределения имеют вид [22, 23]

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\frac{\tau_0}{2G} \frac{R_{pl}^2}{r^2}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r} = \frac{\tau_0}{2G} \frac{R_{pl}^2}{r^2}, \quad a = \sqrt{2(\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2)} = \frac{\tau_0}{G} \frac{R_{pl}^2}{r^2}. \quad (8)$$

Граница зоны упругого и пластического деформирования материала R_{pl} для заданного значения давления p может быть найдена из решения трансцендентного уравнения:

$$p = (\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{R_{pl}}{R_{in}}\right) + \tau_0 \frac{R_{ex}^2 - R_{pl}^2}{2R_{pl}^2} + \left(\tau_1 + \frac{\tau_0\tau_1}{2Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{in}^2}{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{pl}^2}\right). \quad (9)$$

Анализ результатов

Рассмотрим основные результаты исследования формирования дислокационной структуры и пластической деформации трубы из сплава на основе меди, упрочненного некогерентными наночастицами. Расстояние между упрочняющими частицами варьировалось в диапазоне $\Lambda_p = 40 - 100$ нм, размер частиц $\delta = 5 - 10$ нм. При математическом моделировании предполагалось, что внутренний радиус $R_{in} = 0.1$ м, а внешний $R_{ex} = 0.105$ м.

В результате решения системы уравнений (1) получены зависимости плотности сдвигобразующих дислокаций и дислокаций в призматических петлях от степени деформации (рис. 1). Выявлено, что при увеличении размера упрочняющих частиц и при уменьшении расстояния между ними наблюдается увеличение плотности как сдвигобразующих дислокаций (рис. 1, а), так и плотности дислокаций в призматических петлях (рис. 1, б).

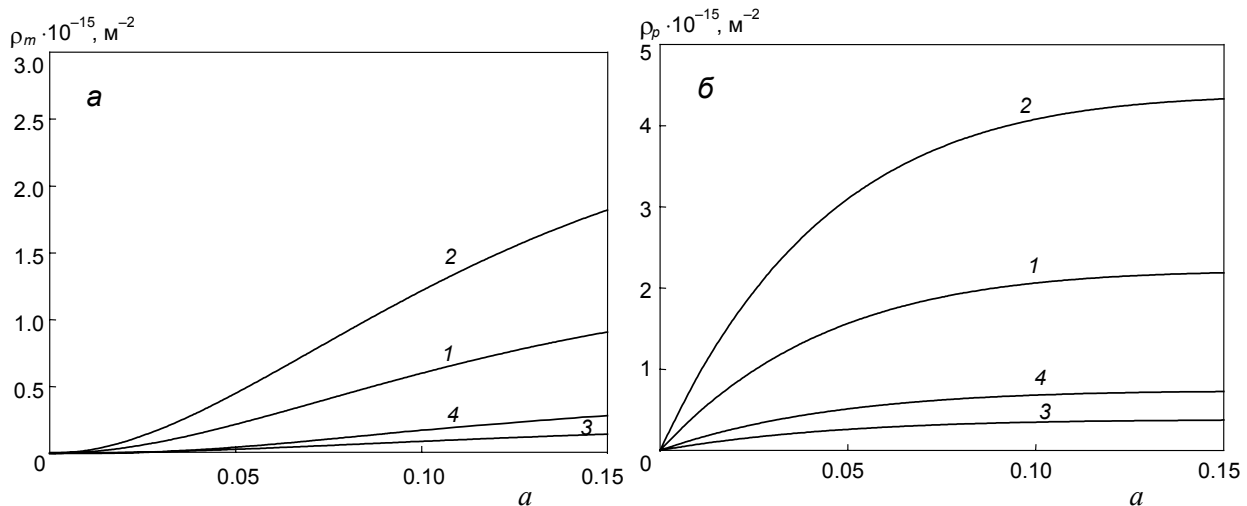


Рис. 1. Зависимость плотности сдвигобразующих дислокаций (а) и плотности призматических дислокационных петель (б) от деформации. Размер частиц упрочняющей фазы, нм: кр. 1, 3 – 5; кр. 2, 4 – 10; расстояние между частицами, нм: кр. 1, 2 – 40; кр. 3, 4 – 100

Результаты ранее проведенных исследований [22, 23] показали, что максимальные деформации наблюдаются вблизи внутренней стенки трубы, в области максимальных сжимающих напряжений. По мере удаления от внутренней стенки и приближения к внешней стенке трубы степень деформации материала уменьшается. На границе упругой и пластической зоны деформирования степень деформации определяется максимально возможным значением упругой деформации

$$a = \frac{\tau_0}{G} = 0.00658.$$

С увеличением давления деформация возрастает, а граница упругой и пластической зоны R_{pl} смещается к внешней стенке трубы. Анализ полученных результатов удобно проводить с использованием безразмерной координаты – границы упругой и пластической зоны $\xi_{pl} = \frac{R_{pl} - R_{in}}{R_{ex} - R_{in}}$. Значение $\xi_{pl} = 0$ соответствует пределу упругого сопротивления трубы, при котором труба находится в упругом состоянии, но на ее внутренней поверхности возникает пластическое состояние мате-

риала. При $\xi_{pl} = 1$ достигается предел пластического сопротивления, при котором материал трубы по всей толщине перешел в пластическое состояние.

На рис. 2 приведено распределение плотности сдвигообразующих дислокаций по толщине стенки трубы из сплава на основе меди для материалов с различными размерами упрочняющих частиц и расстояниями между ними для нескольких значений величины внутреннего давления p . Из рис. 2 видно, что наибольшая плотность сдвигообразующих дислокаций достигается вблизи внутренней стенки трубы в области максимальных сжимающих напряжений и деформаций. Увеличение величины давления приводит к росту плотности сдвигообразующих дислокаций.

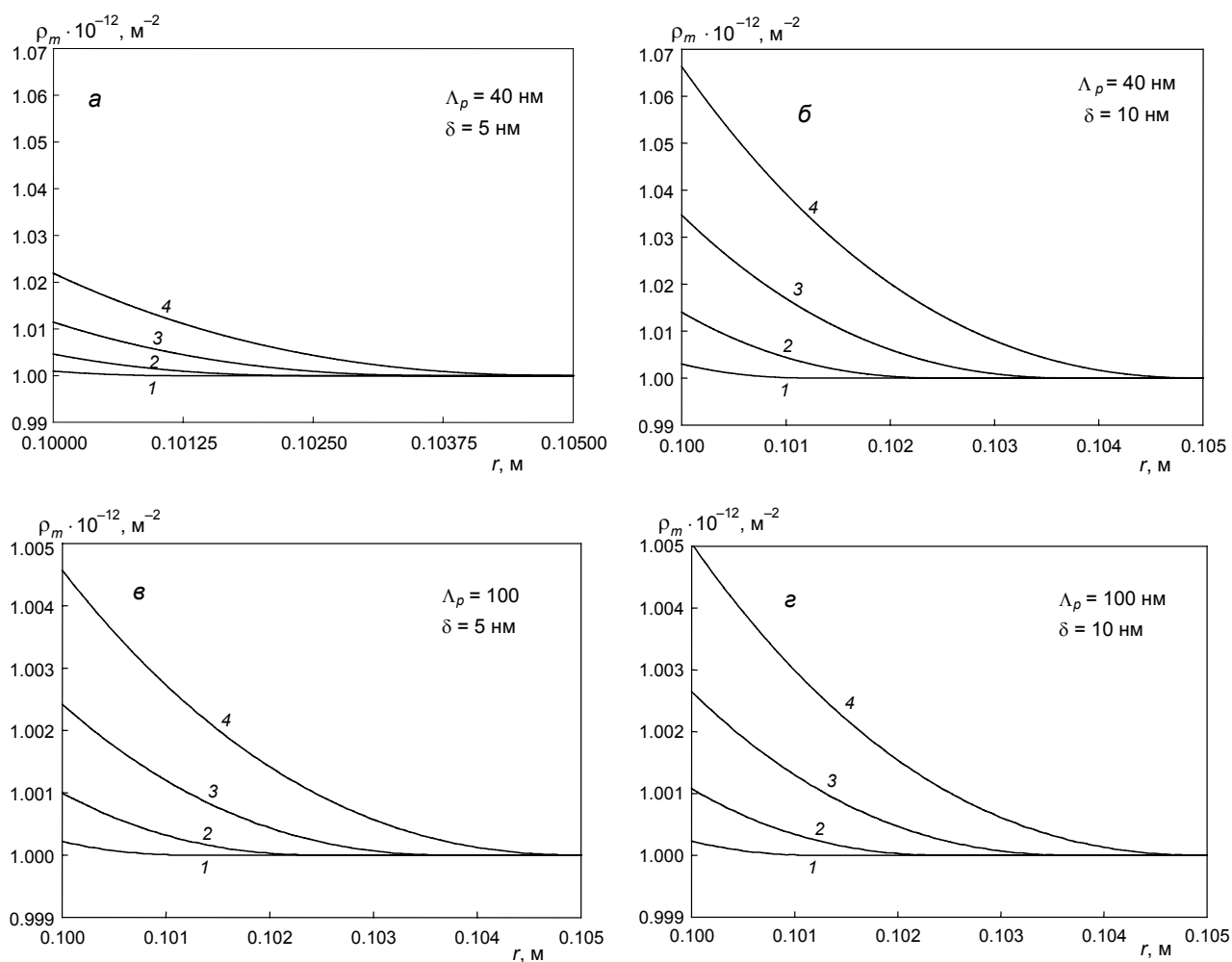


Рис. 2. Распределение плотности сдвигообразующих дислокаций по толщине стенки трубы при разных внутренних давлениях p , МПа: а – кр. 1 – 19.98, кр. 2 – 20.49, кр. 3 – 20.03, кр. 4 – 21.62; б – кр. 1 – 23.73, кр. 2 – 24.76, кр. 3 – 25.84, кр. 4 – 26.98; в – кр. 1 – 7.45, кр. 2 – 7.47, кр. 3 – 7.50, кр. 4 – 7.55; г – кр. 1 – 7.91, кр. 2 – 7.99, кр. 3 – 8.01, кр. 4 – 8.20. Граница упругой и пластической зоны ξ_{pl} : кр. 1 – 0.25, кр. 2 – 0.5, кр. 3 – 0.75, кр. 4 – 1

С увеличением размеров частиц при одном и том же значении ξ_{pl} наблюдается рост плотности сдвигообразующих дислокаций. Этот эффект наиболее заметен для небольших расстояний между частицами Λ_p . С увеличением Λ_p влияние размера частиц на формирование сдвигообразующих дислокаций уменьшается.

При увеличении объемной доли упрочняющих частиц происходит уменьшение плотности сдвигообразующих дислокаций за счёт уменьшения расстояния между частицами Λ_p при одном и том же значении ξ_{pl} .

На рис. 3 представлено распределение плотности призматических дислокационных петель по толщине стенки трубы. В результате приложенного к внутренней стенке трубы давления в ее окрестности происходит генерация дислокационных призматических петель вокруг упрочняющих частиц. По мере приближения к внешней стенке трубы плотность призматических дислокационных петель уменьшается. С увеличением давления p процесс генерации призматических дислокационных петель интенсифицируется: во внутренней области наблюдается рост плотности призматических петель ρ_p . Кроме того, граница области, содержащей призматические дислокационные петли R_{pl} , смещается к внешней стенке.

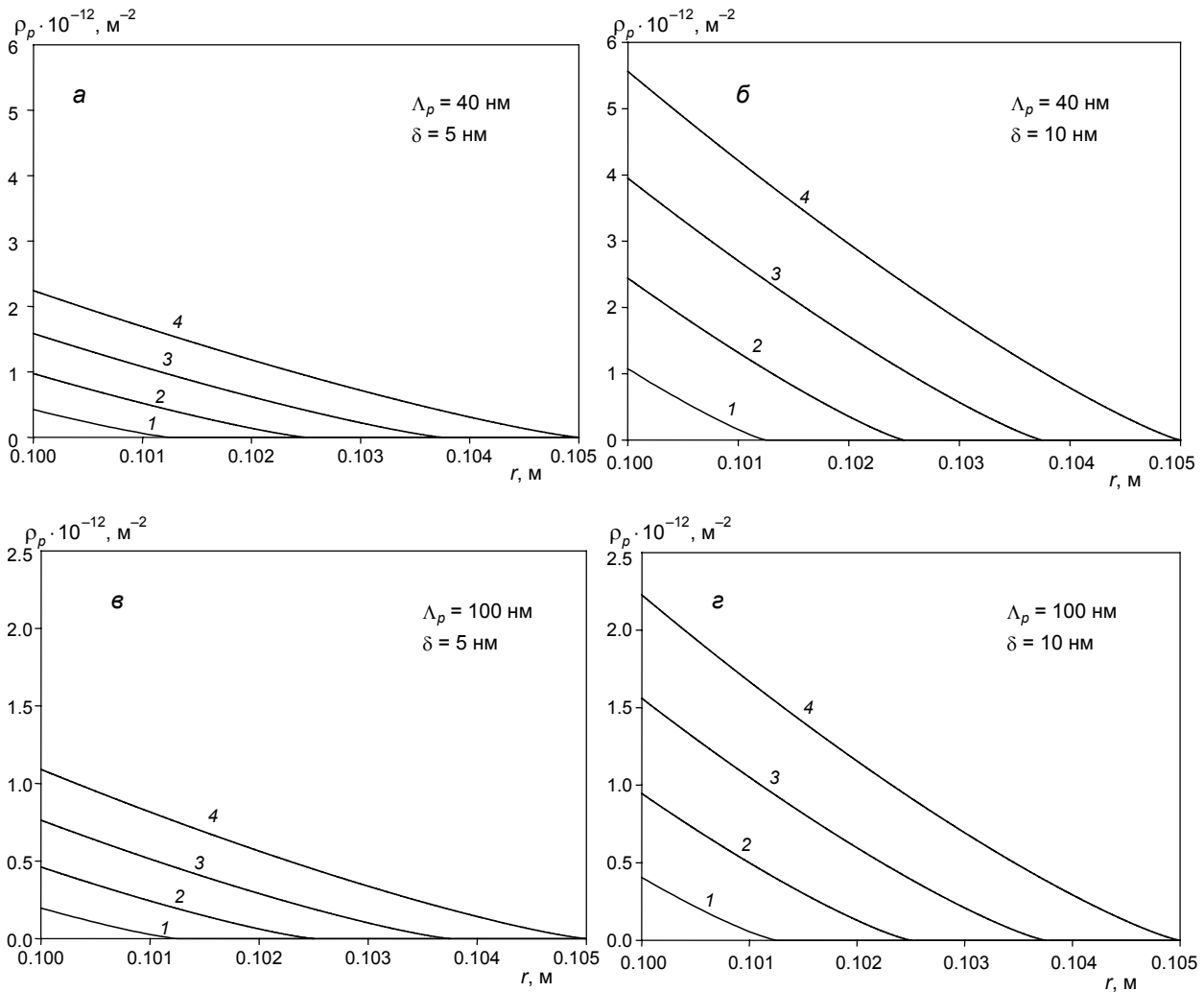


Рис. 3. Распределение плотности дислокаций в призматических дислокационных петлях по толщине стенки трубы при разных внутренних давлениях p , МПа: а – кр. 1 – 19.98, кр. 2 – 20.49, кр. 3 – 20.03, кр. 4 – 21.62; б – кр. 1 – 23.73, кр. 2 – 24.76, кр. 3 – 25.84, кр. 4 – 26.98; в – кр. 1 – 7.45, кр. 2 – 7.47, кр. 3 – 7.50, кр. 4 – 7.55; г – кр. 1 – 7.91, кр. 2 – 7.99, кр. 3 – 8.01, кр. 4 – 8.20. Граница упругой и пластической зоны ξ_{pl} : кр. 1 – 0.25, кр. 2 – 0.5, кр. 3 – 0.75, кр. 4 – 1

С увеличением размеров частиц δ при одном и том же значении ξ_{pl} наблюдается рост плотности дислокаций в призматических петлях ρ_p (рис. 3, а и б, в и г). Аналогичный эффект наблюдается и при уменьшении расстояния между частицами Λ_p (рис. 3, а и в, б и г).

На рис. 4 показаны распределения плотностей элементов дислокационной структуры ρ_p , ρ_m по толщине стенки трубы, рассчитанные для заданного значения Λ_p при одном и том же значении давления p .

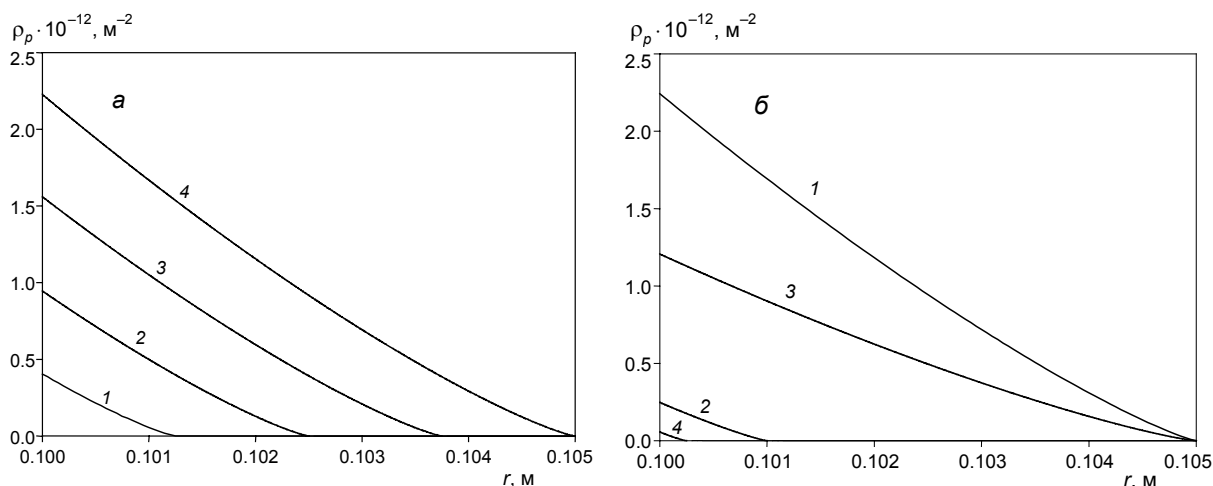


Рис. 4. Распределение плотности сдвигообразующих дислокаций (а) и призматических дислокационных петель (б) по толщине стенки трубы при разных масштабных характеристиках упрочняющей фазы. Размер упрочняющих частиц, нм: кр. 1, 3 – 5, кр. 2, 4 – 10; расстояние между частицами, нм: кр. 1, 2 – 40, кр. 3, 4 – 100; внутреннее давление, МПа: кр. 1, 2 – 21.5, кр. 3, 4 – 7.8

Как видно из рис. 4, увеличение размеров упрочняющих частиц или уменьшение расстояния между ними приводит к увеличению как плотности сдвигообразующих дислокаций ρ_m , так и плотности призматических петель ρ_p . В результате увеличения объёмной доли упрочняющей фазы интенсивность деформации уменьшается, а прочностные характеристики материала увеличиваются.

Заключение

Увеличение генерации сдвигообразующих дислокаций с ростом давления приводит к утолщению области пластической деформации и смещению границы между зоной упругой и пластической деформации материала R_{pl} к внешней стенке трубы. В пластической области трубы начинают формироваться дислокационные призматические петли, которые вносят значительный вклад в общую плотность дислокаций и в упрочнение материала.

С увеличением размеров упрочняющих частиц генерация элементов дислокационной структуры увеличивается, при этом наблюдается рост предела упругого и пластического сопротивления трубы, тем более значительный, чем меньше расстояние между частицами.

Увеличение объёмной доли упрочняющих частиц и связанное с этим уменьшение значений Λ_p повышает сопротивляемость материала пластическим деформациям. В результате этого для того, чтобы стенки трубы подверглись пластическим деформациям, необходимо воздействовать на трубу значительно бóльшим внутренним давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эшби М. Ф. // Физика прочности и пластичности. – М.: Металлургия, 1972. – С. 88–108.
2. Ashby M. F. // Phil. Mag. – 1966. – V. 14. – No. 132. – P. 1157–1178.
3. Ebeling R. and Ashby M. F. // Phil. Mag. – 1966. – V. 13. – No. 124. – P. 805–834.
4. Humphreys F. J. and Martin J. W. // Phil. Mag. – 1967. – V. 16. – No. 143. – P. 927–957.
5. Humphreys F. J. and Hirsch P. B. // Pros. Roy. Soc. Lond. – 1970. – V. A318. – No. 1532. – P. 73–92.
6. Lloyd D. J. and Martin J. W. // Scripta Met. – 1978. – V. 12. – P. 217–221.
7. Brown L. M. and Stobbs W. M. // Phil. Mag. – 1971. – V. 23. – P. 1185–1199.
8. Хирш П. Б., Хэмпфри Ф. Дж. // Физика прочности и пластичности. – М.: Металлургия, 1972. – С. 158–186.
9. Hazzledine P. M. and Hirsch P. B. // Phil. Mag. – 1974. – V. 30. – No. 6. – P. 1331–1351.
10. Humphreys F. J. and Hirsch P. B. // Phil. Mag. – 1978. – V. 34. – P. 373–399.
11. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
12. Humphreys F. J. and Stewart A. T. // Surf. Sci. – 1972. – V. 31. – P. 389–421.
13. Stewart A. T. and Martin J. W. // Acta Met. – 1975. – V. 23 – P. 1–7.
14. Sastry S. M. L. and Ramaswami B. // Phil. Mag. – 1975. – V. 32. – No. 4. – P. 801–813.
15. Ardell A. J. and Pattanaik S. // Phil. Mag. – 1984. – V. A50. – No. 3. – P. 339–360.

16. Ковалевская Т.А., Данейко О.И., Колупаева С.Н., Старенченко В.А. // Известия РАН. Сер. физич. – 2003. – Т. 67. – № 6. – С. 892–896.
17. Ковалевская Т.А., Данейко О.И., Колупаева С.Н. // Деформация и разрушение материалов. – 2006. – № 1. – С. 29–35.
18. Данейко О.И., Ковалевская Т.А., Колупаева С.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 9. – С. 37–40.
19. Кулаева Н.А., Данейко О.И., Ковалевская Т.А., Старенченко В.А. // Вестник Тамбовского университета. Сер. естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 1089–1092.
20. Ковалевская Т.А., Данейко О.И., Кулаева Н.А., Колупаева С.Н. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 3. – С. 52–57.
21. Фахрутдинова Я.Д., Соловьева Ю.В., Валуйская Л.А. и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т. 9. – № 4. – С. 527–533.
22. Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А. // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 2. – С. 35–45.
23. Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А. // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 7–13.
24. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. // Изв. вузов. Физика. – 1982. – Т. 25. – № 6. – С. 56–82.
25. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 182 с.
26. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивости пластической деформации кристаллов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. – 301 с.
27. Попов Л.Е., Ковалевская Т.А., Колупаева С.Н. // Структурно-фазовые состояния и свойства металлических систем. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – С. 135–163.
28. Джонсон К. Численные методы в химии. – М.: Мир, 1983. – 235 с.
29. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности. – М.: Физматлит, 2002. – 416 с.
30. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 286 с.
31. Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. – М.: Наука, 2005. – 394 с.
32. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Чурилин В.С. // Дороги и мосты. – 2017. – № 36. – С. 139–153.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 26.04.17.

² Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Матвиенко Олег Викторович, д.ф.-м.н., профессор каф. теоретической механики ТГАСУ, профессор каф. физической и вычислительной механики НИ ТГУ; e-mail: matvolegv@mail.ru;

Данейко Ольга Ивановна, к.ф.-м.н., доцент каф. теоретической механики ТГАСУ, ст. науч. сотр. НИ ТГУ; e-mail: olya_dan@mail.ru;

Ковалевская Татьяна Андреевна, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. теоретической механики ТГАСУ, ст. науч. сотр. НИ ТГУ, e-mail: takov47@mail.ru.