

## 05 Анализ условий зарождения зернограничных нанопор в субмикроструктурных материалах в процессе интенсивной пластической деформации

© В.Н. Перевезенцев<sup>1,2</sup>, А.С. Пупынин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: pupyinin.as@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 июня 2020 г.

В окончательной редакции 30 июня 2020 г.

Принято к публикации 1 июля 2020 г.

Предложена модель, позволяющая описать зарождение зернограничных нанопор в субмикроструктурных материалах в процессе интенсивной пластической деформации. Проанализировано влияние внутренних полей напряжений от планарных мезодефектов, внешнего гидростатического давления и степени пересыщения материала неравновесными вакансиями деформационного происхождения на скорость зарождения пор.

**Ключевые слова:** субмикроструктурные металлы, границы зерен, мезодефекты, неравновесные вакансии, нанопоры.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.19.50040.18416

Субмикроструктурные (СМК) материалы, полученные методами интенсивной пластической деформации (ИПД), обладают уникальными физико-механическими свойствами [1]. Однако после ИПД часто наблюдается снижение долговечности СМК-материалов в условиях длительного нагружения. В работах Бетехтина и соавторов [2–4] показано, что этот эффект может быть связан с наличием в исходном состоянии в СМК-материалах нанопор, расположенных на границах зерен (ГЗ) и в тройных стыках (ТС) зерен. Согласно [4], в процессе ползучести СМК-материалов при повышенной температуре определенная доля нанопор развивается в микропоры, создавая тем самым „очаги“ разрушения, снижающие долговечность материала. Нанопоры наблюдались после ИПД в Al [5,6], Cu [7,8], Ti [9,10] и других металлах и сплавах. Однако вопрос о причинах зарождения нанопор при ИПД, протекающей в условиях высокого гидростатического давления, препятствующего порообразованию, до сих пор остается дискуссионным.

Целью настоящей работы является анализ возможности зарождения нанопор на ГЗ в СМК-материалах путем агломерации неравновесных вакансий деформационного происхождения в поле внутренних растягивающих напряжений от мезодефектов, накапливающихся на ГЗ в процессе ИПД [11,12].

В процессе ИПД в объеме зерен поликристалла образуется большое количество неравновесных вакансий деформационного происхождения, характеризуемое величиной пересыщения  $S_v = C_{vd}/C_0$ , где  $C_{vd}$  — атомная концентрация деформационных вакансий,  $C_0$  — термодинамически равновесная атомная концентрация решеточных вакансий. Экспериментальные данные показывают, что атомная концентрация неравновесных вакансий в СМК-материалах достигает весьма высоких

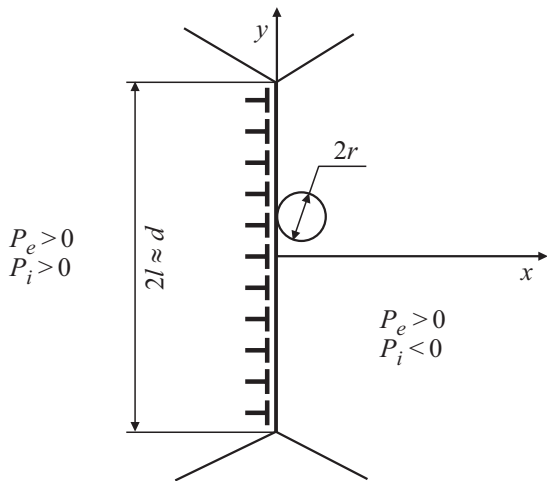
значений:  $C_{vd} \sim 4 \cdot 10^{-4}$  [13]. Следует отметить, что в обычных поли- и монокристаллах такие значения концентрации вакансий характерны для температур, близких к температуре плавления.

Образование пор в условиях высокого пересыщения неравновесными вакансиями, возникающими в процессе радиационного облучения, анализировалось в работе [14]. При рассмотрении зарождения пор в СМК-материалах необходимо учесть то обстоятельство, что процесс ИПД осуществляется в условиях гидростатического давления  $P_e$ , препятствующего образованию пор. Однако в процессе деформирования поликристаллов на ГЗ и их морфологических особенностях (стыках, изломах) возникают характерные мезодефекты: стыковые дисклинации и планарные мезодефекты [11,12]. Отрицательные стыковые дисклинации и планарные мезодефекты создают мощные поля растягивающих напряжений, которые могут компенсировать внешние сжимающие напряжения и тем самым способствовать диффузионному зарождению и росту пор в области ТС и ГЗ. В настоящей работе рассмотрено влияние планарных мезодефектов на зарождение пор на ГЗ. Анализ зарождения пор в ТС в поле дисклинаций будет проведен в последующих публикациях.

Поле гидростатического давления от планарного мезодефекта, представляющего собой однородно распределенные вдоль ГЗ скользящие дислокации (рис. 1), имеет вид [15]:

$$P_i = (1 + \nu)G\omega_l \left[ \arctan\left(\frac{y+l}{x}\right) - \arctan\left(\frac{y-l}{x}\right) \right] / 3\pi(1 - \nu), \quad (1)$$

где  $G$  — модуль сдвига,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $2l$  — длина планарного мезодефекта (далее будем



**Рис. 1.** Схематическое представление зарождения поры на ГЗ, содержащей планарный мезодефект.

считать ее по порядку величины близкой к размеру зерна  $d$ ),  $\omega_t = \rho_b \Delta b_t$ ,  $\rho_b$  — плотность дислокаций ориентационного несоответствия, накапливающихся в границах зерен в процессе пластической деформации,  $\Delta b_t$  — тангенциальная составляющая их вектора Бюргера. Как видно из выражения (1), при  $y < l$  в области  $x > 0$  создается область растяжения, при  $x < 0$  — зона сжатия (рис. 1). В приграничном слое  $0 < x < 2r$  величина  $P_i \approx -(1 + \nu)G\omega_t/3(1 - \nu)$ . При экспериментально наблюдаемой экстремально высокой плотности дислокаций в ГЗ  $\rho_b \approx 2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$  величина  $\omega_t \approx 3 \cdot 10^{-2}$  и, следовательно,  $|P_i| \approx 2 \cdot 10^{-2}G$ .

В области сжатия, где давление  $P_i$  совпадает по знаку с внешним давлением, процесс образования пор подавляется. В то же время в области растяжения внутреннее давление компенсирует внешнее, облегчая тем самым зарождение пор.

Учитывая отмеченное выше, изменение энергии системы при слиянии  $n$  неравновесных вакансий в пору, расположенную на ГЗ (рис. 1), можно записать в виде

$$\Delta F = -n(kT \ln(S_v + 1) - P_{eff}\Omega) - \pi r_b^2 \gamma_b + 4\pi r^2 \gamma_s, \quad (2)$$

где первое слагаемое описывает изменение энергии за счет уменьшения химического потенциала вакансий, второе слагаемое — изменение энергии за счет уменьшения поверхностной энергии ГЗ, третье слагаемое связано с затратами энергии на образование свободной поверхности (СП). Здесь  $P_{eff} = P_e - P_i$ ,  $\gamma_b$  и  $\gamma_s$  — удельные энергии ГЗ и СП соответственно;  $r \approx (3n\Omega/4\pi)^{1/3}$  — радиус поры,  $r_b$  — размер области контакта поры с ГЗ. Величину  $r_b$  можно определить исходя из условия механического равновесия поры с ГЗ:

$$r_b = r \sqrt{1 - (1 - \gamma_b/\gamma_s)^2}. \quad (3)$$

При дальнейших расчетах мы учли то обстоятельство, что при малых размерах зародыша поры энергия ее

СП зависит от размера поры (числа вакансий  $n$ , коагулирующих в пору). Для описания этой зависимости использовалось выражение [16]:

$$\gamma_s = \gamma_{s0}(1 - 0.8/(n + 2)), \quad (4)$$

где  $\gamma_{s0}$  — энергия плоской СП. Критический размер зародыша поры  $r_c$  находился из условия  $\partial\Delta F/\partial n = 0$ . Энергия образования критического зародыша  $\Delta F_c$  определялась путем подстановки величины  $r_c$  в выражение (2).

Скорость зарождения пор в единице объема  $J_c$  находилась из выражения [17]:

$$J_c = Z(N_0 - C_{cav})\beta_c \exp(-\Delta F_c/kT), \quad (5)$$

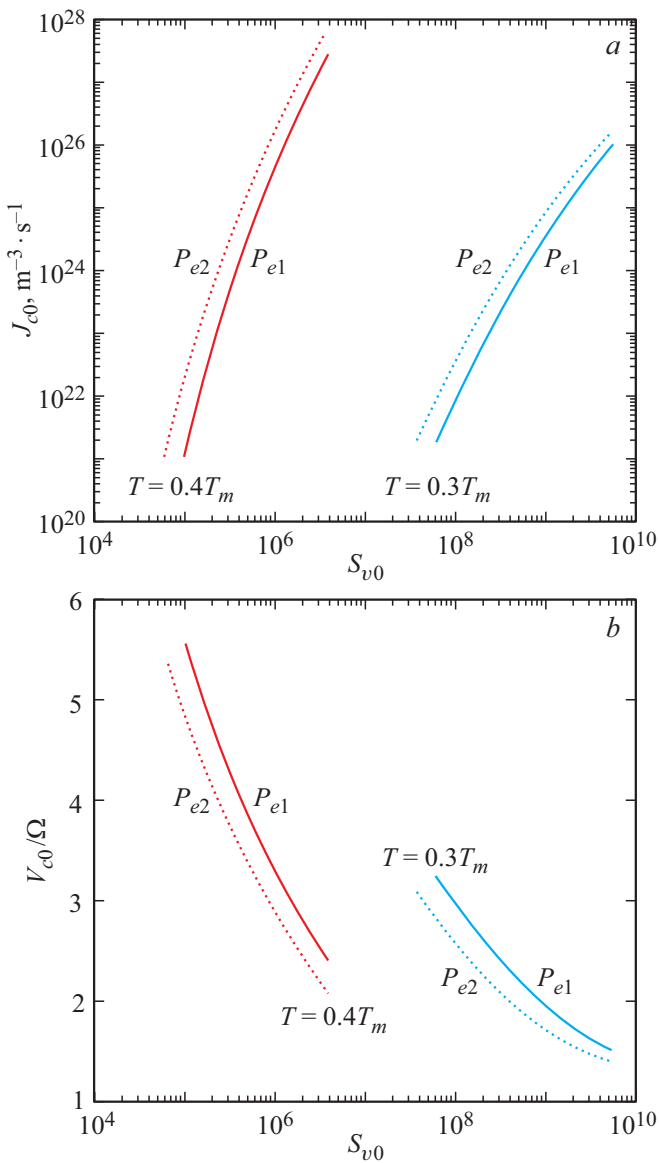
где  $Z \approx 1/20$  — фактор Зельдовича,  $N_0 = 3/\pi r_c d^2$  — максимальная концентрация центров зарождения в ГЗ,  $C_{cav}$  — концентрация зародышей пор,  $\beta_c$  — скорость присоединения вакансий к зародышу критического размера [17],

$$\beta_c = 4\pi D_l (S_v + 1)(r_c + b)^2/b^4. \quad (6)$$

Здесь  $D_l = D_{l0} \exp(-Q_l/kT)$  — коэффициент объемной самодиффузии,  $Q_l$  — энергия активации объемной самодиффузии. Для анализа кинетики эволюции пористости при ИПД систему уравнений (1)–(6) следует дополнить уравнениями, описывающими диффузионный рост пор и изменение пересыщения материала неравновесными вакансиями, связанное с генерацией деформационных вакансий и их стоком в зарождающиеся и растущие поры. В настоящей работе мы ограничились анализом скорости образования зародышевых нанопор. Анализ эволюции объемной доли и размеров пор будет проведен в последующих публикациях.

Численные расчеты скорости зарождения нанопор проводились для модельного алюминиевого СМК-сплава с размером зерна  $d = 10^{-6} \text{ м}$  при температурах деформации  $T_1 = 0.3T_m$  и  $T_2 = 0.4T_m$ , значениях внешнего гидростатического давления  $P_{e1} = 1.5 \cdot 10^{-2}G$  и  $P_{e2} = 10^{-2}G$  и следующих характерных значениях параметров:  $C_{vd} = 4 \cdot 10^{-4}$ ,  $T_m = 933 \text{ К}$ ,  $b = 2.86 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $G = 25 \text{ ГПа}$ ,  $\gamma_{s0} \approx Gb/16$ ,  $\Omega \approx b^3$ ,  $D_{l0} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $Q_l = 17.4kT_m$ . Рис. 2 иллюстрирует поведение скорости зарождения пор  $J_{c0}$  и объема критических зародышей пор  $V_{c0}$  в зависимости от степени пересыщения материала вакансиями при выбранных значениях внешнего давления  $P_e$  и температуры. При проведении расчетов нижняя граница интервала значений пересыщения  $S_{v0}$  выбиралась таким образом, чтобы обеспечить зарождение на каждой границе зерна как минимум одной поры.

Из представленных зависимостей видно, что уменьшение внешнего гидростатического сжатия  $P_e$ , увеличение степени пересыщения  $S_{v0}$  и температуры деформации приводит к существенному увеличению скорости зарождения (рис. 2, а), а также к уменьшению объема критических зародышей пор (рис. 2, б).



**Рис. 2.** Зависимости скорости зарождения пор  $J_{c0}$  (a) и объема критических зародышей пор  $V_{c0}$  (b) от степени пересыщения  $S_{v0}$  при заданных значениях гидростатического давления  $P_e$  и температуры деформации  $T$ .

Проведенный анализ показывает возможность диффузионного зарождения нанопор на ГЗ СМК-материалов. Установлено, что зарождение нанопор в условиях характерных для ИПД высоких значений гидростатических давлений может осуществляться в зонах растягивающих напряжений от планарных мезодефектов, формирующихся в ГЗ при пластической деформации. Условием появления таких нанопор является высокая степень пересыщения материала неравновесными вакансиями деформационного происхождения. Эффективным способом подавления диффузионного зарождения пор при ИПД является повышение внешнего гидростатического давления и понижение температуры деформации.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-08-00867.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Valiev R.Z., Langdon T.G. // Prog. Mater. Sci. 2006. V. 51. N 7. P. 881–981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003
- [2] Бетехтин В.И., Колобов Ю.П., Sklenicka V., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В., Dvorak J., Голосов Е.В., Кардашев Б.К., Кузьменко И.Н. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 1. С. 66–72. <http://journals.ioffe.ru/articles/41253>
- [3] Бетехтин В.И., Sklenicka V., Кадомцев А.Г., Колобов Ю.П., Нарыкова М.В. // ФТТ. 2017. Т. 59. В. 5. С. 935–941. DOI: 10.21883/FTT.2017.05.44383.391
- [4] Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. // ФТТ. 2020. Т. 62. В. 2. С. 267–273. DOI: 10.21883/FTT.2020.02.48878.603
- [5] Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Sklenicka V., Saxl I. // ФТТ. 2007. Т. 49. В. 10. С. 1787–1790. <http://journals.ioffe.ru/articles/3184>
- [6] Бетехтин В.И., Sklenicka V., Saxl I., Кардашев Б.К., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 8. С. 1517–1523. <http://journals.ioffe.ru/articles/1925>
- [7] Sauvage X., Pippan R. // Mater. Sci. Eng. A. 2005. V. 410–411. P. 345–347. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.122
- [8] Ribbe J., Baither D., Schmitz G., Divinski S.V. // Scripta Mater. 2009. V. 61. P. 129–132. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.03.029
- [9] Lapovok R., Tomus D., Mang J., Estrin Y., Lowe T.C. // Acta Mater. 2009. V. 57. N 10. P. 2909–2918. DOI: 10.1016/j.actamat.2009.02.042
- [10] Бетехтин В.И., Колобов Ю.П., Нарыкова М.В., Кардашев Б.К., Голосов Е.В., Кадомцев А.Г. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 11. С. 58–63. <http://journals.ioffe.ru/articles/10459>
- [11] Rybin V.V., Zisman A.A., Zolotarevsky N.Yu. // Acta Met. Mater. 1993. V. 41. N 7. P. 2211–2217. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90390-E
- [12] Кириков С.В., Перевезенцев В.Н., Свирина Ю.В. // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 3. С. 20–25. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32595898>
- [13] Schafner E., Steiner G., Korznikova E., Kerber M., Zehetbauer M.J. // Mater. Sci. Eng. A. 2005. V. 410–411. P. 169–173. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.070
- [14] Powell R.W., Russell K.C. // Rad. Effects. 1972. V. 12. N 1–2. P. 127–131. DOI: 10.1080/00337577208231129
- [15] Perevezentsev V.N., Sarafanov G.F. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2012. V. 30. N 1. P. 73–89. [http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_13012/04\\_perevezentsev.pdf](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_13012/04_perevezentsev.pdf)
- [16] Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 376 с.
- [17] Raj R., Ashby M.F. // Acta Met. 1975. V. 23. N 6. P. 653–666. DOI: 10.1016/0001-6160(75)90047-4