

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACSnumbers: 62.20.F-, 62.25.Mn, 81.05.Rm, 81.20.Ev, 81.40.Lm, 81.40.Vw, 83.10.Gr

Теоретична аналіза динамічного знеміцнення в спечених матеріалах

О. П. Гапонова, Т. П. Говорун

*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

Виконано теоретичну аналізу кінетики знеміцнювальних процесів, що відбуваються в порошковому пористому тілі при деформуванні в області підвищених температур. Одержано визначальні рівняння, що зв'язують параметри деформації та параметри структуроутворення, які характеризують процеси динамічного знеміцнення при деформуванні. Показано лінійні залежності логаритму осевого напруження і накопиченої деформації твердої фази від оберненої температури. Виконано оцінку енергії активації динамічного знеміцнення при одноосьовому стисканні. Показано, що при низьких температурах деформації механізмом знеміцнення є динамічне повернення та полігонізація, а при підвищених температурах — динамічна рекристалізація. Пористість понижуює енергію активації динамічного знеміцнення.

The theoretical analysis of the kinetics of softening processes, which take place in the powder porous body during the deformation at the elevated temperatures, is carried out. The constitutive equations connecting the deformation parameters with parameters of structure formation, which characterize the dynamical softening processes during the deformation process, are obtained. The linear dependences of both the axial-stress logarithm and the accumulated deformation of solid phase as the functions of inverse temperature are established. The estimation of the activation energy of dynamical softening at uniaxial compression is carried out. As determined, the dynamical recovery and polygonization are the softening mechanisms at low deformation temperatures, while dynamical recrystallization has an effect at the elevated temperatures. Porosity decreases the activation energy of dynamical softening.

Выполнен теоретический анализ кинетики разупрочняющих процессов, проходящих в порошковом пористом теле при деформировании в области повышенных температур. Получены определяющие уравнения, связывающие параметры деформации и параметры структурообразования, кото-

рые характеризуют процессы динамического разупрочнения при деформировании. Показана линейная зависимость логарифма осевого напряжения и накопленной деформации твердой фазы от обратной температуры. Выполнена оценка энергии активации динамического разупрочнения при одноосном сжатии. Показано, что при низких температурах деформации механизмом разупрочнения является динамический возврат и полигонизация, а при повышенных температурах — динамическая рекристаллизация. Пористость снижает энергию активации динамического разупрочнения.

Ключові слова: динамічне знеміцнення, одноосьовий стиск, осьове напруження, накопичена деформація, енергія активації, підвищені температури, порошкові пористі тіла.

(Отримано 2 березня 2015 р.; остаточн. варіант — 13 травня 2015 р.)

1. ВСТУП

Одним з найважливіших напрямів дослідження в галузі фізичного матеріалознавства є вивчення механізмів подрібнення зерен, одержання ультрадрібнозернистої структури і наноструктури в металевих матеріалах [1–4]. З'ясування природи цих процесів та їх теоретичний опис набуває в цей час особливої важливості, оскільки від величини зерна залежать фізико-механічні властивості металу, що визначають ресурс роботи готового виробу.

Одним із найбільш ефективних способів виготовлення виробів є оброблення металів тиском. Параметри деформування впливають на структуру. Тому актуальним завданням є дослідження взаємозв'язку параметрів деформування і структуроутворення. Це питання досить повно розкрито в роботах [5, 6] при деформації компактних матеріалів. Показано, що на параметри структуроутворення впливають температура, швидкість і ступінь деформації, які обумовлюють механізм знеміцнювальних процесів [7]. Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що при малих ступенях деформації і низьких температурах пластичність матеріалу обумовлюють динамічне повернення і полігонізація, із зростанням температури і ступеня деформації — динамічна рекристалізація. Збільшення швидкості деформації приводить до зростання опору деформуванню, зниження пластичності внаслідок інтенсифікації процесів зміцнення. Очевидно, в порошковому пористому тілі в твердій фазі можна спостерігати ті ж процеси динамічного знеміцнення, що показано в роботі [8]. Однак, на кінетику і фізику знеміцнювальних процесів має впливати наявність у порошковому тілі фази пористості.

Метою даної роботи є теоретичний аналіз кінетики знеміцнювальних процесів, що відбуваються в порошковому пористому тілі

при деформації в області підвищених температур, і визначення взаємозв'язку параметрів деформування і структуроутворення.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗНЕМІЦНЕННЯ

Виходячи з дислокаційних уявлень, за будь-яких зовнішніх умов пластичне деформування характеризується зміною дислокаційної структури твердої фази пористого тіла, яке обумовлює розвиток двох взаємно врівноважувальних один до одного процесів — зміцнення і знеміцнення. Зміну густини дислокацій при деформації можна записати як [9]:

$$\dot{\rho} = \eta \dot{\epsilon} - k\rho, \quad (1)$$

де ρ — густина дислокацій, k — Больцманнова функція, $\dot{\epsilon}$ — швидкість деформації, η — коефіцієнт, що описує здатність матеріалу твердої фази до накопичення дислокацій при певній швидкості деформації.

Перший член правої частини рівняння (1) описує зміцнення твердої фази і показує збільшення густини дислокацій за одиницю часу зі збільшенням швидкості деформації $\dot{\epsilon}$. Другий член характеризує знеміцнення і описує швидкість зменшення густини дислокацій внаслідок термічно активованих процесів, що може бути описано Больцманновою функцією:

$$l = k_0 \exp(-E/\{kT\}), \quad (2)$$

де k_0 — частотний фактор, що не залежить від температури, E — енергія активації знеміцнювальних процесів, T — абсолютна температура.

При сталій швидкості деформації $\dot{\epsilon}(t) = \zeta = \text{const}$ і крайових умовах $\rho(0) = \rho_0$ рівняння (1) має розв'язок [10]:

$$\rho = \left(\rho_0 - \frac{\eta\zeta}{k} \right) \exp\left(-k \frac{\omega}{\zeta} \right) + \frac{\eta\zeta}{k}, \quad (3)$$

де ω — накопичена деформація, що враховує вплив пористості.

Накопичена деформація твердої фази визначається згідно [11]:

$$\omega = \int_0^{\tau} W d\tau, \quad (4)$$

де W — швидкість зміни накопиченої деформації пористого тіла, τ — час.

Швидкість зміни накопиченої деформації пористого тіла [11]:

$$W = \frac{1}{\sqrt{1-\theta}} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2}, \quad (5)$$

де ψ , φ — функції пористості, e — швидкість зміни об'єму, γ — швидкість зміни форми, θ — пористість.

Функції пористості обчислюються за формулами [11]:

$$\psi = \frac{2(1-\theta)^3}{3\theta}, \quad \varphi = (1-\theta)^2. \quad (6)$$

Виходячи із (4) і (5):

$$\omega = \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{1-\theta}} \sqrt{\varphi \gamma^2 + \psi e^2} d\tau. \quad (7)$$

Для одноосного стиснення швидкість зміни об'єму можна записати як

$$e = e_z + 2e_r, \quad (8)$$

а швидкість зміни форми:

$$\gamma = \sqrt{2/3} |e_z - e_r|. \quad (9)$$

З виразу (8), беручи до уваги, що

$$\frac{e_r}{e_z} = \nu = \frac{r-1}{2+r}, \quad (10)$$

одержуємо:

$$e = (1 + 2\nu)e_z. \quad (11)$$

Кульова компонента тензора напружень та інтенсивність дотичних напружень задаються виразами:

$$p = \sigma_z/3, \quad (12)$$

$$\tau = \sqrt{2/3} |\sigma_z|. \quad (13)$$

Поверхню навантаження порошкового тіла з урахуванням поротворення задамо у вигляді:

$$\alpha(p-a)^2 + \beta\tau^2 = c^2, \quad (14)$$

де α, β, a, c — коефіцієнти, що залежать від пористості [11].

Для визначення зміни розмірів при одноосьовому стисканні, виходячи з умови пластичності (14), з урахуванням виразів (12) і (13) в роботі [11] одержано вираз:

$$r = \frac{1}{3} \frac{\alpha}{\beta} \left(1 - 3 \frac{\alpha}{\sigma_z} \right) = \frac{1}{3} \frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{-6\alpha\beta - \sqrt{c^2(\alpha + 6\beta) - 6\alpha\beta a^2}}{\alpha a - \sqrt{c^2(\alpha + 6\beta) - 6\alpha\beta a^2}} \right]. \quad (15)$$

Вираз для осьового напруження при одноосьовому стисканні має вигляд:

$$\sigma_z = \frac{3\alpha a}{\alpha + 6\beta} - \frac{\sqrt{6} \sqrt{c^2(\alpha + 6\beta) - 6\alpha\beta a^2}}{\alpha + 6\beta}. \quad (16)$$

Тоді зміну пористості і накопиченої деформації при деформуванні можна визначити з виразів:

$$\frac{d\theta}{d\varepsilon_z} = (1 - \theta)(1 - 2\nu), \quad \frac{d\omega}{d\varepsilon_z} = \frac{1}{\sqrt{1 - \theta}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{1}{r^2} \varphi + \psi(1 - 2\nu)\text{sign}(e_z)}. \quad (17)$$

З виразів (16) і (17) можна одержати величину осьового напруження і накопиченої деформації, оскільки праві частини в рівняннях (17) є нелінійними функціями пористості, рішення системи виконується чисельним методом.

Функція (3) становить вираз для згасної зміни густини дислокацій [6]. За умови $\omega \rightarrow \infty$ і $\tau \rightarrow \infty$ величина ρ асимптотично наближається до граничної величини $\eta\zeta/k$. Згідно з (2), за умови $\eta\zeta = \text{const}$, величина $\eta\zeta/k$ залежить від температури деформації і енергії активації термічно активованого процесу знеміцнення.

Виходячи з виразу (3), максимально досяжна густина дислокацій при заданих умовах деформування прагне до величини $\eta\zeta/k$. Аналогічно [7], при одержаному за дану стадію деформування максимальному напруженні течії середню густину дислокацій визначимо як

$$\rho_k = \chi \eta\zeta/k, \quad (18)$$

де χ — коефіцієнт, що знаходиться в межах $0 < \chi < 1$.

Залежність максимальної напруженості течії за задану стадію деформування σ_z від густини дислокацій ρ_k братимемо у вигляді [12]

$$\sigma_z = A \rho_k^n, \quad (19)$$

де A і n — сталі.

З урахуванням (18) маємо:

$$\sigma_z = A(\chi\eta\zeta/k)^n. \quad (20)$$

Після логаритмування, підстановки (2), де Больцманнова функція l відповідає k , і перетворень маємо:

$$\ln \sigma_z = \ln \left[A \left(\chi \frac{\eta\zeta}{k_0} \right)^n \right] + \frac{nE}{RT}. \quad (21)$$

Очевидно, максимальному напруженню течії за дану стадію деформування σ_z відповідає певна накопичена деформація ω_k . Тоді, підставляючи у вираз (3) значення накопиченої деформації та порівнюючи (3) і (8), після перетворень одержуємо:

$$\omega_k = \frac{\zeta}{k} \ln \left[\left(\rho_0 \frac{k}{\eta\zeta - 1} \right) (\chi - 1)^{-1} \right]. \quad (22)$$

З рівняння (22) випливає, що множник $\ln([\rho_0 k / (\eta\zeta - 1)](\chi - 1)^{-1})$, у випадку, якщо процеси зміцнення і знеміцнення зрівноважують один одного при певному напруженні течії, прагне до деякої сталої величини. У зв'язку з цим, швидкість зміни густини дислокацій $\dot{\rho}$ прагне до нуля. З рівняння (1) при сталій швидкості деформації можна одержати:

$$\frac{1}{\rho_k} = \frac{k}{\eta\zeta}. \quad (23)$$

Тоді

$$\ln \left[\left(\rho_0 \frac{k}{\eta\zeta} - 1 \right) (\chi - 1)^{-1} \right] = \ln \left[\left(\frac{\rho_0}{\rho_k} - 1 \right) (\chi - 1)^{-1} \right]. \quad (24)$$

Приймаємо, що густина дислокацій твердої фази до деформації і після неї відрізняються на 1–2 порядки [12], а $\chi \cong 0,8-0,9$, тоді величину (24) можна наближено визначити як $\ln 10 \cong 2,3$.

Вираз (22) перетворюється до вигляду:

$$\omega_k \cong 2,3 \frac{\zeta}{k} \cong 2,3 \frac{\zeta}{k_0} \exp \left(\frac{E}{RT} \right). \quad (25)$$

Після логаритмування —

$$\ln \omega_k = \ln \frac{\zeta}{k_0} - \frac{E}{RT}. \quad (26)$$

Рівняння (21) і (26) є співвідношеннями, що зв'язують основні параметри деформації пористого тіла (σ_z , ω_k , ζ , T) і структурні характеристики матеріалу (η , k , E , ρ_k), які характеризують процеси знеміцнення при деформації в інтервалі підвищених температур. З цих рівнянь випливає лінійний характер залежності накопиченої деформації та відповідного напруження течії від зворотної температури з тангенсом кута нахилу прямої, рівним енергії активації процесу динамічного знеміцнення, що відбувається за тим чи іншим механізмом.

Тангенс кута нахилу функції $\ln \omega_k = f(1/T)$ дорівнює $E/(RT)$, тобто відповідає виразу (26). Тангенс кута нахилу функції $\ln \sigma_z = f(1/T)$ дорівнює $nE/(RT)$, згідно (21). Звідси випливає, що тангенси кутів нахилу цих функцій відрізняються множителем n — величиною, що характеризує можливу максимальну густину дислокацій.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Перевірку адекватності математичного моделю виконували для оцінки енергії активації динамічних процесів знеміцнення при одноосовому стисканні пористих мідно-титанових тіл. Використовували зразки з шихти порошоків міді ПМС-1 і титану VT1-0 з масовою часткою титану 0,5%, пористістю 5 і 10% після спікання при температурі 900–920°C впродовж 3 годин у середовищі генераторного газу. Зразки деформували на випробувальній машині ZD-4 при температурах 100, 300, 400 і 600°C із записом індикаторних діаграм. Швидкість деформації становила $0,01 \text{ с}^{-1}$.

Розрахунок накопиченої деформації виконували за формулою (17), осьового напруження за формулою (16). Будували залежності $\ln \sigma_z - 1/T$ і $\ln \omega_k - 1/T$ (рис. 1). Одержані залежності являють собою прямі лінії, за винятком точок при 400°C, в яких є розриви функцій, обумовлені деформаційним старінням. Прямі лінії складаються з двох гілок — низькотемпературної, що характеризує деформацію при 100–300°C, і високотемпературної, обумовленої деформацією при 400–600°C. Тангенси кута нахилу цих функцій визначають енергії активації динамічного знеміцнення, що відбувається за тим чи іншим механізмом. Ступінь деформації характеризується стадією процесу N .

Низькотемпературна гілка характеризується мінімальною енергією активації (рис. 2, а), значення якої знаходяться в межах 0,2–0,39 еВ при пористості зразків у 5% і 0,12–0,28 еВ — при пористості у 10%, що є результатом динамічного повернення і полігонізації [13].

У високотемпературній області енергія активації зростає на порядок (рис. 2, б), що свідчить про більш інтенсивне знеміцнення. Найбільший приріст енергії активації у високотемпературній обла-

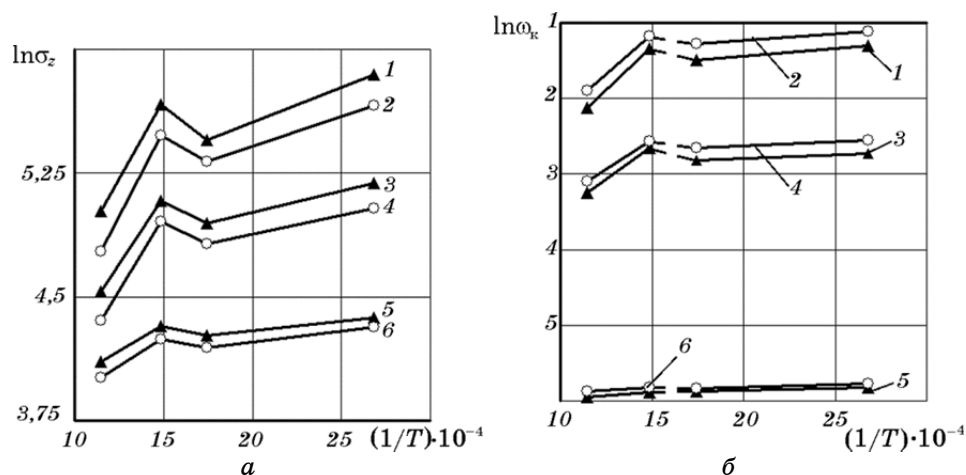


Рис. 1. Залежності $\ln \sigma_z - 1/T$ (а) і $|\ln \omega_k| - 1/T$ (б): \blacktriangle — $\theta_0 = 5\%$; \circ — $\theta_0 = 10\%$; 1, 2 — $N = 1$; 3, 4 — $N = 2$; 5, 6 — $N = 3$.

сті спостерігається на третій стадії і становить 2,3–2,6 еВ. До того ж енергія активації знеміцнення зіставна з енергією активації самодифузії чистої міді, що дорівнює 2,79 еВ [13], тому можна прийняти, що знеміцнення на третій стадії здійснюється за рахунок динамічної рекристалізації.

Слід зазначити, що величина енергії активації процесів знеміцнення залежить від вихідної пористості зразків і має більшу вели-

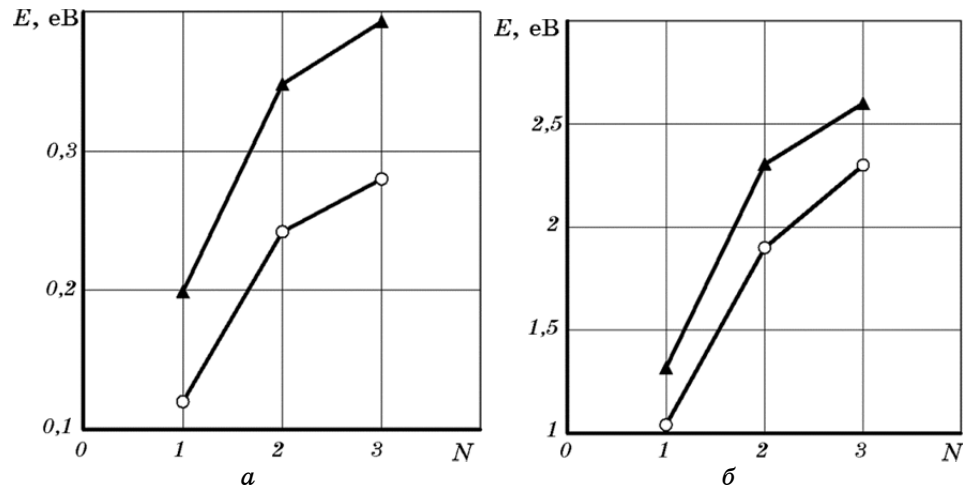


Рис. 2. Зміна енергії активації при знеміцненні: а — низькотемпературна гілка, б — високотемпературна гілка; \blacktriangle — $\theta_0 = 5\%$, \circ — $\theta_0 = 10\%$.

чину при пористості у 5% (рис. 2), ніж при 10%. Наявність пор гальмує розвиток динамічного знеміцнення, що підтверджується експериментальними дослідженнями [14]. Наприклад, при високотемпературній деформації на стадії знеміцнення динамічною рекристалізацією $E = 2,6$ еВ при $\theta_0 = 5\%$ і $E = 2,3$ еВ при $\theta_0 = 10\%$.

Математична модель відповідає експериментальним результатам. В попередніх роботах представлені експериментальні дослідження впливу параметрів деформування на напруження течії і структуроутворення порошкових мідно-титанових матеріалів [14, 15]. За даними фрактографічного, металографічного, електронно-мікроскопічного аналізів, а також визначення фізико-механічних властивостей (питомого електроопору, твердості, міцності та пластичності) ми визначили, що в температурному інтервалі 100–300°C знеміцнення відбувається за рахунок процесів повернення, при 400–600°C — рекристалізації. Зміна величини енергії активації динамічного знеміцнення свідчить про вплив параметрів деформування та пористості на механізм утворення зерен рекристалізації, що підтверджується експериментально. Отже, математична модель повністю підтверджується експериментальними даними. Крім того, модель враховує вплив пористості на величину енергії активації знеміцнювальних процесів, а отже, на інтенсивність знеміцнення твердої фази порошкового тіла.

4. ВИСНОВКИ

Виходячи з дислокаційних уявлень пластичної деформації і теорії пластичності порошкових пористих тіл, виконано теоретичний аналіз кінетики знеміцнювальних процесів, що відбуваються при деформуванні в області підвищених температур. Одержано визначальні рівняння, що зв'язують основні параметри деформації (σ_z , ω_k , ζ , T) і структурні характеристики матеріалу (η , k , E , ρ_k), які можуть бути використані для оцінки механізму динамічного знеміцнення при деформації порошкових пористих тіл в інтервалі підвищених температур.

Виконано перевірку адекватності математичного моделю динамічних процесів знеміцнення при одноосьовому стисканні пористих мідно-титанових тіл. Побудовано залежності $\ln \sigma_z - 1/T$ і $\ln \omega_k - 1/T$, де ω_k — накопичена деформація, σ_z — осьове напруження, T — абсолютна температура. Виявлено лінійний характер цих залежностей. Тангенс кута нахилу функцій відповідає енергії активації динамічних знеміцнювальних процесів. За енергією активації процесів знеміцнення встановлено, що в низькотемпературній області деформування механізмом знеміцнення є динамічне повернення і полігонізація, у високотемпературній області — динамічна рекристалізація. При цьому наявність фази пористості знижує

енергію активації процесів знеміцнення і, отже, можна говорити про їх менш інтенсивний розвиток. Результати теоретичного аналізу відповідають експериментальним даним фрактографічного, металографічного, електронно-мікроскопічного аналізів та визначення фізико-механічних властивостей.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. В. Столяров, *Физика и техника высоких давлений*, **20**, № 2: 105 (2010).
2. В. А. Попов, А. В. Сисанбаев, В. Н. Даниленко, *Перспективные материалы*, **12**: 109 (2011).
3. В. В. Рыбин, *Известия ВУЗов. Физика*, **3**: 7 (1991).
4. Р. З. Валиев, И. В. Александров, *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией* (Москва: Логос: 2000).
5. E. I. Poliak and J. J. Jones, *ISIJ International*, **43**, No. 5: 684 (2003).
6. Л. А. Рябичева, *Известия вузов. Черная металлургия*, **7**: 26 (1998).
7. Л. А. Рябичева, *Поэлементное управление структурообразованием в технологических процессах горячей штамповки* (Луганск: Изд-во ВУГУ: 1996).
8. F. Bardi, M. Cabibbo, E. Evangelista et al., *Mater. Sci. Eng. A*, **339**, Nos. 1–2: 43 (2003).
9. G. Zouhar, *Neue Hütte*, **7**: 418 (1974).
10. В. М. Лещинский, Л. А. Рябичева, *Металловедение и термообработка*, **1**: 9 (1997).
11. М. Б. Штерн, *Порошковая металлургия*, **6**: 34 (1989).
12. Ж. Фридель, *Дислокации* (Москва: Мир: 1967).
13. Г. Дж. Фрост, М. Ф. Эшби, *Карты механизмов деформации* (Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение: 1989).
14. O. Gaponova and L. Ryabicheva, *Proc. International Conference Deformation and Fracture in Structural PM Materials DF PM 2008 (Stará Lesná, High Tatras, Slovak Republic, 2008)*, p. 202.
15. Л. А. Рябичева, О. П. Гапонова, *Деформация и разрушение материалов*, **4**: 9 (2013).

REFERENCES

1. V. V. Stolyarov, *Fizika i Tekhnika Vysokikh Davleniy*, **20**, No. 2: 105 (2010) (in Russian).
2. V. A. Popov, A. V. Sisanbaev, and V. N. Danilenko, *Perspektivnye Materialy*, **12**: 109 (2011) (in Russian).
3. V. V. Rybin, *Izvestiya Vuzov. Fizika*, **3**: 7 (1991) (in Russian).
4. R. Z. Valiev and I. V. Alexandrov, *Nanostrukturnye Materialy, Poluchennye Intensivnoy Plasticheskoy Deformatsiey* (Moscow: Logos: 2000) (in Russian).
5. E. I. Poliak and J. J. Jones, *ISIJ International*, **43**, No. 5: 684 (2003).
6. L. A. Ryabicheva, *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*, **7**: 26 (1998) (in Russian).

7. L. A. Ryabicheva, *Poelementnoe Upravlenie Strukturoobrazovaniem v Tekhnologicheskikh Protsessakh Goryachey Shtampovki* (Lugansk: Izd. VUGU: 1996) (in Russian).
8. F. Bardi, M. Cabibbo, E. Evangelista et al., *Mater. Sci. Eng. A*, **339**, Nos. 1–2: 43 (2003).
9. G. Zouhar, *Neue Hütte*, **7**: 418 (1974).
10. V. M. Leshchynski and L. A. Ryabicheva, *Metallovedenie i Termoobrabotka*, **1**: 9 (1997) (in Russian).
11. M. B. Stern, *Poroshkovaya Metallurgiya*, **6**: 34 (1989) (in Russian).
12. J. Friedel, *Dislokatsii* (Moscow: Mir: 1967) (Russian translation).
13. H. G. Frost and M. F. Ashby, *Karty Mekhanizmov Deformatsii* (Chelyabinsk: Metallurgiya, Chelyabinskoe Otdelenie: 1989) (in Russian).
14. O. Gaponova and L. Ryabicheva, *Proc. International Conference Deformation and Fracture in Structural PM Materials DF PM 2008 (Stará Lesná, High Tatras, Slovak Republic, 2008)*, p. 202.
15. L. A. Ryabicheva and O. P. Gaponova, *Deformatsiya i Razrushenie Materialov*, **4**: 9 (2013) (in Russian).