

УДК 669.295 : 669.76 : 621.982.45

РОЗПОДІЛ МІКРОПОШКОДЖЕНЬ ЛИСТІВ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ St1.03 12 ПІД ЧАС РОЗТЯГУ З РІЗНИМИ ШВИДКОСТЯМИ

О. Р. ГОХМАН¹, Н. А. ВОЛЧОК¹, Д. ФАССМАНН²

¹ Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К. Д. Ушинського, Одеса;

² Інститут матеріалознавства Ганноверського університету ім. Г. Ф. Лейбніца, Гарбсен, Німеччина

Вивчено вплив швидкості деформації розтягом на анізотропію модуля Юнга, границі текучості і коефіцієнта пошкодження листів низьковуглецевої сталі St1.03 12 (0,06% С, до 0,35 Мп, до 0,40 Si, ~0,025% S і Р). Встановлено, що з її підвищенням від 0,0017 до 5 mm/s відбуваються текстурні перетворення, знижується модуль Юнга, а також зі зменшенням анізотропії пошкоджень листів збільшуються границя текучості і коефіцієнт пошкодження.

Ключові слова: розтяг, швидкість навантаження, модуль Юнга, границя текучості, анізотропія, текстура, коефіцієнт пошкодження.

Приховане руйнування тіла супроводжується появою і розвитком розсіяного поля мікрodefektів (мікротріщин – за пружної деформації; дислокацій – за пластичної; мікропор – за повзучості; поверхневих мікротріщин – за втоми) [1]. При цьому ефективна площа елемента $dS^*(\vec{n})$ (\vec{n} – нормаль до площини dS^*) уявного перерізу тіла, що передає навантаження від однієї його частини до іншої, через розподіл у ньому мікрodefektів буде менша, ніж цього ж елемента $dS(\vec{n})$, коли не

враховувати характер пошкоджень. Відношення цих площ $D(\vec{n}) = \frac{dS^*(\vec{n})}{dS(\vec{n})}$ нази-

вають коефіцієнтом пошкодження. Строго кажучи, величину D необхідно розраховувати за результатами фрактографічних досліджень. Проте вони трудомісткі, тому використовують непрямі методи: за змінами фізичних і механічних властивостей, модуля Юнга, питомого електроопору, границі текучості тощо [2, 3]. За модулем Юнга матеріалу в пошкодженому (E_D) і непошкодженому (E_0) станах вдається його визначити найточніше [3]. Але оскільки модуль Юнга – обернена величина до компоненти тензора податливості s_{1111} [4], яка залежить від напрямку виміру в текстурованих об'єктах, то тут слід очікувати анізотропії коефіцієнта D , особливо для листових матеріалів [5].

Мета дослідження – вивчити вплив швидкості деформації розтягом на коефіцієнт D в головних напрямках листів сталі St1.03 12 (0,06% С, до 0,35% Мп, до 0,40% Si, ~0,025% S і Р; український аналог – сталь 08).

Випробування і результати. Досліджували сталеві листи завтовшки 0,95 mm після відпалу в лабораторній печі (600°C в атмосфері аргону, витримка 1 h). З них вирізали по три партії зразків для випробувань у напрямі вальцювання (НВ) і поперечному (ПН). Довжина робочої частини 50 mm, ширина 12,5 mm. Зразки розтягували зі швидкостями 0,0017; 0,017; 1; 2 і 5 mm/s на розривній машині “Zwick Z100 (100 kN)” з гарантованою похибкою до 0,5%. Після деформації до 10% одну

партію зразків розрізали у зоні деформації і досліджували переріз методом зворотної електронної дифракції [6], а також будували прямі полюсні фігури (ППФ) для площини {111}. Використовували електронний мікроскоп LEO 1455 VP за пришвидшувальної напруги 20 kV. Для поліпшення результатів ППФ будували для десяти різних точок площини листа, які потім усереднювали для нормально-го і поперечного до неї напрямів. Значення E_0 розраховували за даними комп'ютерної обробки кривих, використовуючи програмне забезпечення. Для визначення модуля E_D зразки другої партії розвантажували після досягнення напруги 175 МПа згідно з відомими рекомендаціями [3], щоб вибрати оптимальну область навантажень: $0,15 \frac{F_{\max}}{S} < \frac{F}{S} < 0,85 \frac{F_{\max}}{S}$, де F – навантаження, а S – площа поперечного перерізу зразка в зоні деформації. Зразки третьої партії розтягували до руйнування.

Побудували (рис. 1) криві розтягу листів сталі в НВ і ПН для різних швидкостей деформації, а також розраховали (табл. 1) середні значення модуля Юнга (E_0) і границі текучості ($\sigma_{0,2}$) для всіх партій зразків.

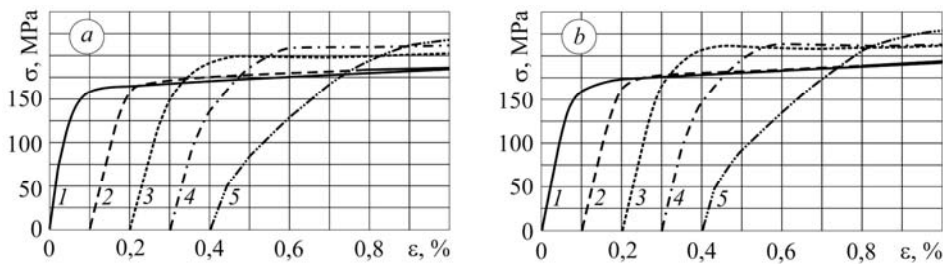


Рис. 1. Криві розтягу листів сталі St1.03 12 в НВ (а) і ПН (б) зі швидкостями 0,0017 mm/s (крива 1); 0,017 (2); 1 (3); 2 (4) і 5 mm/s (крива 5). Криві зсунуті вздовж осі абсцис; σ – напруження; ε – деформація.

Fig. 1. Curves of St1.03 12 steel sheets extension in rolling direction (RD) (a) and transverse direction (TD) (b) with rates 0.0017 mm/s (curve 1); 0.017 (2); 1 (3); 2 (4) and 5 mm/s (curve 5). The curves are displaced along abscissa axis; σ – stress; ε – deformation.

Таблиця 1. Значення модуля Юнга E_0 (GPa) і границі текучості $\sigma_{0,2}$ (MPa) листів сталі St1.03 12 за розтягу з різними швидкостями

Напрямок вимірювання	Швидкість деформації, mm/s									
	0,0017		0,017		1		2		5	
	E_0	$\sigma_{0,2}$	E_0	$\sigma_{0,2}$	E_0	$\sigma_{0,2}$	E_0	$\sigma_{0,2}$	E_0	$\sigma_{0,2}$
НВ	198,1	174,2	179,3	178,1	162,2	205,0	191,9	213,8	122,4	189,8
ПН	216,3	181,1	189,8	186,2	197,8	215,9	203,3	222,1	148,9	191,0

Виявили (рис. 1 і табл. 1), що механічні властивості листів істотно залежать від швидкості деформації (рис. 2). Зокрема, за швидкості 0,0017 mm/s модуль Юнга знаходиться в межах табличних значень для таких матеріалів [7], за 1...2 mm/s зростає до 122,4 і 148,9 GPa, а за 5 mm/s зменшується в обох напрямках, але інтенсивніше у НВ.

Значення $\sigma_{0,2}$ в НВ нижче, ніж у ПН, за швидкості деформації 0,0017 mm/s, а з її збільшенням ця різниця дещо зростає і зберігається до швидкості ~2 mm/s. За швидкості 5 mm/s вона зменшується і значення $\sigma_{0,2}$ в обох напрямках збігаються. З підвищенням швидкості деформації від 0,017 до 2 mm/s границя текучості спер-

шу збільшується, а далі зменшується. Найвищі її значення зафіксовано за швидкості 1...2 mm/s.

Коефіцієнт пошкодження D розраховували за формулою Леметре [3] $D = (E_0 - E_D)/E_0$ і побудували (рис. 3) криві його зміни у НВ і ПН для різних швидкостей деформації. За малих швидкостей він змінюється мало: 0,015...0,025 для обох напрямків. З її збільшенням до 2 mm/s істотно зростає аж до швидкості 5 mm/s. При цьому в НВ залишається більшим, ніж у ПН, що свідчить про його анізотропію. Виявлено [8], що зміну пошкодження простих плоских форм можна задовільно апроксимувати тензорами четвертого рангу.

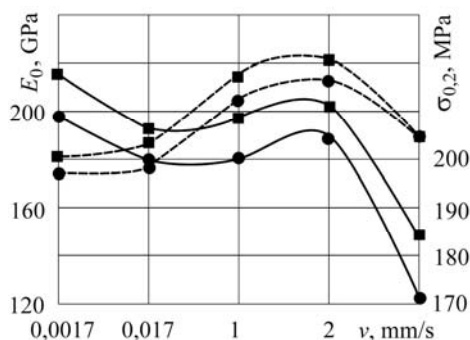


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Залежність модуля Юнга E_0 (суцільні лінії) і границі текучості $\sigma_{0,2}$ (штрихові) від швидкості деформації ν листів сталі St1.03 12: ● – НВ; ■ – ПН.

Fig. 2. Change of Young's modulus, E_0 , (solid lines) and yield stress, $\sigma_{0,2}$, (dashed) in dependence on deformation rate ν of St1.03 12 steel: ● – RD; ■ – TD.

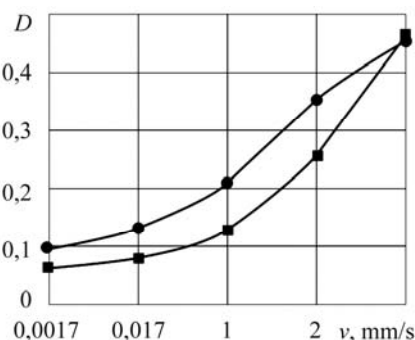


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залежність коефіцієнта пошкодження D від швидкості деформації ν листів сталі St1.03 12: ● – НВ; ■ – ПН.

Fig. 3. Change of the damage coefficient, D , on the rate of deformation rate, ν , in St1.03 12 steel sheets: ● – RD; ■ – TD.

Пресовані листи кубічних і гексагональних металів, виготовлені різними способами вальцювання, мають орторомбічну симетрію анізотропії фізичних і механічних властивостей, а також розподілу полюсної густини на полюсних фігурах, тому їх можна розглядати як орторомбічні квазімонокристали до вказаних характеристик. Встановлюючи зв'язок між орієнтацією кристалів в листах і анізотропією їх тензорних властивостей, лист розглядали [9] як орторомбічний "квазімонокристал". Аналогічно, вважаючи лист квазімонокристалом орторомбічної симетрії, анізотропію пошкодження в його площині, обумовлену кристалографічною текстурою, як і будь-якої іншої властивості четвертої тензорної розмірності, можна описати виразом [10]

$$D(\varphi) = d_1 + k\psi(\varphi),$$

де d_1 і k – характеристики пошкодження монокристала; $\psi(\varphi) = 1 - (I_1 \cos^4 \varphi + I_2 \sin^4 \varphi + 1,5 I_3 \sin^2 2\varphi)$ – функція анізотропії листа; I_i – інтегральні характеристики текстури (IXТ), що є комбінаціями напрямних косинусів системи координат кристала до системи координат листа, усереднені за усіма можливими орієнтаціями кристалів (кут φ відраховують від НВ). Ці характеристики можна знайти з ППФ від ізотропних площин [11, 12].

Наведено (рис. 4) ПФ від системи кристалографічних площин $\{111\}$ поперечного перерізу, перпендикулярного НВ, і ідеальні орієнтування, що описують текстуру початкових листів сталі і її зразків, деформованих зі швидкістю 0,0017 і

5 mm/s, отримані методом зворотної дифракції електронів [6]. Рівні однакової інтенсивності наведено за десятибальною шкалою.

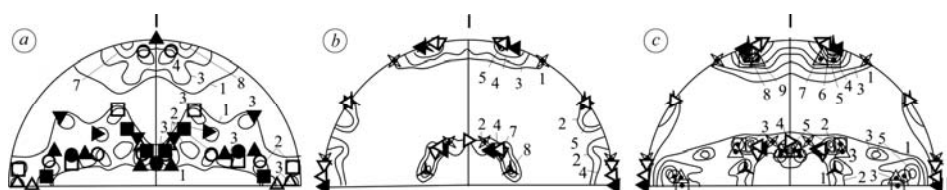


Рис. 4. Поліусні фігури $\{111\}$ у перерізі листів сталі St1.0312 у вихідному стані (a) і деформованих розтягом (b) зі швидкістю 0,0017 (b) і 5 mm/s (c), а також і відповідні їм ідеальні орієнтації; I – нормальний до площини листів напрямок; II – поперечний до напрямку вальцювання: \square – (5 2 2) $[4\bar{5}\bar{5}]$; \circ – (1 3 5) $[1\ 0\ 8\ 7]$; \triangle – (6 8 1) $[1\ \bar{1}\ 2]$; \blacksquare – (7 12 3) $[\bar{3}\ 3\ \bar{5}]$; \bullet – (1 1 2) $[1\ 1\ \bar{1}]$; \blacktriangle – (1 2 3) $[1\ 1\ \bar{1}]$; \blacktriangledown – (0 1 2) $[1\ 0\ 0]$; \blacktriangleright – (0 0 1) $[1\ 0\ 0]$; \blacktriangleleft – (0 1 1) $[3\bar{5}\bar{5}]$; ∇ – (0 1 1) $[2\ 1\ \bar{1}]$; \triangleright – (0 1 1) $[1\ 1\ \bar{1}]$; \triangleleft – (0 1 1) $[5\bar{3}\bar{3}]$; \otimes – (0 1 1) $[3\bar{1}\bar{1}]$; \blacktriangleup – (0 1 1) $[1\ 2\ \bar{2}]$; \odot – (1 3 4) $[8\bar{4}\bar{5}]$; \blacktriangle – (1 3 5) $[5\bar{3}\bar{3}]$; \blacksquare – (1 3 5) $[2\bar{1}\bar{1}]$.

Fig. 4. Pole figures $\{111\}$ in the cross section of St1.0312 steel sheets in the initial state (a) and after deformation by tension (b) with 0.0017 (b) and 5 mm/s (c) rates and ideal orientations corresponding to them; I – normal to the sheet plane direction; II – transverse to the rolling direction: \square – (5 2 2) $[4\bar{5}\bar{5}]$; \circ – (1 3 5) $[1\ 0\ 8\ 7]$; \triangle – (6 8 1) $[1\ \bar{1}\ 2]$; \blacksquare – (7 12 3) $[\bar{3}\ 3\ \bar{5}]$; \bullet – (1 1 2) $[1\ 1\ \bar{1}]$; \blacktriangle – (1 2 3) $[1\ 1\ \bar{1}]$; \blacktriangledown – (0 1 2) $[1\ 0\ 0]$; \blacktriangleright – (0 0 1) $[1\ 0\ 0]$; \blacktriangleleft – (0 1 1) $[3\bar{5}\bar{5}]$; ∇ – (0 1 1) $[2\ 1\ \bar{1}]$; \triangleright – (0 1 1) $[1\ 1\ \bar{1}]$; \triangleleft – (0 1 1) $[5\bar{3}\bar{3}]$; \otimes – (0 1 1) $[3\bar{1}\bar{1}]$; \blacktriangleup – (0 1 1) $[1\ 2\ \bar{2}]$; \odot – (1 3 4) $[8\bar{4}\bar{5}]$; \blacktriangle – (1 3 5) $[5\bar{3}\bar{3}]$; \blacksquare – (1 3 5) $[2\bar{1}\bar{1}]$.

З порівняння ПФ видно, що кінцева текстура розтягування зразків істотно залежить від швидкості деформації. У початковому стані області підвищеної полюсної густини займають велику частину ПФ. Після деформації зі швидкістю 0,0017 mm/s вони частково стягуються до її центра, утворюючи кільцеву зону (текстуру кільцевого типу), а частково концентруються на периферії у НВ. Зі збільшенням швидкості деформації до 2 і 5 mm/s центральна частина ПФ розтягується в ПН, як під час холодного вальцювання. Якщо текстуру початкових листів визначає набір орієнтувань $\{522\}\langle 455\rangle$, $\{135\}\langle 1087\rangle$, $\{001\}\langle 100\rangle$, то деформованих розтягом зразків зі швидкістю (0,0017 mm/s) – орієнтування $\{001\}\langle UVW\rangle$. Для зразків, деформованих зі швидкістю більше 2 mm/s, до вказаних додаються орієнтування $\{134\}\langle 845\rangle$, $\{135\}\langle 533\rangle$, $\{135\}\langle 211\rangle$.

ІХТ розраховали за результатами розподілу густини полюсів $\langle 111\rangle$ на сфері проєкцій, використовуючи відомі формули [11, 12]. Враховуючи експериментальні криві розтягу в площині листів для НВ і ПН, ІХТ в поперечному перерізі перераховали для площини листів, користуючись співвідношеннями характеристик текстури для перерізів у двох взаємно перпендикулярних площинах. Для деформованих розтягом зразків значення ІХТ наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Інтегральні характеристики текстури в площині листів сталі St1.03 12 після деформації розтягом з різною швидкістю

ІХТ	Швидкість деформації, mm/s				
	0,0017	0,017	1	2	5
I_1	0,4867	0,4871	0,4875	0,4868	0,4889
I_2	0,4864	0,4869	0,4867	0,4866	0,4879
I_3	0,1620	0,1621	0,1622	0,1624	0,1628

За отриманими ІХТ і коефіцієнтами пошкодження у НВ і ПН розрахували коефіцієнти d_1 і k для монокристалів сталі після розтягу з різними швидкостями: $d_1 = (-81,803; -183,82; -82,12; -361,16; 10,93)$ і $k = (42,08; 94,41; 42,27; 185,63; -5,21)$. Далі за наведеною формулою будували криві анізотропії $D(\varphi)$ (див. рис. 3).

Виявили (рис. 5), що від швидкості деформації істотно залежать не лише значення D у головних напрямках листів сталі, але і характер його анізотропії в площині листів. За малих швидкостей максимуму він досягає у НВ, а мінімуму – у НВ ($\pm 45-50^\circ$). За швидкостей більше 1 mm/s характер кривих $D(\varphi)$ змінюється і тепер мінімуму коефіцієнт D досягає у НВ. За швидкості ~ 5 mm/s зменшується і анізотропія пошкодження.

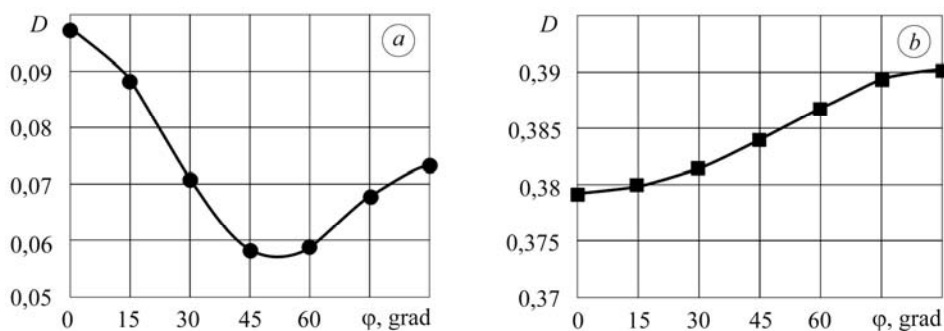


Рис. 5. Анізотропія коефіцієнта пошкодження D у площині листів сталі St1.0312, деформованих розтягом зі швидкістю 0,017 (а) і 5 mm/s (б). φ – кут між напрямками вимірювання і вальцювання.

Fig. 5. Damage coefficient, D , anisotropy in the plane of St1.0312 steel sheets, deformed by tension with the rates 0.017 (a) and 5 mm/s (b). φ – the angle between the directions of measuring and rolling.

Якщо елементом мікроефектів, що виникають за розтягу, вважати деяку мікропору [13–15], то на основі отриманих результатів можна припустити, що вона росте неоднаково в НВ і ПН, і форма її не обов'язково сферична, а близька до еліпсоїда. Тому ефективна площа, що передає навантаження від однієї частини тіла до іншої, зменшуватиметься по-різному для різних перерізів листа. Зі збільшенням швидкості деформації змінюється не лише геометрія мікроефекту, але і його орієнтація. Такому уявленню відповідає і поведінка границі текучості листів. З наближенням швидкостей деформації до деякої критичної (у нас 2 mm/s) границя $\sigma_{0,2}$ росте в обох напрямках, як за звичайного деформаційного зміцнення. За швидкості, коли мікроефекти мають характер мікропорожнеч, метал знеміцнюється, що призводить до її падіння.

ВИСНОВКИ

Коефіцієнт пошкодження листів низьковуглецевої сталі St1.03 12, розрахований за зміною пружних властивостей, росте зі збільшенням швидкості деформації у напрямі вальцювання і поперечному: повільно – за малих швидкостей і досить швидко – за $\sim 2...5$ mm/s.

Під час деформації розтягом зі швидкостями 0,0017...2 mm/s листам властива анізотропія пошкодження, яка зменшується за швидкості ~ 5 mm/s. Мінімального значення коефіцієнт пошкодження набуває за швидкостей до 2 mm/s у НВ ($\pm 45...50^\circ$), за більших швидкостей характер анізотропії змінюється. За швидкості ~ 5 mm/s листи стають мало анізотропними відносно пошкодження.

Границя текучості зі збільшенням швидкості розтягу зростає, а після досягнення деякого значення за швидкості ~ 2 mm/s падає. При цьому листи стають мало анізотропними.

З підвищенням швидкості розтягу текстура рекристалізації відпалених листів переходить у кільцеву типу $\langle 110 \rangle$, і далі – в складну, яку описує набір орієнтувань $\{011\}\langle UVW \rangle + \{134\}\langle 845 \rangle, \{135\}\langle 533 \rangle, \{135\}\langle 211 \rangle$.

РЕЗЮМЕ. Изучено влияние скорости деформации растяжением на анизотропию модуля Юнга, границы текучести и коэффициента повреждения листов низкоуглеродистой стали St1.03 12 (0,06% C, до 0,35 Mn, до 0,40 Si, ~0,025% S и P). Установлено, что с увеличением скорости деформации от 0,0017 до 5 mm/s происходят текстурные превращения, уменьшается модуль Юнга, а также с падением степени анизотропии листов увеличиваются граница текучести и коэффициент повреждения.

SUMMARY. The influence of the tensile deformation rate on anisotropy of the Young's modulus, yield stress and damage coefficient of low-carbon St1.03 12 (0.06% C, to 0.35 Mn, to 0.40 Si, ~0.025% S and P) steel is studied. It is established that with deformation rate growth from 0.0017 to 5 mm/s the texture transformations occur, Young's modulus decreases, yield stress increases and damage coefficient grows with decrease of the sheet anisotropy.

Автори вдячні фонду досліджень Німеччини DFG за фінансову підтримку регіонального дослідницького центру SBF/TR 73.

1. *Maugin G. A.* The Thermomechanic soft Plasticity and Fracture. – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – 350 p.
2. *Simo J. C. and Ju J. W.* Strain-and stress-based continuum damage models-I. Formulation // *Int. J. Solids Struct.* – 1987. – **23**, № 7. – P. 821–840.
3. *Lemaitre J.* A Course on Damage Mechanics. – Berlin: Springer-Verlag, 1992. – 210 p.
4. *Най Дж.* Физические свойства кристаллов. – М.: Иностран. лит., 1960. – 385 с.
5. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И.* Кинематика разрушения листовой аустенитной стали на заключительной стадии деформирования // *Проблемы прочности.* – 1989. – № 3. – С. 16–21.
6. *Randle V.* Introduction to Texture Analysis. Macrotecture, Microtexture and Orientation Mapping. – London; New York; Washington: CRC Press LLC, 2000. – 409 p.
7. *Ривлин Ю. И., Коротков М. А., Чернобыльский В. Н.* Металлы и их заменители: Справ. – М.: Металлургия, 1973. – 439 с.
8. *Lubarda V. A.* Damage tensors and crack density distribution // *Inst. J. Solids Struct.* – 1993. – **30**, № 20. – P. 2859–2877.
9. *Bunge H. J.* Mathematische Methoden der Texturanalyse. – Berlin: Akademie-Verlag, 1969. – 330 p.
10. *Брюханов А. А., Гохман А. Р., Сологуб Н. И.* Распределение плотности полюсов изотропной плоскости кубического кристалла и анизотропия упругих свойств текстурованных листов аустенитной стали 12X18H10T // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 1988. – № 4. – С. 58–61.
11. *Гохман А. Р., Жуковский В. К.* Зависимость физико-механических свойств конструкционных материалов электронной техники от текстуры // *Изв. вузов РФ. Материалы электронной. техники.* – 2005. – № 1. – С. 70–74.
12. *О методе сертификации листового проката по характеристикам текстуры / А. А. Брюханов, А. Р. Гохман, М. Родман и др.* // *Производство проката.* – 2011. – № 2. – С. 32–39.
13. *Панасюк В. В.* Механика разрушения и прочность материалов. – К.: Наук. думка, 1988–1990. – Т. 1. – 488 с.
14. *Мураками С., Радаев Ю. Н.* Математическая модель анизотропного состояния поврежденности // *Изв. РАН. Механика твердого тела.* – 1996. – № 4. – С. 93–110.
15. *Neuber H.* Uber die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen // *Konstruktion.* – 1968. – **20**. – P. 245–251.

Одержано 07.12.2012