

УДК 539.382.2: 669-1

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.270421.55.741

ВПЛИВ ГРАНИЦЬ ЗЕРЕН НА РОЗВИТОК ДЕФОРМАЦІЇ В НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЯХ

СЛУПСЬКА Ю. С.¹, *асп.*,
ДАДІВЕРІНА Л. М.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ЧАШИН Д. Ю.³, *канд. техн. наук, доц.*,
ТОРОПЧЕНОВ Г. О.⁴, *маг.*,
ПІКО М. О.⁵, *маг.*

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-82, e-mail: slupska.yuliia@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

^{2*} Кафедра планування та організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-66, e-mail: dadiverina.liliia@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4498-2184

³ Кафедра планування та організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-66, e-mail: chashyn.dmytro@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0986-9349

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(056) 756-34-82, e-mail: g.toropchenov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0954-9844

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(056) 756-34-82, e-mail: Pyko.m@icloud.com, ORCID ID: 0000-0002-3867-5391

Анотація. Постановка проблеми. Більшість сучасних матеріалів мають полікристалічну структуру. Найважливіша їх властивість – механічна міцність – визначається дефектною структурою кристалів. Під дефектною структурою слід розуміти не тільки концентрацію і розподіл точкових дефектів, дислокацій, дефектів упаковки, а й границі зерен. Від границь зерен залежить розвиток таких процесів як дифузія, рекристалізація, пластичність, повзучість, крихкість, виникнення тріщини і корозійна стійкість. Ступінь цього впливу прямо пов'язаний з особливостями атомної структури границь і їх взаємодією з іншими дефектами. Тому дослідження впливу міжфазних та внутрішньофазних границь на розвиток пластичної деформації в сучасних матеріалах постає актуальним завданням. **Мета статті** – дослідження впливу типу полікристалічних границь на кінетику розповсюдження пластичної деформації в низьковуглецевій низьколегованій сталі 06X1. **Висновок.** Для низьковуглецевої низьколегованої сталі 06X1 досліджено вплив типу полікристалічних границь на кінетику розповсюдження пластичної деформації. Встановлено взаємозв'язок між розповсюдженням пластичної деформації та типом міжфазних та внутрішньофазних границь. Запропонована фізична модель враховує спроможність структурних складових до блокування пластичної деформації.

Ключові слова: розповсюдження пластичної деформації; границі спеціального типу; границі загального типу

THE INFLUENCE OF GRAIN BOUNDARIES ON THE DEVELOPMENT OF DEFORMATION IN LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS

SLUPSKA Yu.S.¹, *Ph.D. Stud.*,
DADIVERINA L.M.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
CHASHYN D.Yu.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TOROPCHENOV H.O.⁴, *Master of Eng.*,
PYKO M.O.⁵, *Master of Eng.*

¹ Department of Material Science and Treatment of Materials, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-82, e-mail: slupska.yuliia@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

^{2*} Department of Planning and Organization of Production, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 756-33-66, e-mail: dadiverina.liliia@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4498-2184

³ Department of Planning and Organization of Production, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 756-33-66, e-mail: chashyn.dmytro@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0986-9349

⁴ Department of Material Science and Treatment of Materials, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-82, e-mail: g.toropchenov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0954-9844

⁵ Department of Material Science and Treatment of Materials, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-82, e-mail: Pyko.m@icloud.com, ORCID ID: 0000-0002-3867-5391

Abstract. Problem statement. Most modern materials have a polycrystalline structure. Their most important property – mechanical strength – is determined by the defective structure of the crystals. Under the defective structure should be understood not only the concentration and distribution of point defects, dislocations, packaging defects, but also the grain boundaries. The development of such processes as diffusion, recrystallization, plasticity, creep, fragility, cracking and corrosion resistance depends on the grain boundaries. The degree of this influence is directly related to the peculiarities of the atomic structure of boundaries and their interaction with other defects. Therefore, the study of the influence of interfacial and intraphase boundaries on the development of plastic deformation in modern materials is an urgent task. **Purpose of the article.** Investigation of the influence of the type of polycrystalline boundaries on the kinetics of propagation of plastic deformation in low-carbon low-alloy steel 06X1. **Conclusion.** Investigation of the influence of the type of polycrystalline boundaries on the kinetics of propagation of plastic deformation in low-carbon low-alloy steel 06X1. Conclusion. For low-carbon low-alloy steel 06X1 the influence of the type of polycrystalline boundaries on the kinetics of plastic deformation propagation is investigated. The relationship between the propagation of plastic deformation and the type of interfacial and intraphase boundaries is established. The proposed physical model takes into account the ability of structural components to block plastic deformation.

Keywords: *propagation of plastic deformation; boundaries of a special type; boundaries of a general type*

Вступ. Більшість сучасних матеріалів мають полікристалічну структуру. Найважливіша їх властивість – механічна міцність – визначається дефектною структурою кристалів. Під дефектною структурою слід розуміти не тільки концентрацію і розподіл точкових дефектів, дислокацій, дефектів упаковки, а й границі зерен. Атомна структура та властивості точкових дефектів і дислокацій у кристалах вивчені досить добре (див., наприклад, [1; 2]). Що стосується наших знань про атомну структуру границь зерен і про механізми їх участі у пластичній деформації і руйнуванні, то вони значно менш повні.

Разом із тим, границі зерен впливають на властивості матеріалів [3]. Від них залежить розвиток таких процесів як дифузія, рекристалізація. Є велика кількість експериментальних даних, які свідчать, що границі зерен також впливають на міцність, пластичність, повзучість, крихкість, виникнення тріщини і корозію [4]. Ступінь цього впливу прямо пов'язаний з особливостями атомної структури границь і їх взаємодією з іншими дефектами.

Тому дослідження впливу міжфазних та внутрішньофазних границь на розвиток пластичної деформації в сучасних матеріалах постає актуальним завданням.

Будова границь між кристалами давно розглядалася в різних гіпотезах: концепція безструктурного (аморфного) шару завтовшки до кількох сотень атомних відстаней (модель Розенхайна [5]); концепція кристалічних острівців в аморфному шарі (модель Мотта [6]); концепція урахування кристалографічної орієнтації в острівцях (модель Джаффкінса [7]) і т. д. (див., наприклад [8–10]).

Наразі найбільше визнання отримала концепція місць збігу, яку запропонували Кронберг і Вільсон для пояснення особливостей текстури в деформованій і відпаленій міді [11]. Ця модель припускає існування «особливих» (спеціальних) границь, котрі відрізняються від звичайних тим, що для двох ґраток, повернутих на певний кут навколо осі текстури, виникає третя, спільна для них підґратка «місць збігу», і атоми на границі перебувають у вузлах цієї ґратки. Спеціальні границі

відрізняються тим, що їх властивості, такі як поверхневий натяг, рухливість під час міграції, параметри приграничної дифузії, поверхнева енергія та інші, мають немонотонний характер, з екстремумами на кутах, які зумовлюють утворення гратки збіжних вузлів (PCB) [12].

У моделі PCB основна характеристика – це питома густина збіжних вузлів, а її зворотна величина Σ використовується для опису характеристик спеціальних границь [87]. Таким чином, у структурі полікристалічного матеріалу присутні границі двох типів: загального (великокутові високоенергетичні) та спеціального (низькоенергетичні).

З іншого боку, більшість сучасних теорій пластичності матеріалів виходять з уявлення про матеріал як про ізотропне середовище, яке, в загальному випадку, володіє здатністю до зміцнення [14]. Теорії пластичності і засновані на їх використанні методи розрахунку розглядають тільки малі деформації і припускають стійкість процесу деформації [15].

Допущення про стійкість деформації виключає можливість зменшення напруги при збільшенні деформації. Стосовно до розгляду діаграми деформування (рис. 1) це означає, що теорії пластичності не можуть бути використані ні для пояснення різкого падіння напруги від верхнього до нижнього краю плинності, ні для дослідження падаючої ділянки діаграми розтягування після досягнення максимального значення навантаження [16]. У відповідності з теоретичними уявленнями, деформації пружного тіла повністю оборотні, розсіювання енергії, що витрачається під час деформування такого тіла, не має місця і під час розвантаження тіла енергія деформації повністю звільняється [17]. На противагу цьому залишкові деформації вважаються повністю незворотними.

У праці [19] показано, що за деформацій, менших відповідної точки А, розподіл пластичних деформацій в обсязі

матеріалу відбувається нерівномірно – виникають окремі зони пластичної деформації. У разі підвищення напруги ці зони поширюються по об'єму матеріалу.

Таким чином, на підставі отриманих у працях [19; 20] результатах можливо припустити, що границі зерен утворюють певну сітку, яка повинна вирівнювати розподіл деформацій між зернами полікристалічної структури. Ця сітка може або блокувати, або майже не чинити опору розповсюдженню пластичної деформації.

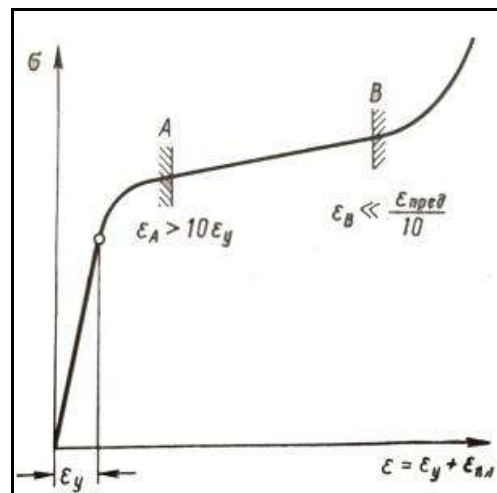


Рис. 1. Область пластичної деформації металів [18]

Мета – дослідження впливу типу полікристалічних границь на кінетику розповсюдження пластичної деформації в низьковуглецевій низьколегованій сталі 06X1.

Методика та результати дослідження. Як матеріал дослідження використано низьковуглецеву низьколеговану сталь 06X1, хімічний склад якої наведено в таблиці 1.

Для проведення досліджень виготовлено зразки, які мали циліндричну форму й одну відшліфовану поверхню, придатну для металографічних досліджень.

Зразки були піддані розтягу, без досягнення стану руйнування. Розтяг зразків припинявся за різних навантажень, значення яких наведені на рисунку 2.

Хімічний склад досліджуваної сталі

Марка сталі	Масова частка елемента, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	V	Nb	Fe
06X1	≤ 0,07	0,40...0,65	0,17...0,37	0,015	0,020	1,00...1,30	0,02	0,06	ост.

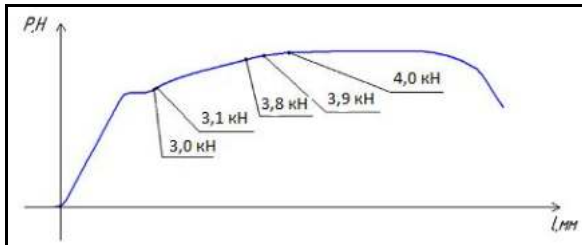


Рис. 2. Діаграма експериментального розтягу зразків

Для моделювання процесу розподілу пластичної деформації по структурних складових використано модель, запропонована в [14].

Розглянемо спільну діаграму трьох суміжних зон, із яких середня відчуває пластичну деформацію, а обидві крайні перебувають у пружному стані. Поведінку зазначених зон можливо дослідити за аналогією із системою трьох стрижнів, які з'єднано та навантажено спільним зовнішнім навантаженням P (рис. 3). Природно, зусилля у стрижнях будуть неоднакові.

З точки зору структурного стану, аналізовані три зони, виділені в обсязі полікристалічного матеріалу, будуть працювати при одному і тому ж навантаженні, але матимуть різний опір пластичній деформації. Таким чином, у розгляді внутрішніх напружень, що діють в малих обсягах (порядку розміру одного зерна або колонії), описана модель з певною ймовірністю буде описувати співвідношення сил, що має місце в реальному матеріалі.

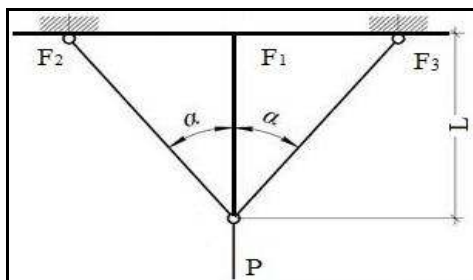


Рис. 3. Стрижнева модель, запропонована у праці [3]

Виходячи з умов апроксимації, можливо припустити, що середній стрижень системи буде відчувати найбільше навантаження і, як наслідок, у ньому в першу чергу виникатиме пластична деформація. Разом із цим, інші стрижні перебуватимуть ще в області пружної деформації.

Для розрахунку використано таке рівняння:

$$\sigma_{cp} / \sigma_T = P / (F_1 + F_2 + F_3), \quad (1)$$

де F_1, F_2, F_3 – величини деформації елементів структури (визначались за рівнянням 2):

$$F = (\Delta l / l) \times 100 \%. \quad (2)$$

Результати розрахунків згідно з обраною моделлю (рівняння 1) узагальнені та наведені на рисунку 4.

Результати кількісної оцінки розорієнтації смуг деформації (кути нахилу α на рисунку 3) залежно від зусилля навантаження, довжини зразка та типу границі наведені на рисунках 5–7. Результати проведеного комплексу досліджень узагальнені та наведені в таблиці 2.

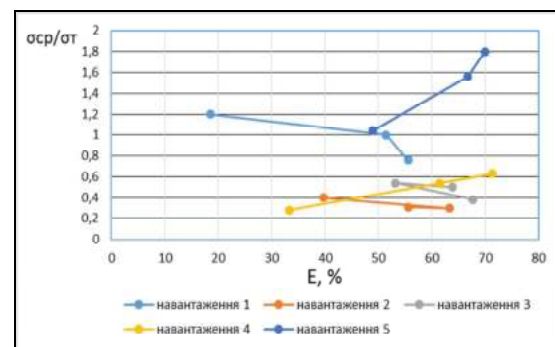


Рис. 4. Кількісна оцінка розподілу пластичної деформації по структурних складових

Аналіз наведених даних показує, що за навантаження 3 000 Н в 1/8 зразка розорієнтація деформаційних смуг відсутня, оскільки за такого навантаження відбувається локальна деформація, яка

зосереджується в невеликій кількості окремих зерен.

За навантаження 4 000 Н кут розорієнтації стає максимальним и дорівнює

майже 180°. Це свідчить про максимальну швидкість розповсюдження пластичної деформації по структурних складових.

Таблиця 2

Кут розорієнтації деформаційних смуг

Довжина зразка	Тип границі	Навантаження P , Н				
		3,0 кН	3,1 кН	3,8 кН	3,9 кН	4,0 кН
1/8	Звичайні	0	0	18	10	180
	Спеціальні	0	0	0	0	180
1/4	Звичайні	0	0	30	180	180
	Спеціальні	0	0	0	180	–
1/2	Звичайні	0	0	10	180	–
	Спеціальні	0	0	180	180	–

Аналіз отриманих даних показує, що протидія пластичній деформації відбувається в суміжних зонах. При цьому границі зерен можуть як бути бар'єром, так і не чинити опору розповсюдженню пластичної деформації.

Зі збільшенням зовнішнього навантаження розподіл напружень стає більш рівномірним. Таким чином, ширина зони границь зерен дуже мала з точки зору розподілу деформацій.

З іншого боку, границі зерен можуть довільним чином скривлюватися відповідно до розвитку ковзання всередині зерна. Ця властивість пов'язана з неоднорідністю структури металу на границях зерен. Як вказувалося вище, ці границі складаються із зон довільно розташованих атомів, що чергуються із зонами більш упорядкованої структури. Ширина границі зерен достатня для можливості ковзання блоків кристалічної ґратки зерен на відстань близько багатьох міжатомних відстаней. Як наслідок, руйнування шляхом відриву виникає після досягнення граничного стану взаємодії зсувів на границях зерен.

У пластично деформованому зерні за впливу зовнішнього навантаження дислокації накопичуються біля границь зерен. При цьому в сусідньому зерні пластична деформація відсутня (рис. 8 а), тому що не достатньо високий рівень напруги від зовнішнього навантаження, щоб відбувся перехід через межу розділу.

Зі збільшенням рівня зовнішнього навантаження напруга, зумовлена накопиченням дислокацій в першому зерні, зростає до значень, необхідних для активації джерел дислокації в сусідньому зерні (рис. 8 а). Описана схема пояснює механізм розповсюдження пластичної деформації через границі зерен.

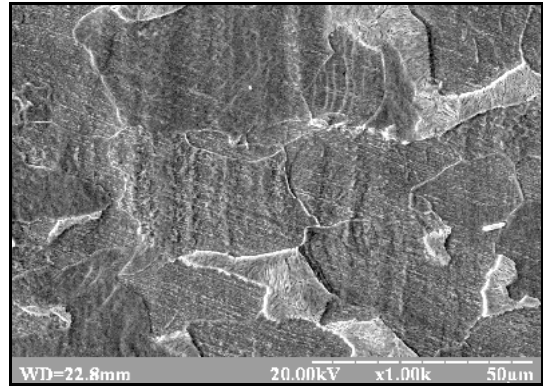
При цьому слід зазначити, що перехід пластичної деформації від одного зерна в інше залежить як від рівня навантаження, так і від типу границі. Наприклад, ситуація, яку наведено на рисунку 8 б, демонструє блокування пластичної деформації міжфазною границею ферит – перліт.

У структурах, в яких присутня карбонітридна фаза по границях, границі зерен мають більш високий опір деформації і справляють істотний вплив на загальні пластичні деформації деталей. Це пояснює підвищення межі плинності сталі порівняно з напругою ковзання фериту і те, що нахил діаграми деформування сталі в зоні пластичної деформації більший нахилу відповідної діаграми, отриманої під час випробувань макрокристалічних зразків.

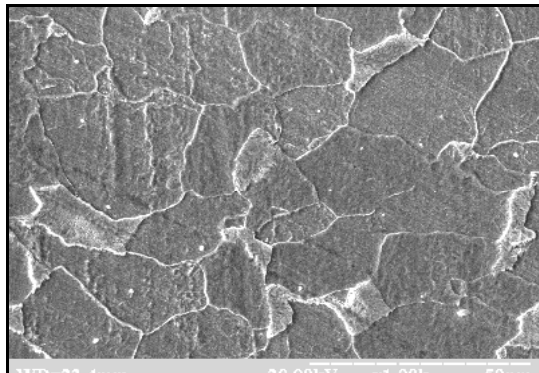
Форма діаграми деформування в області пластичної деформації змінюється відповідно до різниці між опором деформації границь зерен і металу всередині зерен.



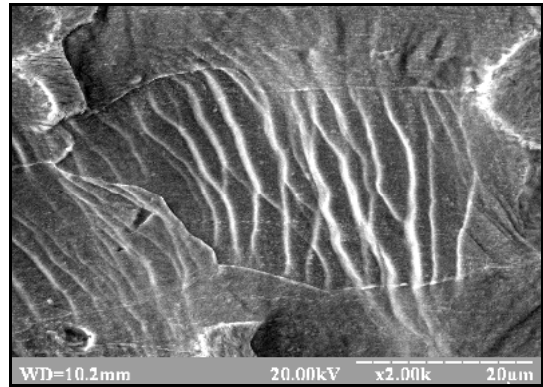
a



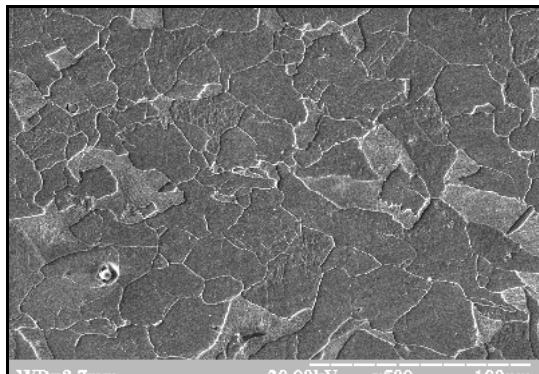
б



б

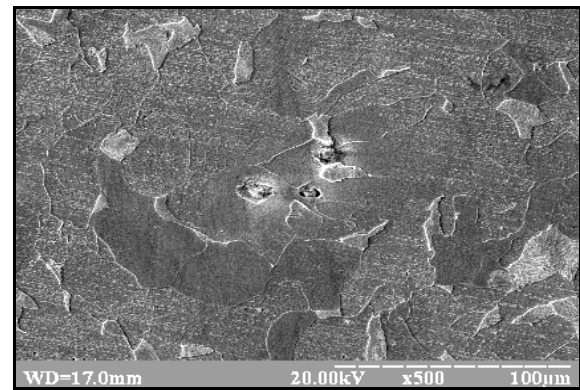


в



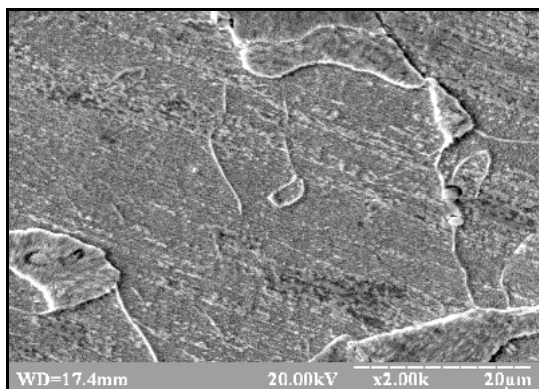
в

Рис. 6. Розорієнтація деформаційних смуг на 1/4 довжини зразка : а – навантаження 3 кН; б – навантаження 3,8 кН; в – навантаження 4,0 кН

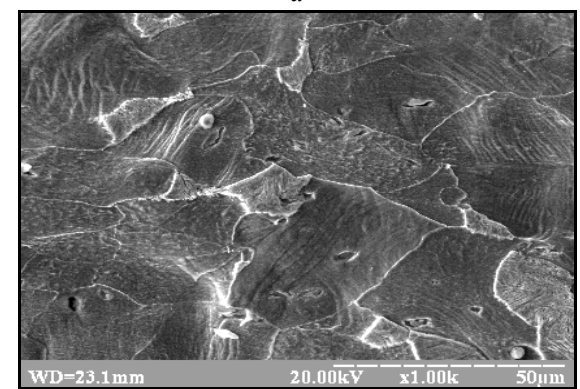


a

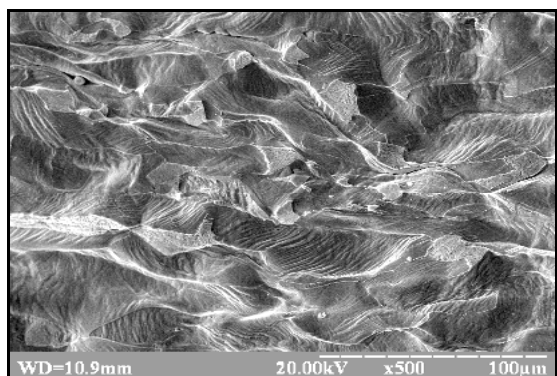
Рис. 5. Розорієнтація деформаційних смуг на 1/8 довжини зразка : а – навантаження 3 кН; б – навантаження 3,8 кН; в – навантаження 4,0 кН



a

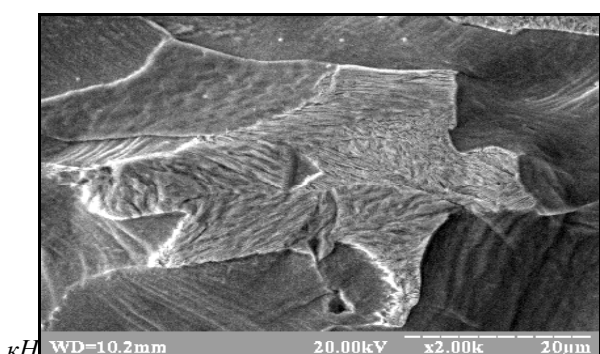


б



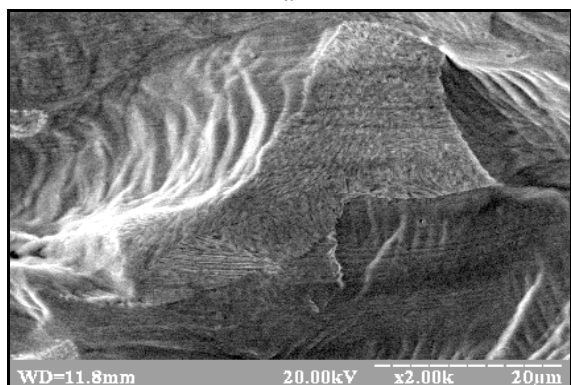
в

Рис. 7. Розорієнтація деформаційних смуг на 1/2 довжини зразка : а – навантаження 3 кН; б – навантаження 3,8 кН; в – навантаження 4,0



кН

а



б

Рис. 8. Вплив міжфазних і внутрішньофазних границь на розповсюдження пластичної деформації : а – нерівномірне виникнення деформації (навантаження 4,0 кН); б – блокування пластичної деформації міжфазними границями (навантаження 3,9 кН)

Результати. Для низьковуглецевої низьколегованої сталі 06X1 досліджено вплив типу полікристалічних границь на

кінетику розповсюдження пластичної деформації.

Наукова новизна та практична цінність. Установлено взаємозв'язок між розповсюдженням пластичної деформації та типом міжфазних та внутрішньофазних границь. Запропонована фізична модель враховує спроможність структурних складових до блокування пластичної деформації.

Висновки

1. У розгляді загальної картини руйнування низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей із феритно-перлітною структурою обов'язкове врахування впливу нанорозмірних структурних елементів, які формуються під час розпаду переохолодженого аустеніту. До таких елементів, у першу чергу, слід віднести тип поверхонь розділу між структурними компонентами: міжфазні межі розділу перліт – ферит; міжфазні межі розділу в колонії квазіевтектоїду (евтектоїдний ферит – цементит). Якщо вказані межі будуть спеціального типу, тобто матимуть мінімальне значення вільної енергії, розповсюдження руйнування може відбуватися за внутрішньозеренним механізмом.

2. Показано, що протидія пластичній деформації відбувається в суміжних зонах. При цьому границі зерен можуть як бути бар'єром, так і не чинити опору розповсюдженню пластичної деформації.

3. Зародження та розповсюдження руйнування в приграничній зоні (міжзеренний злам) зумовлене взаємодією між кінетикою розповсюдження пластичної деформації та структурними складовими матеріалу, зокрема, типом поверхонь розділу. Таким чином, руйнування шляхом відриву виникатиме після досягнення граничного стану взаємодії зсувів на границях зерен.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Новиков И. И., Розин К. М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. Москва : Металлургия, 1990. 336 с.
2. Bollmann W. Crystal defects and crystalline interfaces. Berlin : Springer Verlag, 1970. 316 p.

3. Бокштейн Б. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах. Москва : Металлургия, 1988. 271 с.
4. Сухомлин Г. Д. Поверхностная энергия межфазных $\gamma \rightarrow \alpha$ границ при диффузионном превращении аустенита. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2013. Вып. 67. С. 7–11.
5. Rosenhain W. T., Humfrey J. C. W. The tenacity, deformation and fracture of soft steel at high temperatures. *Journal Iron and Steel Inst.* 1973. Vol. 87. Pp. 219–240.
6. Mott N. F. Slip at grain boundaries and grain growth in metals. *Proceedings of the Physical Society*. 1948. Vol. 60. Pp. 391–394.
7. Gifkins R. C. Development of the island model for grain boundaries. *Materials Science & Engineering*. 1967. Vol. 2. Pp. 181–192.
8. Ke T. S. A grain boundary model and the mechanism of viscous intercrystalline slip. *Journal of Applied Physics*. 1949. Vol. 20. Pp. 274–280.
9. Ли Дж. Некоторые свойства дисклинационной структуры границ зёрен. Атомная структура межзёренных границ. Москва : Мир, 1978. С. 114–125.
10. Pumphrey P. H. A plane matching theory of high angle grain boundary structure. *Scripta Metallurgica*. 1972. Vol. 6. Pp. 107–114.
11. Kronberg M. L., Wilson, F. H. Secondary recrystallization in copper. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1949. Vol. 18. Pp. 501–514.
12. Барыбин А. А., Томилин В. И., Шаповалов В. И. Физико-технологические основы макро-, микро- и наноэлектроники. Москва : Физмалит, 2011. 784 с.
13. Орлов А. Н. Атомная структура межзёренных границ. Москва : Мир, 1978. 292 с.
14. Немец Я. Жесткость и прочность стальных деталей. Москва : Машиностроение, 1970. 528 с.
15. Либвиц Г. Разрушение : в 7 т. Москва : Мир, 1973. Т. 1 : Микроскопические основы механики разрушения. 620 с.
16. Слепян Л. И. Механика трещин. Ленинград : Судостроение, 1981. 296 с.
17. Махутов Н. А. Сопротивление элементов конструкции хрупкому разрушению. Москва : Машиностроение, 1973. 200 с.
18. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. Москва : Гостехтеориздат, 1956. 324 с.
19. Beketov O. V., Laukhin D. V., Rott N. O., Tyuterev I. A., Ivantsov S. V., Laukhin V. D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallifizika. Noveishie Tekhnologii*. 2017. Vol. 39, № 10. Pp. 1335–1343.
20. Бекетов О. В., Иванцов С. В., Тютюрев І. А., Ротт Н. О., Бабенко Є. О. Дослідження загальних особливостей розповсюдження пластичної деформації в сталях із феритно-перлітною структурою. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 95. С. 26–34.

REFERENCES

1. Novikov I.I. and Rozin K.M. *Kristallografiya i defekti kristallicheskoj reshetki* [Crystallography and crystal lattice defects]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1990, 336 p. (in Russian).
2. Bollmann W. Crystal defects and crystalline interfaces. Berlin : Springer Verlag, 1970, 316 p.
3. Bokshtejn B. *Struktura i svojstva vnutrennih poverhnostej razdela v metallah* [Structure and properties of internal interfaces in metals]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1988, 271 p. (in Russian).
4. Suhomlin G.D. *Poverhnosnaya energiya mezhfaznyh $\gamma \rightarrow \alpha$ granic pri diffuzionnom prevrashenii austenita*. [Surface energy of interphase $\gamma \rightarrow \alpha$ boundaries in the diffusion transformation of austenite.]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2013, no. 67. pp. 7–11. (in Russian).
5. Rosenhain W.T. and Humfrey J.C.W. The tenacity, deformation and fracture of soft steel at high temperatures. *Journal Iron and Steel Inst.* 1973, no. 87, pp. 219–240.
6. Mott N.F. Slip at grain boundaries and grain growth in metals. *Proceedings of the Physical Society*. 1948, no. 60, pp. 391–394.
7. Gifkins R.S. Development of the island model for grain boundaries. *Materials Science & Engineering*. 1967, no. 2, pp. 181–192.
8. Ke T.S. A grain boundary model and the mechanism of viscous intercrystalline slip. *Journal of Applied Physics*. 1949, no. 20, pp. 274–280.
9. Li Dzh. *Nekotorye svojstva disklinacionnoj struktury granic zyoren. Atomnaya struktura mezhyzorenyh granic* [Some properties of the disclination structure of grain boundaries. Atomic structure of grain boundaries]. Moscow : Mir Publ., 1978, pp. 114–125. (in Russian).
10. Pumphrey P.H. A plane matching theory of high angle grain boundary structure. *Scripta Metallurgica*. 1972, no. 6, pp. 107–114.

