

УДК 669-1:539.382.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ В СТАЛЯХ З ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНОЮ СТРУКТУРОЮ

БЕКЕТОВ О.В.¹ к.т.н., доц.,
ИВАНЦОВ С.В.² к.т.н., доц.,
ТЮТЕРЕВ І.А.³ к.т.н., доц.,
РОТТ Н.О.⁴ к.т.н., доц.,
БАБЕНКО Є.О.⁵ студ.

¹ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

² кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

³ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁴ Кафедра матеріалознавства і обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва і архітектури», вул. Чернишевського, 24^а, м. Дніпро, Україна, 49005, (0562)46-64-62, e-mail: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁵ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: zhenya.babenko.dndzn@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0244-1657

Анотація. Мета. Дослідження розповсюдження пластичної деформації в структурі низьковуглецевої мікролегованої сталі. **Методика.** Розтяг зразків зі сталі 06Х1 без досягнення руйнування. Розтяг зразків припинявся при різних навантаженнях. **Результати.** Для низьковуглецевої мікролегованої сталі 06Х1 встановлено вплив структурних складових на загальні особливості розповсюдження пластичної деформації. **Наукова новизна.** Показано розподіл пластичної деформації, який формується по перерізу зразка з низьковуглецевої мікролегованої сталі 06Х1 під дією зовнішнього навантаження. Встановлено вплив структурних складових на розповсюдження пластичної деформації на стадії, яка передує зародженню руйнування. **Практична значимість.** Розробка шляхів стабілізації механічних властивостей, зокрема ударної в'язкості, товстостістового прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозв'язку параметрів структури, тонкої структури та поверхні руйнування.

Ключові слова: структура, пластична деформація, навантаження, структурні складові, зерна фериту.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СТАЛЯХ С ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

БЕКЕТОВ А.В.¹ к.т.н., доц.,
ИВАНЦОВ С.В.² к.т.н., доц.,
ТЮТЕРЕВ И.А.³ к.т.н., доц.,
РОТТ Н.А.⁴ к.т.н., доц.,
БАБЕНКО Е.А.⁵ студ.

¹ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

² кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

³ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁴ Кафедра материаловедения и обработки материалов ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24^а, г. Днепр, Украина, 49005, (0562)46-64-62, e-mail: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁵ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: zhenya.babenko.dndzn@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0244-1657

Аннотация. Цель. Исследование распространения пластической деформации в структуре низкоуглеродистой микролегированной стали. **Методика.** Растяжение образцов из стали 06X1 без достижения разрушения. Растяжение образцов прекращалось при различных нагрузках. **Результаты.** Для низкоуглеродистой микролегированной стали 06X1 установлено влияние структурных составляющих на общие особенности распространения пластической деформации. **Научная новизна.** Показано распределение деформации, которое формируется по сечению образца из низкоуглеродистой микролегированной стали 06X1 под действием внешней нагрузки. Установлено влияние структурных составляющих на распространение пластической деформации на стадии, предшествующей зарождению разрушения. **Практическая значимость.** Разработка методов стабилизации механических свойств, в частности ударной вязкости, толстолистового проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей отечественного производства на основе установления взаимосвязи между параметрами структуры, тонкой структуры и поверхности разрушения.

Ключевые слова: структура, пластическая деформация, нагрузка, структурные составляющие, зерна феррита.

STUDY OF DISTRIBUTION GENERAL FEATURES OF PLASTIC DEFORMATION IN STEEL WITH FERIT-PERLIT STRUCTURE

BEKETOV A.V.¹ Ph. D., Assos. prof.,
IVANTSOV S.V.² Ph. D., Assos. prof.,
TYUTEREV I.A.³ Ph. D., Assos. prof.,
ROTT N.A.⁴ Ph. D., Assos. prof.,
BABENKO E.A.⁵ stud.

¹ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

² department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

³ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁴ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005, (0562)46-64-62, e-mail: aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁵ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005, +38 (0562) 46-93-72, e-mail: zhenya.babenko.dndzn@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0244-1657

Annotation. Purpose. Study of the propagation of plastic deformation in the structure of low-carbon-stable microalloyed steel. **Methodology.** Stretching of samples from steel 06X1 without reaching destruction. The stretching of the samples ceased at different loads. **Findings.** For low-carbon micro-galvanized steel 06X1, the influence of structural components on the general features of the propagation of plastic deformation is established. **Originality.** The distribution of deformation is shown, which is formed on the cross-section of a sample from low-carbon microalloyed steel 06X1 under the influence of an external load. The effect of structural components on the propagation of plastic deformation at the stage preceding the nucleation of fracture is established. **Practical value.** Development of methods for stabilizing mechanical properties, in particular impact toughness, of thick-rolled steel from low-carbon micro-alloyed steels of domestic production on the basis of establishing the relationship between the parameters of the structure, fine structure and the surface of failure.

Keywords: structure, plastic deformation, load, structural components, ferrite grains.

Вступ

Більшість теорій пластичності твердого тіла виходять з уявлення про матеріал, як про ізотропне середовище, яке, в загальному випадку, володіє здатністю до зміцнення [1]. Теорії пластичності та засновані на

їх використанні методи розрахунку розглядають тільки малі деформації і припускають стійкість процесу деформації [2].

Допущення про стійкість деформації виключає можливість зменшення напруги при збільшенні деформації. У відповідності з теоретичними уявленнями-

ми деформації пружного тіла є повністю оборотними, розсіювання енергії, що витрачається при деформуванні такого тіла, не має місця і при розвантаженні тіла енергія деформації повністю звільняється [3]. На противагу цьому залишкові деформації вважаються повністю незворотними.

У більшості теорій пластичності приймається наступне [1]:

- стан матеріалу не залежить від тривалості дії навантаження;
- тривале навантаження не змінює постійних матеріалу;
- в області стійкої пластичної деформації збільшення напруги завжди повинно викликати збільшення деформації.

Важливою умовою є підведення енергії до зони руйнування при розвитку тріщини [4]. Якщо пластична деформація біля краю тріщини реалізується шляхом ковзання в зернах фериту, то граничний стан буде залежить від факторів, що впливають на рух дислокацій [5]. Пластичні деформації розвиваються в напрямку максимальної напруги зсуву, і величина їх залежить від розташування і взаємозв'язку зерен фериту, а також від структурного стану матеріалу біля краю тріщини [6].

Мета

Дослідження розповсюдження пластичної деформації в структурі низьковуглецевої мікрولةгованої сталі.

Методика та результати дослідження

У якості матеріалу дослідження було використано сталь 06Х1.

Для проведення досліджень виготовлювались зразки для статистичних випробувань на розтяг, згідно вимог діючої нормативної документації [7]. Одну поверхню зразка готували для послідуочого дослідження в скануючому електронному мікроскопі, згідно рекомендацій, наведених у роботі [8].

В ході експерименту зразки були піддані розтягу, без досягнення стану руйнування (див. рис. 1).

Результати дослідження взаємозв'язку між зовнішнім навантаженням та локальною деформацією наведені на рис. 2...4.

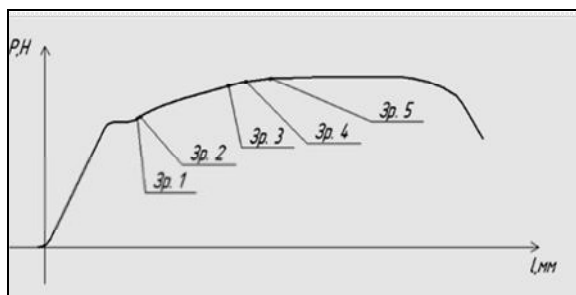


Рис. 1. Схематична діаграма розтягу зразків/Schematic diagram of tensile samples

Розтяг зразків припинявся при різних навантаженнях, значення яких приведені у табл. 1.

Таблиця 1

Експериментально розраховані зусилля навантаження при лабораторних дослідженнях/Experimentally calculated loading force during laboratory tests

№ зразка	1	2	3	4	5
Зусилля навантаження Р, Н	3035	3080	3805	3900	3980

Поступовим збільшенням зовнішнього навантаження на металевий зразок можна досягти такого її значення, при якому з'являються пластичні деформації в зернах фериту, в яких площини дії максимальних зсувних напружень збігаються з кристалографічними площинами найбільш щільного розташування атомів. При цьому відбувається ковзання «блоків» або «пачок» кристалічної решітки, сліди якого добре видно на протравленій поверхні металевих зразків (рис. 2...4).

Площина, в якій починається ковзання, називається площиною ковзання. Існує багато паралельних площин ковзання, проте не у всіх цих площинах реалізується ковзання при даному рівні напруг. Площини, в яких раніше всього починається ковзання, називаються активними площинами ковзання. Ці площини відрізняються не тільки орієнтуванням по відношенню до напрямку діючих напружень, а й також і щільністю розміщення і характером дефектів.

Розміри елементарних областей, що утворилися в початковій стадії пластичної деформації, зазнають істотних змін також і при великих деформаціях.

При дослідженні початковій стадії розвитку пластичної деформації або вивчення розподілу деформації у випадку нерівномірного розподілу напружень виявляється, що деформації розподіляються в обсязі металу вельми нерівномірно. У поверхневих шарах металу при наявності значного градієнта напруги спостерігається той факт, що при одному і тому ж значенні деформації в деяких областях пластична деформація розвинулася, тоді як в суміжних областях матеріал ще перебуває в стані пружної деформації. Різниця в місцевих значеннях відносного подовження або відносного зсуву досягає значень в 10...30 одиниць.

Надалі при розвитку деформації зразка спостерігається відома ступінь упорядкування зон пластичної деформації, пов'язана з взаємодією розповсюдженням зон деформації і розподілом енергії в обсязі зразку.

Для виявлення впливу навантаження на розмір зерна було пораховано видовження зерна. Розрахунки проводились по формулі:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} * 100\% \quad (1)$$

Результати розрахунків представлені у табл. 2. Графічна інтерпретація отриманих результатів для кожного зразка приведена на рис. 5.

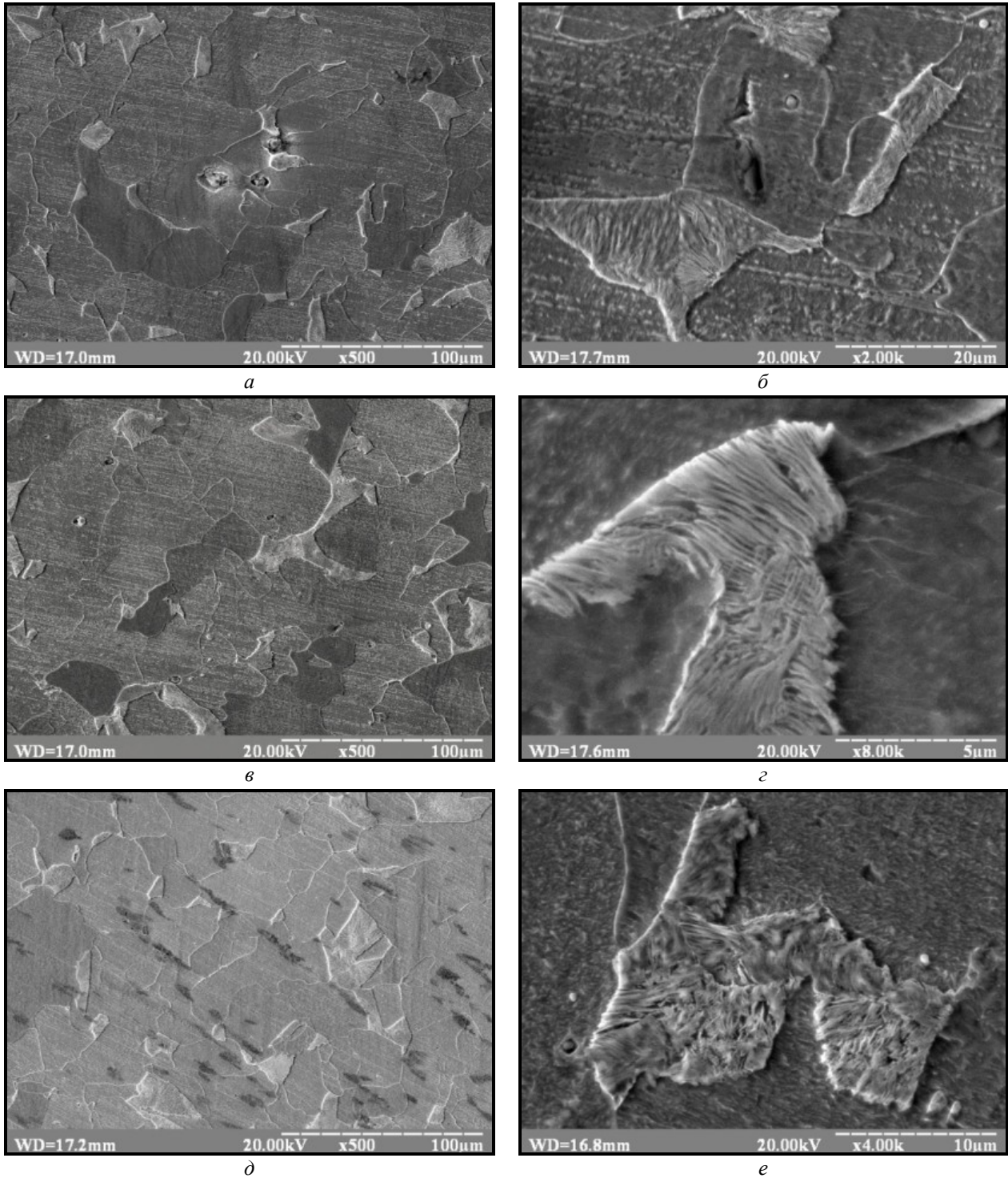


Рис. 2. Структура зразків сталі після розтягнення з навантаженням: а, в, д – 3033,8 Н; б, г, е – 3079 Н; а, б – L/8 – захват; в, г – L/4 – центр; д, е – L/2 – периферія / The structure of the samples were stretching after the load: a, c, d – 3033,8 H; b, e, f – 3079 H; a, b – L/8 - delight; c, d – L/4 – center; e, f – L/2 - periphery

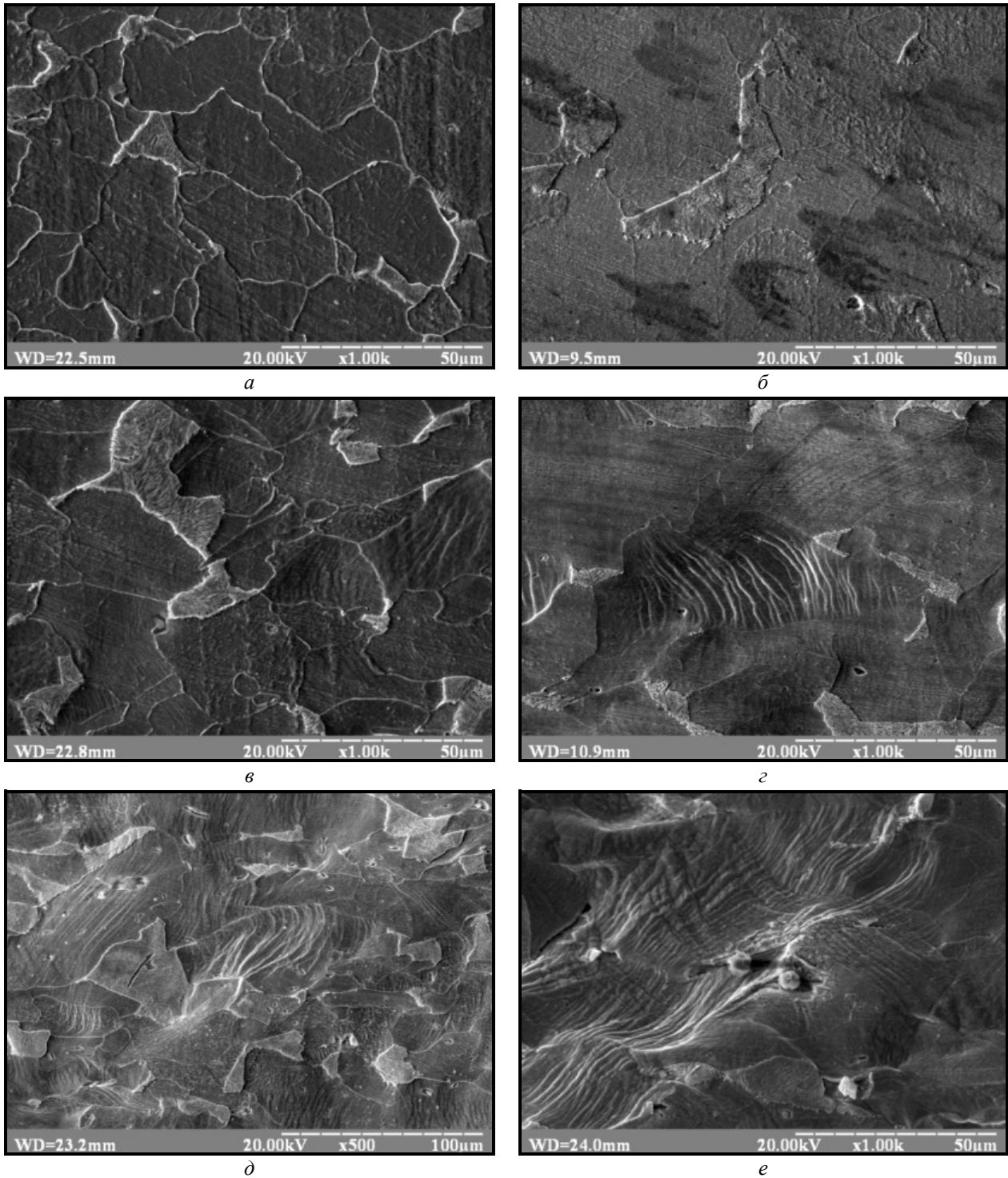


Рис. 3. Структура зразків сталі після розтягнення з навантаженням: а, в, д – 3806 Н; б, г, е – 3900 Н; а, б – L/8 – захват; в, г – L/4 – центр; д, е – L/2 – периферія / The structure of the samples were stretching after the load: a, c, d – 3806 Н; b, e, f – 3900 Н; a, b – L/8 - delight; c, d – L/4 – center; e, f – L/2 - periphery

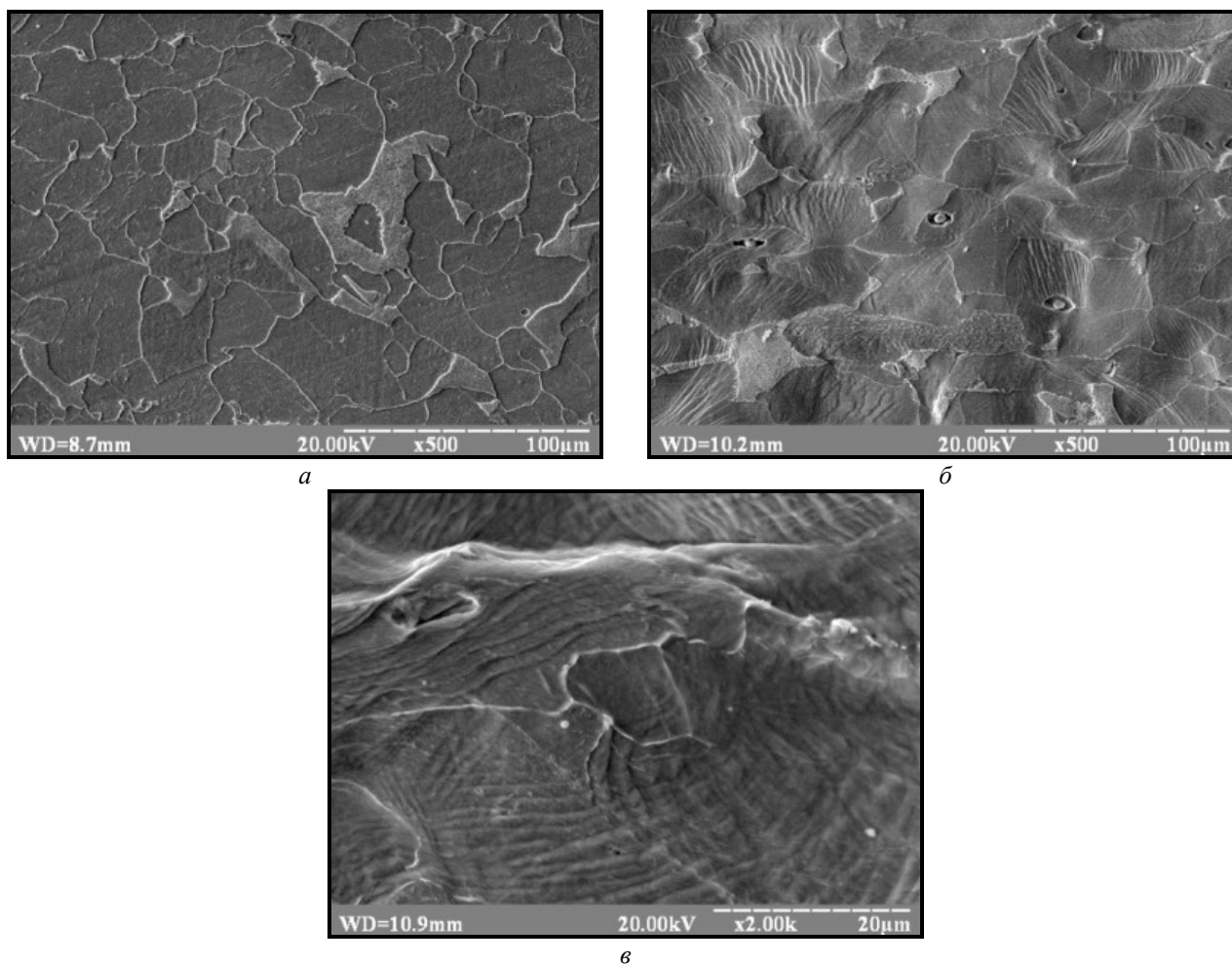


Рис. 4. Структура зразків сталі після розтягнення з навантаженням: 3079 Н: а – L/8 – захват, б – L/4 – центр, в – L/2 – периферія / The structure of the samples were stretching after the load 3079 Н: а – L/8 - delight; б – L/4 – center; c – L/2 – periphery

Зразки навантажували поздовжньої розтягувальною силою і розраховували величину пластичної деформації в середині зерна по довжині зразка. Деформація розподіляється в середині зерна нерівномірно, має місце невелика різниця в точках контакту зерен.

Таблиця 2

Ступень деформації феритних зерен / The degree of deformation of ferritic grains

№зразка п/п	1	2	3	4	5
Зусилля навантаження Р, Н	3033,8	3079,0	3806,3	3900,0	3981,0
Деформація зерна ϵ , %	33	40	66	71	83

На підставі проведених випробувань можна зробити важливий висновок про те, що границі зерен утворюють сітку, яка вирівнює розподіл деформацій між зернами полікристалічної структури.

Відмінності в деформації окремих зерен, що характеризуються різними напрямками і площинами ковзання, не роблять помітного впливу на макродеформацію всього об'єму.

Звичайно, ці висновки справедливі тільки при достатньо великих пластичних деформаціях тіл – порядку декількох відсотків, при яких може проявитися, вирівнювальний вплив границь зерен. Ця умова виконується в тому випадку, коли граничний стан нестійкості пластичної деформації досягається при постійному збільшенні навантаження. З іншого боку, при динамічних навантаженнях, коли відбувається розвиток дефекту в найбільш навантаженому зерні, а більш віддалені зерна знаходяться в пружному стані, умови пластичної деформації виявляються зовсім іншими, і наявність границь зерен надає протилежний вплив.

В описаних експериментах було встановлено, що ширина зони границь зерен дуже мала з точки зору розподілу деформацій. Важливо відзначити також, що границі зерен можуть довільним чином скривлюватися відповідно до розвитку ковзання всередині зерна.

Ця властивість пов'язана з неоднорідністю структури металу на межах зерен. Як вказувалося вище, ці межі складаються з зон довільно розташованих атомів, що чергуються з зонами більше впорядкованої структури. Ширина границі зерен достатня для мож-

ливості ковзання блоків кристалічної решітки зерен на відстань близько багатьох міжатомних відстаней. При таких ковзаннях блоки проникають в зону границь зерен.

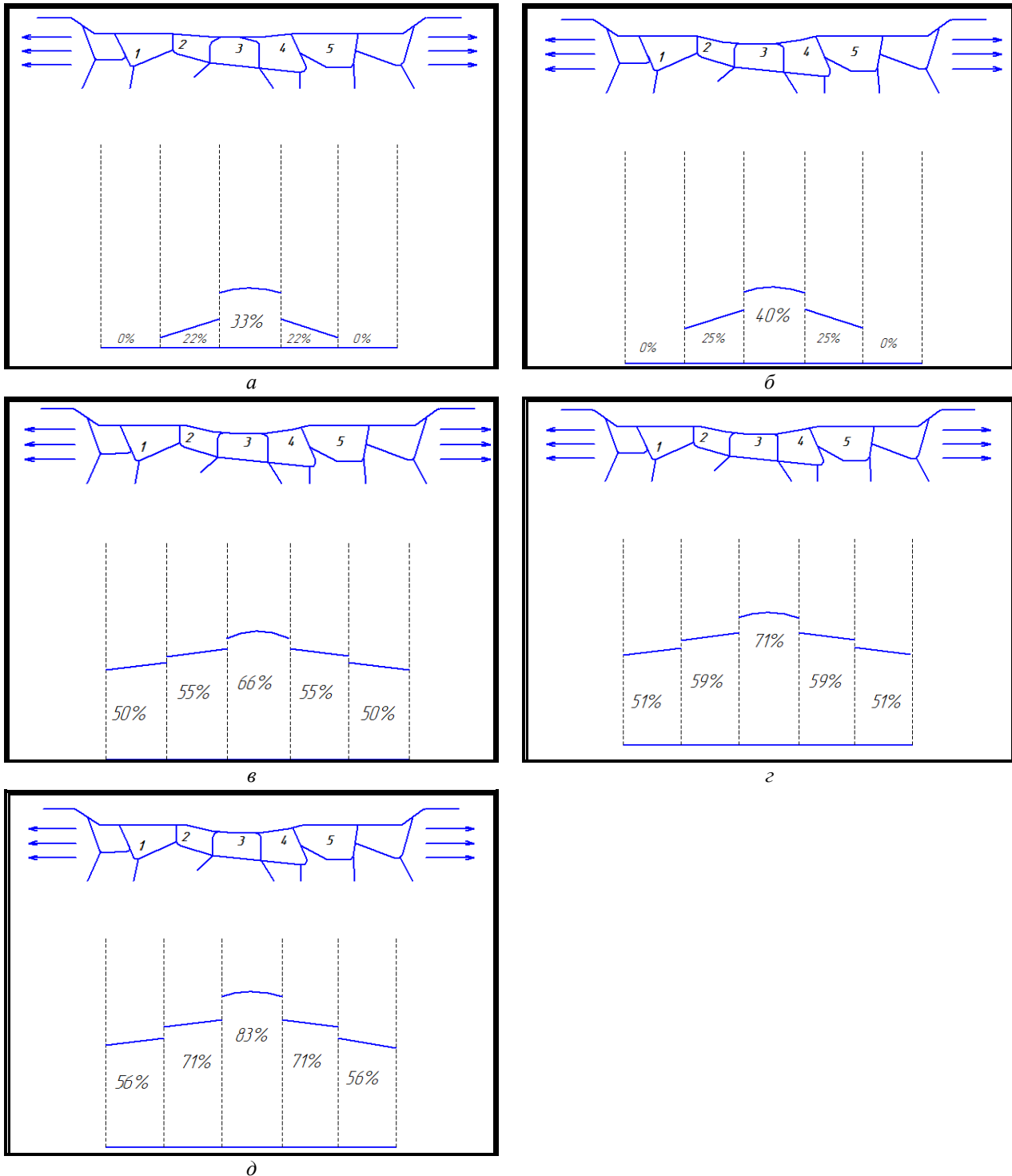


Рис. 5. Розподіл деформації зерен по довжині зразка: а – навантаження 3033,8 Н; б – навантаження 3079 Н; в – навантаження 3806,3 Н; г – навантаження 3900 Н; д – навантаження 3981 Н / Average grain strain along the length of the sample: a – load 3033,8 Н; b – load 3079 Н; c – load 3806,3 Н; d – load 3900 Н; e – load 3981 Н

У складніших структурах технічних металів, наприклад м'якої сталі, в якій по границям зерен фериту випадають карбіди і концентруються чужорідні атоми, границі зерен мають більш високий опір деформації і справляють істотний вплив на загальні пластичні деформації деталей. Це пояснює підвищення межі текучості сталі в порівнянні з напругою ковзання фериту і те, що нахил діаграми деформування сталі в зоні пластичної деформації більше нахилу відповідної діаграми, отриманої при випробуваннях макрокристалічних зразків. Форма діаграми деформування в області пластичної деформації змінюється відповідно до різниці між в опором деформації границь зерен і металу всередині зерен.

Результати

Для низьковуглецевої мікролегованої сталі 06X1 встановлено вплив структурних складових на загальні особливості розповсюдження пластичної деформації.

Наукова новизна та практична цінність

Показано розподіл пластичної деформації, який формується по перерізу зразка з низьковуглецевої мікролегованої сталі 06X1 під дією зовнішнього навантаження. Встановлено вплив структурних складових на розповсюдження пластичної деформації на стадії, яка передуює зародженню руйнування. Розробка шляхів стабілізації механічних властивостей, зокрема ударної в'язкості, товстолистового прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозв'язку параметрів структури, тонкої структури та поверхні руйнування.

Висновки

1. Поширення пластичної деформації в об'ємі кристала відбувається нерівномірно. Лінії деформації утворюють на поверхні зразку сітку квадратів, загальною діагоналлю яких є напрямок розвитку пластичної деформації. Пластична деформація, створює періодично неоднорідну зміцнену середу, яка буде визначати напрям розвитку тріщини.
2. При дослідженні початкової стадії розвитку пластичної деформації або вивчення розподілу деформації у випадку нерівномірного розподілу напружень встановлено, що деформації розподіляються в обсязі металу вельми нерівномірно.
3. Пластична деформація поширюється через границі зерен. Міжфазні границі при певному рівні навантаження блокують розвиток деформації.
4. Границі зерен утворюють сітку, яка вирівнює розподіл деформацій між зернами полікристалічної структури. Відмінності в деформації окремих зерен, що характеризуються різними напрямками і площинами ковзання, не роблять помітного впливу на макродеформації всього об'єму.
5. Границі зерен можуть довільним чином скривлюватися відповідно до розвитку ковзання всередині зерна. Ця властивість пов'язана з неоднорідністю структури металу на межах зерен.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Жесткость и прочность стальных деталей». Сокращенный перевод с чешского. Я. Немец. «Машиностроение», 1970. Стр. 1-528. – Режим доступу: <http://www.bookler.ru/bookisbn/200001470464.shtml>
2. Разрушение (ред. Г. Либвиц), т. I-VII.- М.: Мир, 1973-1977. Режим доступу: http://library.kpi.ua:8991/F?func=find-b&request=000212622&find_code=SYS
3. Махутов Н.А. Сопrotивление элементов конструкции хрупкому разрушению.-М.: Машиностроение, 1973.-200 с. Режим доступу: <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=117177>
4. Слепян Л.И. Механика трещин.-Л.: Судостроение, 1981.-295 с. Режим доступу: <http://padaread.com/?book=36536>
5. Влияние величины зерна на размер фасеток хрупкого трансформационного скола / Л. И. Гладштейн, В. М. Горицкий, А. И. Ковалев та ін. // Проблемы прочности. – 1979. – № 3. – С. 60–92. Режим доступу: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=22113
6. Пластичность и разрушение. Под. ред. В. Л. Колмогорова. М., «Металлургия», 1977,366 с. Режим доступу: <http://lib-bkm.ru/11057>
7. ГОСТ 1497-84 – Металлы. Методы испытаний на растяжение; Введено впервые 01.01.1986. ст. – 24. – Режим доступу: <http://www.cad.dp.ua/gost/files/GOST1497-84.pdf/>
8. Раствая электронная микроскопия и рентгеновский анализ в двух книгах. Книга 1./ [Гоулдстейн Дж., Ньюберидж, Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э.]; пер. с англ. Р.С. Гвоздовер, Л.Ф. Комоловой. – М.: Мир, 1984-303с. Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/223865/>

REFERENCES

1. «Zhestkost i prochnost stalnykh detaley». Sokraschennyiy perevod s cheshskogo. Ya. Nemets. «Mashinost-roenie», 1970. Str. 1-528. Available at: <http://www.bookler.ru/bookisbn/200001470464.shtml>
2. Razrushenie (red. G. Libvits), t. I-VII.- M.: Mir, 1973-1977. Available at: http://library.kpi.ua:8991/F?func=find-b&request=000212622&find_code=SYS
3. Mahutov N.A. Sopotivlenie elementov konstruksii hrupkomu razrusheniyu.-M.: Mashinostroenie, 1973.-200 s. Available at: : <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=117177>
4. Slepian L.I. Mehanika treschin.-L.: Sudostroenie, 1981.-295 s. Available at: <http://padaread.com/?book=36536>

5. *Vliyaniye velichiny zerna na razmer fasetok hrupkogo transkristallinogo skola* / L. I. Gladshteyn, V. M. Goritskiy, A. I. Kovalev ta In. // Problemyi prochnosti. – 1979. – # 3. – S. 60–92. Available at: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=22113
6. *Plastichnost i razrushenie*. Pod. red. V. L. Kolmogorova. M., «Metallurgiya», 1977, 366 s. Available at: <http://lib-bkm.ru/11057>
7. GOST 1497-84 – *Metallyi. Metodyi ispyitaniy na rastyazhenie*; Vvedeno v pervyie 01.01.1986. st. – 24. Available at: <http://www.cad.dp.ua/gost/files/GOST1497-84.pdf>
8. *Rastrovaya elektronnyaya mikroskopiya i rentgenovskiy analiz: v dvuh knigah. Kniga 1.* / [Gouldsteyn Dzh., Nyuberi D., Dzhoy D., Fiori Ch., Lifshin E.]; per. s angl. R.S. Gvozdover, L.F. Komolovoy.- M.: Mir, 1984-303s. Available at: <http://www.twirpx.com/file/223865>

Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиным (Украина)