

УДК 669-1:539.382.2

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260319.59.303

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РОЗПОДІЛ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ В СТРУКТУРІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ МІКРОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ПРИСКОРЕНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

ЛАУХІН Д. В.¹, *д. т. н., проф.*,БЕКЕТОВ О. В.², *к. т. н., доц.*,РОТТ Н. О.^{3*}, *к. т. н., доц.*,ТЮТЕРЄВ І. А.⁴, *к. т. н., доц.*,ІВАНЦОВ С. В.⁵, *к. т. н., доц.*,ШАПОВАЛ А. В.⁶, *магістр*,БРАГАР Є. О.⁷, *магістр*

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: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

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) 46-93-72, e-mail: a.v.beketov77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

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: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁴ 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: mom@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

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: frieberg@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁶ 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: mom@pgasa.dp.ua

⁷ 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: evgeniy9456@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7047-5752

Анотація. Мета. Дослідити вплив зовнішнього навантаження на пластичну деформацію структурних складових низьковуглецевих мікролегованих сталей після прискореного охолодження. **Методика.** Аналіз поведінки металу при розтягуванні до певного рівня навантаження; подальше експериментальне дослідження структури зразків. **Результати.** Для сталей СтЗсп, 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ досліджено вплив зовнішнього навантаження на пластичну деформацію структурних складових низьковуглецевих мікролегованих сталей після прискореного охолодження. **Наукова новизна.** Отриманні в роботі результати показують взаємозв'язок між зовнішнім навантаженням та відповідним розповсюдженням пластичної деформації з урахуванням структурного стану. **Практична значимість.** Розробка шляхів стабілізації механічних властивостей, зокрема ударної в'язкості, товстолистового прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозв'язку параметрів структури та поверхонь руйнування.

Ключові слова: структурний стан; бейніт; мартенсит; пластична деформація; навантаження

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СТРУКТУРЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

ЛАУХИН Д. В.¹, *д. т. н., проф.*,
 БЕКЕТОВ А. В.², *к. т. н., доц.*,
 РОТТ Н. А.^{3*}, *к. т. н., доц.*,
 ТЮТЕРЕВ И. А.⁴, *к. т. н., доц.*,
 ИВАНЦОВ С. В.⁵, *к. т. н., доц.*,
 ШАПОВАЛ А. В.⁶, *магістр*,
 БРАГАР Е. А.⁷, *магістр*

¹ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

² Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: a.v.beketov77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

^{3*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁴ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: mom@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁵ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: friberg@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁶ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: mom@pgasa.dp.ua

⁷ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: evgeniy9456@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7047-5752

Аннотация. *Цель.* Исследовать влияние внешней нагрузки на пластическую деформацию структурных составляющих низкоуглеродистых микролегированных сталей после ускоренного охлаждения. *Методика.* Анализ поведения металла при растяжении до определенного уровня нагрузки; дальнейшее экспериментальное исследование структуры образцов. *Результаты.* Для сталей СтЗсп, 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ исследовано влияние внешней нагрузки на пластическую деформацию структурных составляющих низкоуглеродистых микролегированных сталей после ускоренного охлаждения. *Научная новизна.* Полученные в работе результаты показывают взаимосвязь между внешней нагрузкой и соответствующим распространением пластической деформации с учетом структурного состояния. *Практическая значимость.* Разработка путей стабилизации механических свойств, в частности ударной вязкости, толстолистового проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей отечественного производства на основе установления взаимосвязи параметров структуры и поверхностей разрушения.

Ключевые слова : структурное состояние; бейнит; мартенсит; пластическая деформация; нагрузка

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL LOADING ON DISTRIBUTION OF PLASTIC DEFORMATION IN THE STRUCTURE OF CUTTING MICROWAVE STEELS AFTER COOLED COOLING

LAUKHIN D.V.¹, *Professor*,
 BEKETOV A.V.², *Ph. D., Ass. Prof.*,
 ROTT N.A.^{3*}, *Ph. D., Ass. Prof.*,
 TYUTEREV I.A.⁴, *Ph. D., Ass. Prof.*,
 IVANTSOV S.V.⁵, *Ph. D., Ass. Prof.*,
 SHAPOVAL A.V.⁶, *Student*,
 BRAGAR E.A.⁷, *Student*

¹ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

² Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: a.v.beketov77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

^{3*} Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁴ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: mom@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁵ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: friberg@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁶ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: mom@pgasa.dp.ua

⁷ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: evgeniy9456@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7047-5752

Abstract. Purpose. Investigate the effect of external load on the plastic deformation of the structural components of low-carbon micro-alloyed steels after accelerated cooling. **Methodology.** Analysis of the behavior of the metal under tension to a certain level of load; further experimental study of sample structure. **Findings.** The influence of external loading on the plastic deformation of the structural components of low-carbon alloyed steels after accelerated cooling has been investigated for steels St3sp, 09G2S, 10CHSND, 10G2FB. **Originality.** The results obtained in the work show the relationship between the external load and the corresponding distribution of plastic deformation taking into account the structural state. **Practical value.** Development of ways to stabilize mechanical properties, in particular impact strength, sheet steel rolled products from low-carbon microalloyed steels of domestic production on the basis of establishing the relationship between the parameters of the structure and the surfaces of fracture.

Keywords : structural state; bainite; martensite; plastic deformation; load

Вступ

Розвиток сучасного будівництва ставить все зростаючі вимоги до властивостей матеріалів: підвищення їх механічних і корозійних характеристик. Водночас, з розробкою нових сплавів йде вдосконалення та поліпшення якості вже існуючих. Подальше просування в цьому напрямку неможливе без розширення та поглиблення знань та уявлень про процеси, які відбуваються в металі на протязі його взаємодії з зовнішнім середовищем під час експлуатації.

Особливе місце в широкому колі питань, пов'язаних з цією проблемою, посідає вивчення здатності матеріалів чинити опір руйнуванню при статичних і динамічних навантаженнях. При цьому опір матеріалу поширенню в ньому тріщин визначається його структурою, а саме морфологічними особливостями тонкої будови: розміром структурних складових, дисперсністю і розподілом неметалевих включень, типом внутрішньофазних та міжфазних границь, тощо. Разом з цим, згідно з даними теоретичних і експериментальних досліджень, поширення тріщини в полікристалічному матеріалі супроводжується виникненням у вершині тріщини полів внутрішніх напружень, які призводять до локальної пластичної

деформації полікристала в область руху фронту зростаючої тріщини – так звану зону пластичної деформації або «русло» тріщини [1; 2]. При цьому, важливою умовою є підведення енергії до зони руйнування при розвитку тріщини [3]. Якщо пластична деформація у краю тріщини реалізується шляхом ковзання, то граничний стан буде залежить від факторів, що впливають на рух дислокацій [4]. Пластичні деформації розвиваються в напрямку максимальної напруги зсуву, і величина їх залежить від розташування і взаємозв'язку структурних складових [5].

На появу того чи іншого виду деформації великий вплив надає характер прикладених до тіла навантажень і, як наслідок, тип відповідного напружено-деформованого стану. Одні процеси деформації пов'язані з переважною дією дотичній складової напруги, інші – з дією нормальної складової. У будь якому разі, пластична деформація, що залишається після зняття навантаження, пов'язана з переміщенням атомів усередині кристалів на відносно великі відстані і викликає залишкові зміни форми, структури і властивостей без макроскопічних порушень суцільності металу [6].

Мета

Дослідити вплив зовнішнього навантаження на пластичну деформацію структурних складових низьковуглецевих мікролегованих сталей після прискороного охолодження.

Методика та результати дослідження

В якості матеріалу для дослідження були обрані картки листів товщиною 20 мм наступних марок сталі: Ст3сп, 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ. При виготовленні листів із марок сталі Ст3 і 09Г2С використовувалася технологія гарячої прокатки, а з

марок 10ХСНД і 10Г2ФБ технологія контрольованої прокатки. Хімічний склад та механічні властивості сталей за сертифікатними даними і результатами контрольного аналізу наведено в таблицях 1 і 2 відповідно.

З метою отримання заданого структурного стану (ферит + бейніт + мартенсит) з листів товщиною 20 мм вирізали зразки розміром 105×158 мм, які піддавали термічній обробці у лабораторних умовах за наступною схемою: нагрів до температури 980 °С, витримка одну годину, охолодження у воді ($V_{охол} = 25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$).

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей / The chemical composition of the investigated steels

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, %													
	C	Cr	Cu	Mn	P	S	Si	Ni	V	N	Nb	As	Ti	Al
Ст3	0,14–0,22	0,3	0,3	0,4–0,65	0,04	0,04	0,15–0,3	0,008	–	–	–	–	–	–
09Г2С	0,12	0,3	0,3	1,3–1,7	0,035	0,04	0,5–0,8	0,3	–	0,008	–	0,08	–	–
10ХСНД	0,12–0,18	0,6–0,9	0,2–0,4	0,4–0,7	0,035	0,04	0,4–0,7	0,3–0,6	–	0,008	–	0,08	–	–
10Г2ФБ	0,13	0,3	0,3	1,7	0,02	0,007	0,35	0,3	0,09	0,012	0,5	–	0,01–0,04	0,02–0,05

Таблиця 2

Механічні властивості досліджуваних сталей / Mechanical properties of the investigated steels

Марка сталі	Механічні властивості		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
Ст3	370 ... 480	235	25
09Г2С	460	305	21
10ХСНД	490 ... 685	345	21
10Г2ФБ	550	430	20

Під час проведення експерименту було досліджено поведінку металу при розтягуванні до руйнування і одержані відповідні діаграми розтягування. Для проведення досліду, були використані зразки циліндричної форми (зразки виготовлялися згідно вимог [7]). При статичних випробуваннях для визначення характеристик міцності і пластичності досліджуваний зразок піддавався дії повільного навантаження, що плавно збільшується. Це дало можливість вимірювати з достатньою точністю навантаження, прикладене до

зразка, і деформацію останнього у будь-який момент випробування.

Досліджувані зразки були піддані розтягу: один з них до розриву, а інші три без досягнення стану руйнування. Розтяг зразків припинявся при різних навантаженнях, значення яких приведені у таблиці 3. Приклад діаграми розтягу наведено на рисунку 1.

З метою аналізу структурного стану було проведеного комплекс металографічних досліджень, результати яких наведено на рисунках 2 та 3.

Результати структурного аналізу показали, що після проведення лабораторної термічної обробки в

структурі досліджуваних сталей з'явилися продукти проміжного та зсувного механізмів формування структури. Результатом металографічного аналізу (рис. 2–3) показали, що структура усіх досліджуваних марок сталей містить конгломерат структурних складових, який складається з доєвтектоїдного фериту, бейніту та мартенситу.

Методами кількісної металографії було підраховано процентний вміст структурних складових досліджуваних сталей. Результати підрахунків представлені у вигляді таблиці 4.

З приведених у таблиці 4 даних чітко видно, що найбільший вміст фериту спостерігається в сталі – Ст3сп, бейніту – 09Г2С, мартенситу – в сталі

10Г2ФБ. Відповідно найменший вміст фериту спостерігається в сталі – 09Г2С, бейніту – Ст3сп, мартенситу – в сталі 10ХСНД.

Результати дослідження деформації структурних складових наведено на рисунках 4 та 5. Для сталі 10ХСНД (рис. 5 а–в) зі збільшенням навантаження спостерігається значне деформування феритної фази, при цьому пластична деформація не викликає значних змін у мартенситі. Для бейніту характерні деформації колоній, які направлені вздовж смуг прикладання навантаження. Феритна складова відчуває значні деформаційні навантаження, що виражається збільшенням загальної протяжності внутрішньофазних меж.

Таблиця 3

Значення навантажень зразків / The value of sample loads

Марка сталі	Зусилля навантаження Р, Н		
	Зразок 1 – початок майданчика плинності	Зразок 2 – кінець майданчика плинності	Зразок 3 – середина області залишкової деформації
Ст3	5 100	6 090	6 730
09Г2С	10 770	12 030	13 020
10ХСНД	5 170	5 330	6 470
10Г2ФБ	5 400	6 160	7 150

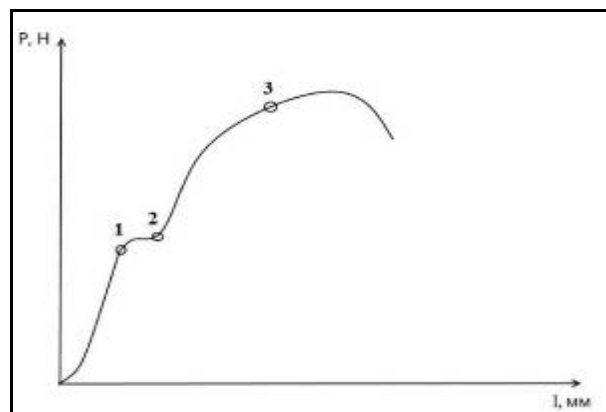


Рис. 1. Приклад діаграми навантаження (сталь Ст3сп) / Fig. 1. Example of load diagram (Ст3сп steel)

Таблиця 4

Вміст структурних складових в досліджуваних сталях / The content of structural components in the investigated steels

Марка сталі	Вміст структурної складової, %		
	Ферит	Бейніт	Мартенсит
Ст3сп	60	30	10
09Г2С	5	85	10
10ХСНД	55	40	5
10Г2ФБ	35	55	10

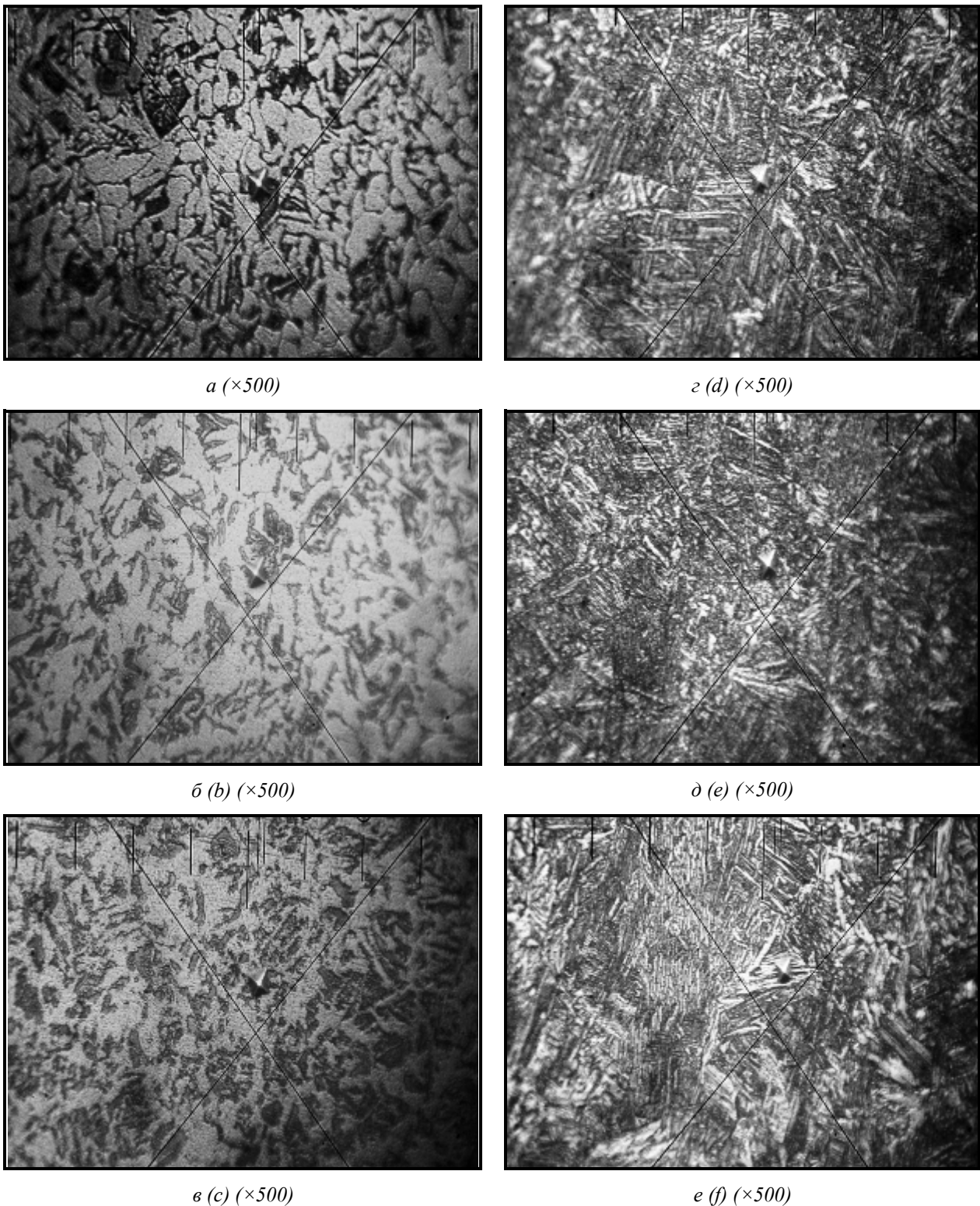


Рис. 2. Мікроструктура досліджуваних сталей : а-в – сталь Cm3cn; z-e – сталь 09Г2С; а, в – зразок №1; б, z – зразок № 2; в, e – зразок № 3 / Fig. 2. Microstructure of investigated steels with places of control of microhardness : a-c – Cm3cn steel; d-f – 09Г2С steel; a, c – specimen No. 1; b, d – specimen No. 2; e, f – specimen No. 3

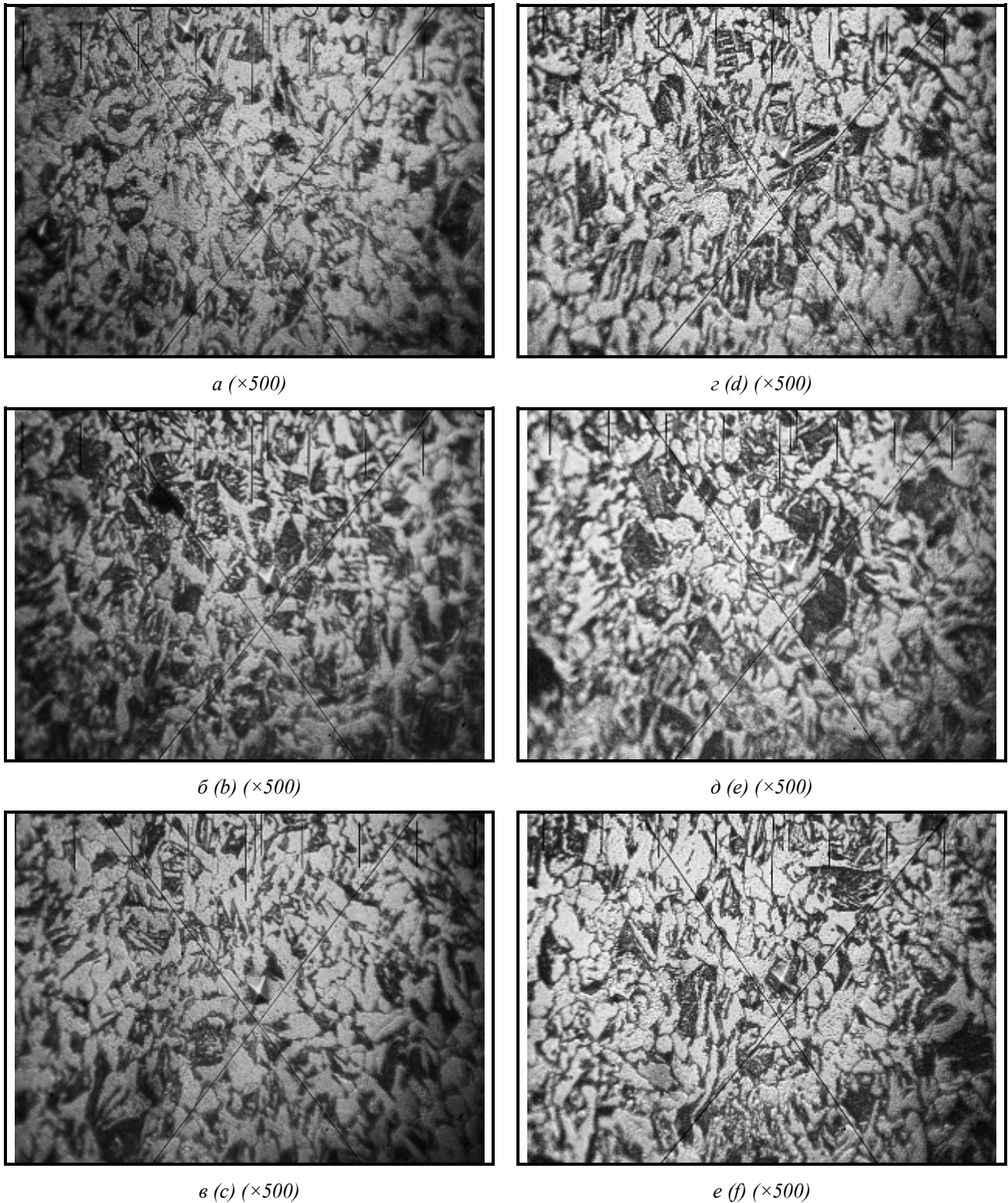


Рис. 3. Мікроструктура досліджуваних сталей : а-в – сталь 10ХСНД; г-е – сталь 10Г2ФБ; а, в – зразок № 1; б, г – зразок № 2; в, е – зразок № 3 / Fig. 3. Microstructure of investigated steels with places of control of microhardness : а-с – 10ХСНД steel; д-ф – 10Г2ФБ steel; а, с – specimen No. 1; б, д – specimen No. 2; е, ф – specimen No. 3

Збільшення протяжності меж являється наслідком локального розвороту (за рахунок дії гвинтових і змішаних дислокацій) субзерен феритної фази.

Для сталі Ст3 (рис. 4 а-в) спостерігається аналогічна ситуація, при цьому слід зазначити, що присутня значна деформація бейнітної складової, яка затиснута між зернами фериту.

Для сталі 10ХСНД (рис. 5 з-е) спостерігається картина аналогічна розповсюдженню пластичної деформації в попередніх зразках. При цьому спостерігається деформаційна фрагментація феритної фази та незначна деформація мартенситу.

Для сталі 09Г2С із збільшенням навантаження (рис. 4 а-в) спостерігається значна деформація бейніту, котра виражається в зруйнуванні міжресничних проміжків і укрупнення рейок бейнітного фериту. При цьому спостерігається дроблення алотріоморфного фериту, що є наслідком дотичної складової пластичної деформації в локальних областях із підвищеним рівнем вільної енергії.

Для кількісної оцінки деформації бейнітної складової були виміряні геометричні розміри бейнітних колоній до деформації (табл. 5) та після деформації. Геометричний розмір колоній після деформації вимірювався по довжині зразку, на відстанях: ¼ довжини зразка (від захвату), ½ довжини зразка (від захвату). Результати вимірювань надані у таблиці 6.

Таблиця 5

Середній розмір бейнітних колоній у вихідному стані / The average size of the bainitic colonies in the initial state

Марка сталі	Розмір колонії, мм
Ст3сп	0,0050
09Г2С	0,0040
10ХСНД	0,0050
10Г2ФБ	0,0055

Таблиця 6

Середній розмір бейнітних колоній після деформації / The average size of the bainitic colonies after deformation

Сталь	Зразок	Зона зразка	Розмір колоній, мм
Ст3	№ 1	¼ довжини	0,0050
		½ довжини	0,0055
	№ 2	¼ довжини	0,0060
		½ довжини	0,0065
	№ 3	¼ довжини	0,0060
		½ довжини	0,0070
09Г2С	№ 1	¼ довжини	0,0080
		½ довжини	0,0090

	№ 2	¼ довжини	0,0085	
		½ довжини	0,0095	
	№ 3	¼ довжини	0,0070	
		½ довжини	0,0080	
	10ХСНД	№ 1	¼ довжини	0,0070
			½ довжини	0,0070
№ 2		¼ довжини	0,0070	
		½ довжини	0,0070	
№ 3		¼ довжини	0,0065	
		½ довжини	0,0070	
10Г2ФБ	№ 1	¼ довжини	0,0060	
		½ довжини	0,0064	
	№ 2	¼ довжини	0,0065	
		½ довжини	0,0065	
	№ 3	¼ довжини	0,0060	
		½ довжини	0,0065	

Відповідно до отриманих даних була розрахована значення деформації бейнітних колоній за формулою (1):

$$\epsilon = \Delta X_0 / \Delta X_k \times 100\% \quad (1)$$

де ΔX_0 – середній розмір колоній бейніту до деформації; ΔX_k – середній розмір колоній бейніту після деформації.

Результати відповідних розрахунків наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Деформація бейнітних колоній досліджуваних сталей / Deformation of bainite colonies of investigated steels

Сталь	Зона зразка	Відносна деформація, %
Ст3	¼ довжини	85
	½ довжини	95
09Г2С	¼ довжини	45
	½ довжини	50
10ХСНД	¼ довжини	70
	½ довжини	75
10Г2ФБ	¼ довжини	85
	½ довжини	90

Результати

Для низьковуглецевої мікролегованих сталей Ст3сп, 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ досліджено вплив зовнішнього навантаження на пластичну деформацію структурних складових низьковуглецевих мікролегованих сталей після прискореного охолодження.

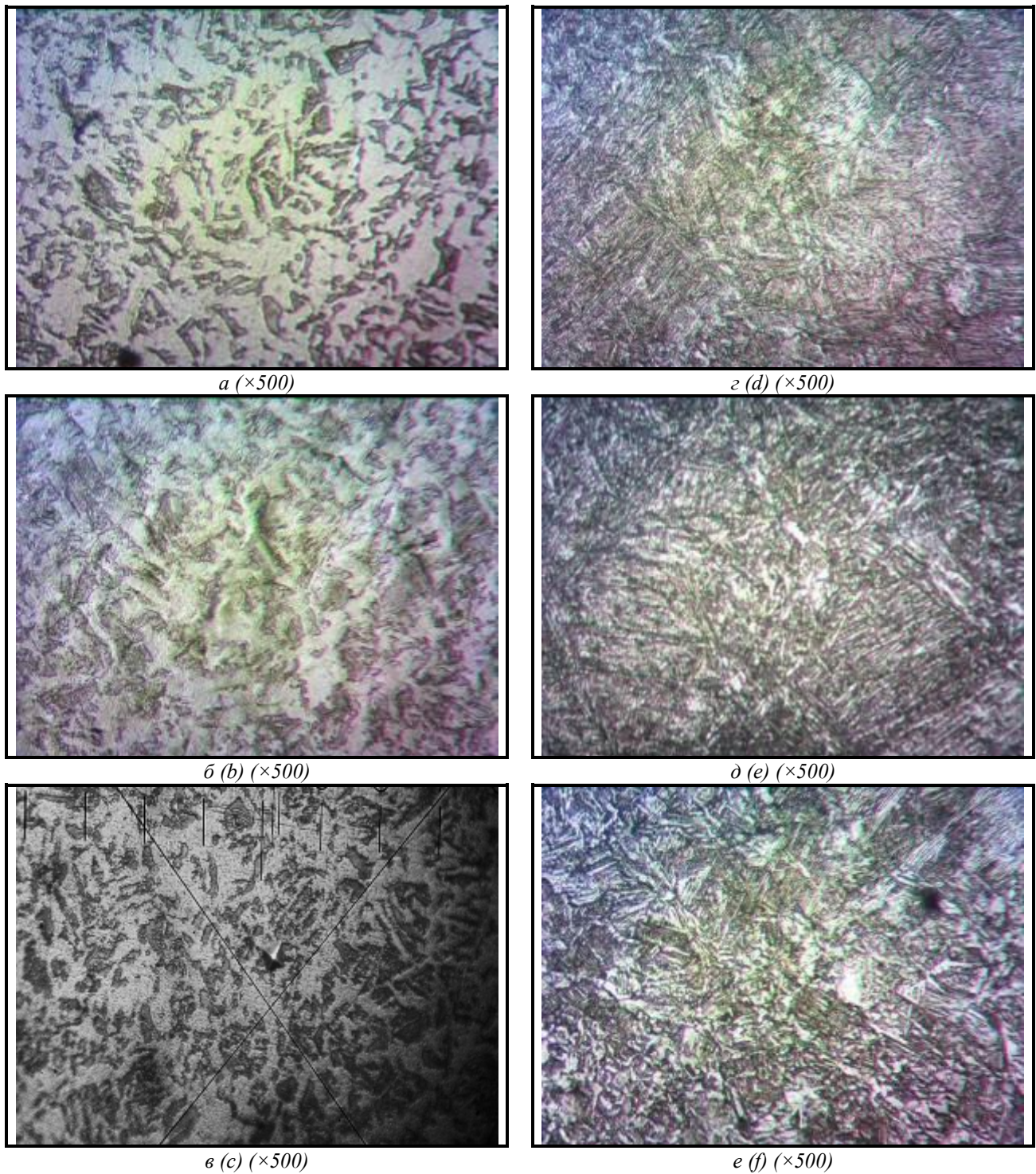
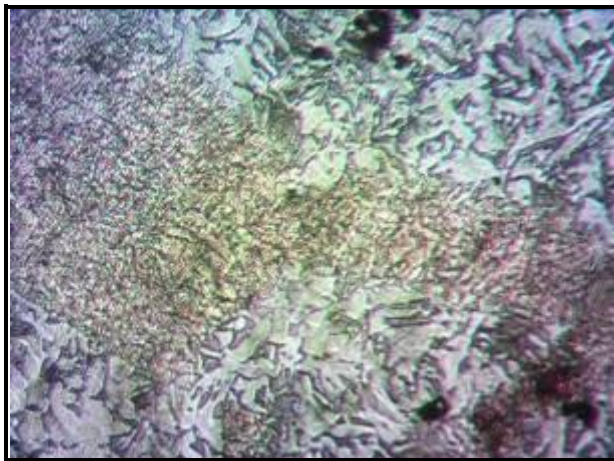


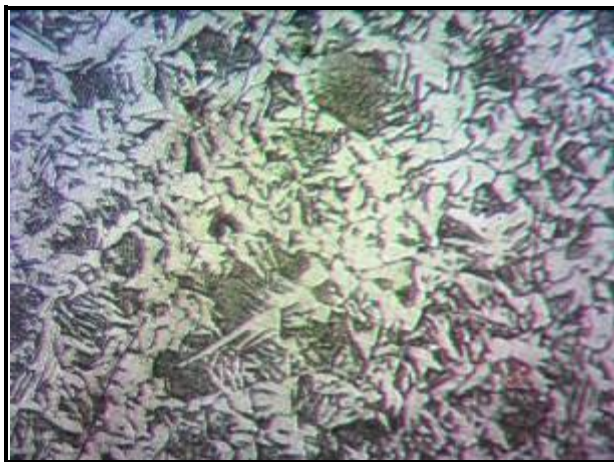
Рис. 4. Дослідження деформації структурних складових : а-в – сталь Ст3сн; з-е – сталь 09Г2С; а, в – зразок № 1; б, з – зразок № 2; в, е – зразок № 3 / Fig. 4. Investigation of deformation of structural components : а-с – Ст3сн steel; д-ф – 09Г2С steel; а, с – specimen No. 1; б, д – specimen No. 2; е, ф – specimen No. 3



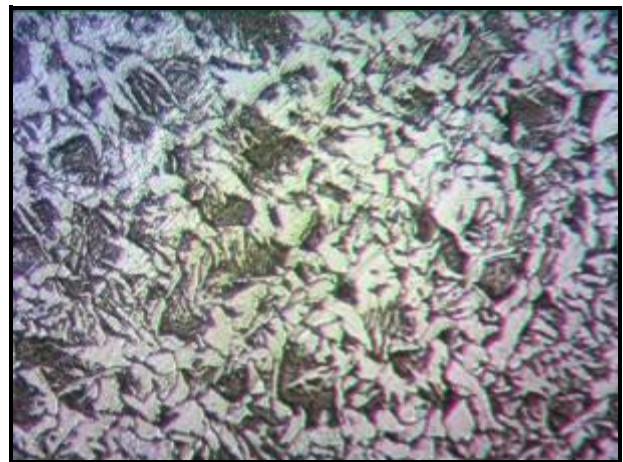
a ($\times 500$)



z (*d*) ($\times 500$)



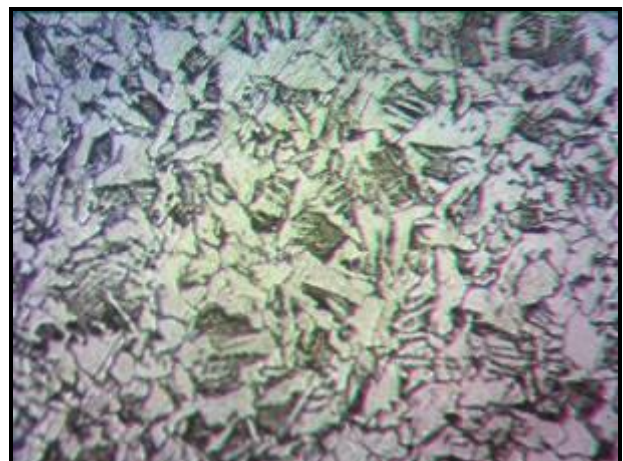
б (*b*) ($\times 500$)



д (*e*) ($\times 500$)



в (*c*) ($\times 500$)



е (*f*) ($\times 500$)

Рис. 5. Дослідження деформації структурних складових : а-в – сталь 10XCHД; з-е – сталь 10Г2ФБ; а, в – зразок № 1; б, з – зразок № 2; в, е – зразок № 3 / Fig. 5. Investigation of deformation of structural components: а-с – 10XCHД steel; д-ф – 10Г2ФБ steel; а,с – specimen No. 1; б, д – specimen No. 2; в, ф – specimen No. 3

Наукова новизна та практична цінність

Отриманні в роботі результати показують взаємозв'язок між зовнішнім навантаженням та відповідним розповсюдженням пластичної деформації з урахуванням структурного стану.

Висновки

1. Після проведення лабораторної термічної обробки в структурі сталей з'явилися продукти проміжного та зсувного механізмів формування структури. Результати металографічного аналізу, показали, що структура усіх досліджуваних марок сталей містить конгломерат структурних складових, який складається з доєвтектоїдного фериту, бейніту та мартенситу.

2. В ході проведення дослідження розподілу деформації по структурним складовим встановлено: для сталі 10ХСНД зі збільшенням навантаження спостерігається значне деформування феритної фази та колоній бейніту вздовж смуг прикладання навантаження, при цьому пластична деформація не викликає значних змін у мартенситі; для сталі Ст3 спостерігається аналогічна ситуація, при цьому спостерігається значна деформація бейнітної

складової, яка затиснута між зернами фериту; для сталі 09Г2С із збільшенням навантаження спостерігається значна деформація бейніту, котра виражається в руйнуванні міжреєчних проміжків і укрупнення рейок бейнітного фериту що є наслідком дії дотичної складової пластичної деформації; для сталі 10Г2ФБ спостерігається деформаційна фрагментація феритної фази та незначна деформація мартенситу.

3. З метою виявлення розповсюдження пластичної деформації у сталях із структурою проміжного типу було проведено вимірювання геометричних розмірів бейнітних колоній до та після деформації з відповідними навантаженнями. Результати проведених розрахунків показали, що для сталі 10ХСНД відносна деформація бейнітних колоній в середньому склала 70 %; для сталі Ст3 – 90 %; для сталі 09Г2С – 50 %; для сталі 10Г2ФБ – 90 %.

4. Встановлено, що деформація структурних складових по довжині зразків для всіх марок сталі, що досліджувалися, розподіляється не рівномірно. Показно, що деформація бейнітної складової збільшується в напрямку від захвату зразків до їх середини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Новые методы оценки сопротивления хрупкому разрушению / Под редакцией академика Ю. И. Работнова. – Москва : Мир, 1972. – 440 с. – Режим доступа : <http://www.mexanik.ru/0924/ann0924.htm>
2. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения : монография / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1987. – 80 с. – Режим доступа : <https://www.twirpx.com/file/473828/>
3. Жесткость и прочность стальных деталей : монография / Я. Немец. – Москва : Машиностроение, 1970. – 528 с. – Режим доступа : <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=ru&blang=ru&page=Book&id=84315>
4. Фрактография и атлас фрактограмм : справочник / Под ред. Дж. Феллоуза. – Москва : Металлургия, 1982. – 487 с. – Режим доступа : http://www.studmed.ru/fellouz-dzh-red-fraktografiya-i-atlas-fraktogramm_8755fb847c6.html
5. Пластичность и разрушение / Под ред. В. Л. Колмогорова. – Москва : Металлургия, 1977. – 366 с. – Режим доступа : <https://www.twirpx.com/file/347296/>
6. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов : учеб. для вузов / В. С. Золотаревский. – Москва : Металлургия, 1983. – 352 с. – Режим доступа : http://www.studmed.ru/zolotarevskiy-vs-mekhanicheskie-svoystva-metallov_ff2f9efe786.html
7. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями № 1, 2, 3). Дата введения 1986-01-01. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/gost-1497-84>

REFERENCES

1. *Novi metody otsinky oporu krykhhkomu ruynuvannyyu* [New methods for assessing the resistance to brittle fracture]. Edited by Yu.I.Rabotnov, Moscow : Mir, 1972, 440 p. (in Russian).
2. Rabotnov Yu.N. *Vvedeniye v mekhaniku razrusheniya* [Introduction to Fracture Mechanics]. Moscow : Nauka Publ., 1987, 80 p. (in Russian).
3. Nemetz Ya. *Zhestkost' i prochnost' stal'nykh detaley* [Stiffness and strength of steel parts]. Moscow : Mashinostroyeniye, 1970, 528 p. (in Russian).
4. *Fraktografiya i atlas fraktogramm* [Fractography and atlas]. Edited by Dzh. Fellouza. Moscow : Metallurgiya Publ., 1982, 487 p. (in Russian).
5. *Plastichnost' i razrusheniye* [Plasticity and destruction]. Edited by V.L. Kolmogorova. Moscow : Metallurgiya Publ., 1977, 366 p. (in Russian).
6. Zolotarevskiy V.S. *Mekhanicheskiye svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1983, 352 p. (in Russian).

7. GOST 1497-84. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazheniye (s Izmeneniyami N 1, 2, 3)* [Metals. Methods of tensile testing (with Changes No. 1, 2, 3). Introduction date 1986-01-01. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. І. Большаковим (Україна); д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевою (Україна).

Надійшла до редакції 25.02.2019.

Прийнята до друку 29.02.2019.

УДК 669.017:621.771:621.785.66-97

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260319.70.304

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ПРОКАТКИ ПОСЛЕДЕФОРМАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ V-Nb-Al-СОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ

СТАВРОВСКАЯ В. Е.¹,
ЕФРЕМЕНКО В. Г.², д. т. н., проф.,
ЗОТОВ Д. С.^{3*}, к. т. н.,
САГИРОВ Р. И.⁴
ЗУРНАДЖИ В. И.⁵
ЧАБАК Ю. Г.⁶, к. т. н.

¹ ЧАО «МК «АЗОВСТАЛЬ», ул. Лепорского, 1, 87500, Мариуполь, Украина, тел. + 38 (0629) 46-50-77, e-mail: vera.stavrovskaya@metinvestholding.com

² Кафедра физики, Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, 87555, Мариуполь, Украина, тел. + 38 (066) 948-83-25, e-mail: vgefremenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4537-6939

^{3*} ЧАО «МК «АЗОВСТАЛЬ», ул. Лепорского, 1, 87500, Мариуполь, Украина, тел. +38 (0629) 46-79-03, e-mail: dmitriy.zotov@metinvestholding.com

⁴ ЧАО «МК «АЗОВСТАЛЬ», ул. Лепорского, 1, 87500, Мариуполь, Украина, тел. +38 (0629) 46-72-28, e-mail: ruslan.sagirov@metinvestholding.com

⁵ Кафедра физики, Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, 87555, Мариуполь, Украина, тел. + 38 (096) 398-11-25, e-mail: vadim.zurnadzhy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0290-257X

⁶ Кафедра физики, Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, 87555, Мариуполь, Украина, тел. + 38 (097) 218-16-72, e-mail: julia.chabak25@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3743-7428

Аннотация. Постановка проблемы. Конструкционный стальной прокат составляет основную долю производства современной металлургии. Повышение механических свойств проката целесообразно вести в рамках технологий, предусматривающих использование прокатного нагрева, что позволяет экономить энергоносители и снижать себестоимость продукции. **Цель работы.** Выбор рациональной схемы прокатки и последеформационного охлаждения листового проката из конструкционной стали. **Материал и методика.** Материал исследования – листовый прокат толщиной 20 мм из стали S355J2 (EN 10025), микрелегированной комплексом V-Nb-Al. Методика – испытания на механические свойства согласно требованиям EN 10025. **Результаты.** Сопоставлены механические свойства листового проката после выполнения стандартной горячей прокатки, нормализующей прокатки, контролируемой прокатки, а также после контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением по различным режимам. **Выводы.** Показано, что применением контролируемой прокатки с ускоренным до 460-530 °С охлаждением возможно существенно (на треть, у категории 500Q) повысить прочность стали при росте ее хладостойкости и при сохранении пластичности на допустимом уровне. Такое повышение комплекса свойств достигается без применения термообработки со специального нагрева, что является экономически выгодным направлением.

Ключевые слова: конструкционная сталь; листовый прокат; прокатка; ускоренное охлаждение; механические свойства