

УДК 620.181.4:691.714

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.17.1124

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИСКОРЕННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА КІНЕТИКУ РУЙНУВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

БЕКЕТОВ О. В.,<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, доц.,  
ЛАУХІН Д. В.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
ОСИПЧУК М. М.<sup>3</sup>, канд. ф.-м. наук, доц.,  
ПОМАЗАН А. Р.<sup>4</sup>, маг.  
РАДЬКО О. В.<sup>5</sup>, асп.

<sup>1\*</sup> Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 604-61-86, e-mail: [beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua](mailto:beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

<sup>2</sup> Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 585-54-29, e-mail: [Laukhin.D.V@nmu.one](mailto:Laukhin.D.V@nmu.one), ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

<sup>3</sup> Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 831-65-76, e-mail: [osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua](mailto:osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-1524-5479

<sup>4</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: [radko0708@gmail.com](mailto:radko0708@gmail.com), ORCID ID: 0009-0004-2281-6953

<sup>5</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: [radko0708@gmail.com](mailto:radko0708@gmail.com), ORCID ID: 0009-0008-6928-6090

**Анотація.** Розвиток сучасного будівництва ставить все зростаючі вимоги до властивостей матеріалів: підвищення їх механічних і корозійних характеристик. Особливе місце в широкому колі питань, пов'язаних з проблемою експлуатаційної надійності зварювальних металевих конструкцій, посідає вивчення здатності матеріалів чинити опір руйнуванню при статичних і динамічних навантаженнях. При цьому, опір матеріалу поширенню в ньому тріщини визначається його структурою, а саме морфологічними особливостями тонкої будови: розміром структурних складових, дисперсністю і розподілом неметалевих включень, типом внутрішньофазних та міжфазних границь. Саме тому, велике значення має дослідження взаємозв'язку між морфологічними особливостями структурних складових і характеристики руйнування. С цієї точки зору, однією з найбільш цікавих структурних складових є бейніт, тому що сталі з бейнітною структурою володіють високою міцністю при задовільній пластичності. Саме тому, вдосконалення властивостей високоміцного прокату з низьковуглецевих сталей для зварних будівельних металевих конструкцій шляхом з'ясування принципів залежностей між механізмами формування тонкої структури зазначених сталей та кінетикою розповсюдження руйнування є актуальною проблемою як з науковою так і з економічної точок зору. **Мета статті** – визначення взаємозв'язку між режимами післядеформаційного охолодження, кінцевою структурою та морфологією поверхонь руйнування металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. **Висновок.** Проведено комплекс досліджень взаємозв'язку між структурним станом та морфологією поверхонь руйнування низьковуглецевих низьколегованих сталей. Встановлено, що збільшення швидкості охолодження призводить до зростання відсоткового вмісту продуктів бейнітного та мартенситного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту. При цьому показано, що одночасно з відсотковою кількістю зростає також і геометричний розмір відповідних колоній. Шляхом використання макрофрактографічного аналізу показано, що руйнування усіх зразків відбувається переважно по крихкому механізму. При цьому, результати мікрофрактографічного аналізу показали наявність певної кореляції між геометричними розмірами колоній бейніту та/або мартенситу та розмірами ділянок квазікрихкого руйнування. Наявність такої кореляції може свідчити про те, що в процесі руйнування пластична деформація локалізується в ділянках, які мають підвищений рівень внутрішньої енергії, зокрема всередині колоній бейніту та/або мартенситу.

**Ключові слова:** структурний стан; контрольована прокатка; низьковуглецева низьколегована сталь; прискорене охолодження; бейнітна складова; мартенситна складова; поверхня руйнування; квазікрихке руйнування

## STUDY OF THE INFLUENCE OF ACCELERATED COOLING ON THE KINETICS OF DESTRUCTION OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS

BEKETOV O.V.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
LAUKHIN D.V.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
OSYPCHUK M.M.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Phys. And Math.), Assoc. Prof.*,  
POMAZAN A.R.<sup>4</sup>, *Master's degree*,  
RADKO O.V.<sup>5</sup>, *PhD Stud.*

<sup>1\*</sup> Department of Fundamental and Natural Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 604-61-86, e-mail: [beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua](mailto:beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

<sup>2</sup> Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 585-54-29, e-mail: [d.v.laukhin@gmail.com](mailto:d.v.laukhin@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

<sup>3</sup> Department of Fundamental and Natural Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 831-65-76, e-mail: [osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua](mailto:osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-1524-5479

<sup>4</sup> Department of Materials Science and Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 650-90-22, ORCID ID: 0009-0004-2281-6953

<sup>5</sup> Department of Materials Science and Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 650-90-22, e-mail: [radko0708@gmail.com](mailto:radko0708@gmail.com), ORCID ID: 0009-0008-6928-6090

**Abstract.** The development of modern construction places ever-increasing demands on the properties of materials: improving their mechanical and corrosion characteristics. A special place in the wide range of issues related to the problem of operational reliability of welded metal structures is occupied by the study of the ability of materials to resist destruction under static and dynamic loads. At the same time, the material's resistance to crack propagation in it is determined by its structure, namely the morphological features of the fine structure: the size of the structural components, the dispersion and distribution of non-metallic inclusions, the type of intraphase and interphase boundaries. That is why the study of the relationship between the morphological features of the structural components and the characteristics of destruction is of great importance. From this point of view, one of the most interesting structural components is bainite, because steels with a bainite structure have high strength with satisfactory plasticity. That is why the improvement of the properties of high-strength rolled products from low-carbon steels for welded building metal structures by elucidating the fundamental relationships between the mechanisms of the formation of the fine structure of the specified steels and the kinetics of fracture propagation is an urgent problem from both a scientific and an economic point of view. **Purpose of the article.** determining the relationship between post-deformation cooling regimes, the final structure and morphology of fracture surfaces of rolled metal from low-carbon, low-alloy steels. **Conclusion.** A set of studies on the relationship between the structural state and the morphology of the fracture surfaces of low-carbon, low-alloy steels has been conducted. It was established that an increase in the cooling rate leads to an increase in the percentage content of the products of bainite and martensitic mechanisms of transformation of undercooled austenite. At the same time, it is shown that the geometric size of the corresponding colonies also increases simultaneously with the percentage number. By using macrofractographic analysis, it is shown that the destruction of all samples occurs mainly by a brittle mechanism. At the same time, the results of the microfractographic analysis showed the presence of a certain correlation between the geometric sizes of the bainite and/or martensite colonies and the sizes of the areas of quasi-brittle fracture. The presence of such a correlation may indicate that in the process of destruction, plastic deformation is localized in areas that have an increased level of internal energy, in particular within the colonies of bainite and/or martensite.

**Keywords:** *structural condition; low-carbon low-alloy steel; accelerated cooling; bainite component; martensitic component; failure surface; quasi-brittle fracture*

**Постановка проблеми.** Розвиток сучасного будівництва ставить все зростаючі вимоги до властивостей матеріалів: підвищення їх механічних і корозійних характеристик [1]. 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 внаслідок 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 тріщини визначається його структурою, а саме морфологічними особливостями тонкої будови: розміром структурних складових, дисперсністю і розподілом неметалевих включень, типом внутрішньофазних та міжфазних границь [2].

Саме тому, вдосконалення властивостей високоміцного прокату з низьковуглецевих сталей для зварних будівельних металевих конструкцій шляхом з'ясування принципів залежностей між механізмами формування тонкої структури зазначених сталей та кінетикою розповсюдження руйнування є актуальною проблемою як з науковою так і з економічної точок зору.

**Аналіз публікацій.** У сучасному будівництві, при ускладненні та посиленні умов експлуатації відповідальних конструкцій, надзвичайно актуальною стала проблема створення матеріалів і видів їх обробки, що забезпечують, поряд з високою міцністю, достатню тріщиностійкість [3]. На теперішній час, в залежності від умов експлуатації готової конструкції, металопрокат може поставлятися у

різноманітному структурному стані: відпущений мартенсит; з ферито-перлітною, ферито-бейнітною або ферито-мартенситною структурою [3]. При цьому, однією з найбільш цікавих структурних складових є бейніт, тому що сталі з бейнітною структурою володіють високою міцністю при задовільній пластичності [4].

З цієї точки зору, велике значення має дослідження взаємозв'язку між морфологічними особливостями структурних складових і характеристики руйнування. Серед фізичних методів вивчення зв'язку складу і структури матеріалу з комплексом його експлуатаційних властивостей особливе місце відводиться дослідженню поверхонь руйнування (зламів) [5], оскільки злам найбільш чітко відображає будову матеріалу в локальному обсязі, в якому протікає процес руйнування [6].

**Мета статті** – визначення взаємозв'язку між режимами післядеформаційного охолодження, кінцевою структурою та морфологією поверхонь руйнування металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей.

**Результати досліджень.** У якості матеріалу для дослідження було обрано низьковуглецеву низьколеговану сталь 10Г2ФБ, хімічний склад якої наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 10Г2ФБ

Товщина, мм	Елемент, %									
	C	Mn	Si	S	Cr	Ti	Mo	V	Nb	Fe
20	0,16	1,28	0,24	0,004	0,02	0,015	0,001	0,061	0,038	зал

На підставі результатів, які отримано в роботі [7] було обрано набір швидкостей охолодження для отримання в структурі сталі різної відсоткової кількості продуктів проміжного та зсувного механізмів перетворення аустеніту. Відповідно, з метою отримання заданого структурного стану зразки сталі піддавали термічній обробці з окремого нагріву згідно схеми, наведеної на рисунку 1.

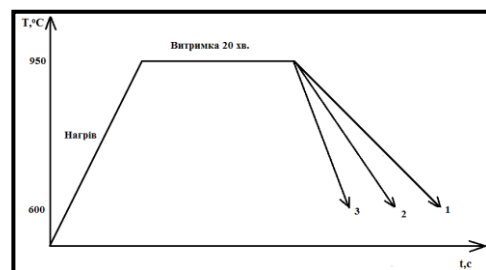


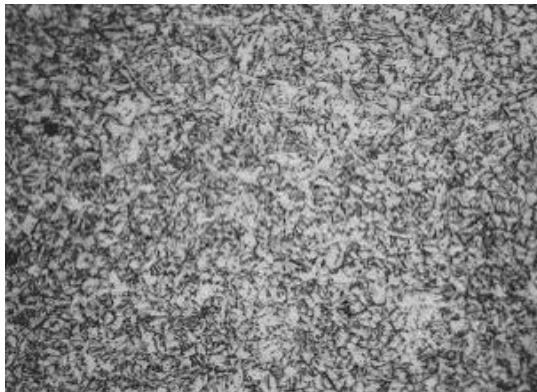
Рис. 1. Схема термічної обробки з окремого нагріву зразків сталі 10Г2ФБ: 1 – технічне масло ( $V_{охол} \approx 12 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ); 2 – холодна вода ( $V_{охол} \approx 26 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ); 3 – 10% розчин NaCl у воді ( $V_{охол} \approx 34 \text{ }^\circ\text{C/c}$ )

Дослідження структурного стану, фрактографічний аналіз поверхонь зламів і кількісний аналіз отриманих даних здійснювали з застосуванням растрового електронного мікроскопу РЕМ-106І згідно рекомендацій наведених у роботі [8].

Результати відповідних мікро-структурних досліджень представлено на рисунку 2. Аналіз наведених даних свідчить про те, що при охолодженні зі швидкістю

12 °С/с формується 30 % феритної фази. Залишковий аустеніт розпадається на бейніт (65 %) та мартенсит (5 %) (рис. 2 а, б).

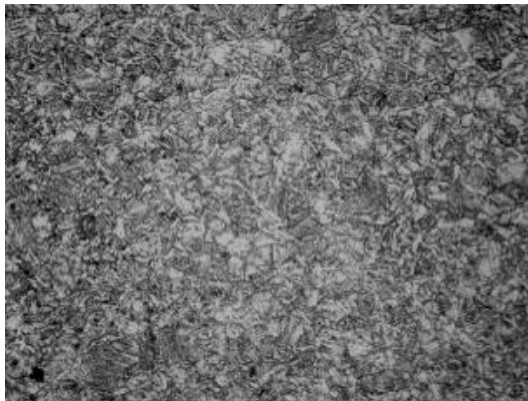
Подальше збільшення швидкості охолодження (гартування у холодну воду) призводить до зменшення кількості феритної фази, її вміст становить вже не більше 15 %. Одночасно спостерігається збільшення кількості мартенситу до 15 % та бейніту ~70 % (рис. 2 в, г).



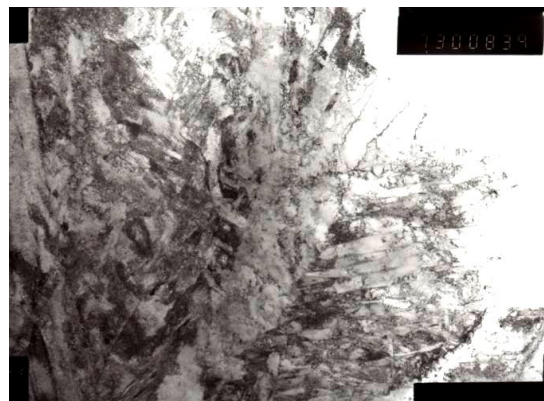
а (×500)



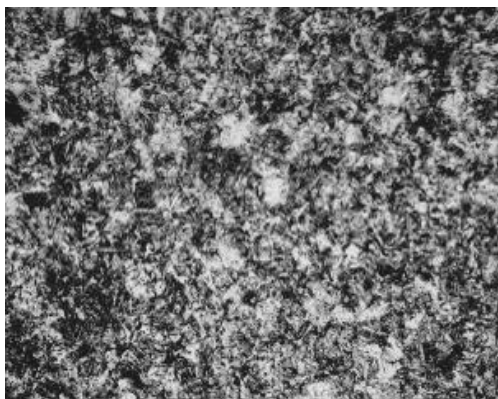
б (×22 000)



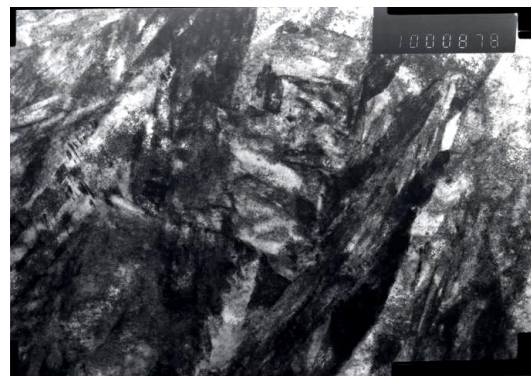
в (×500)



г (×15 000)



д (×500)



е (×20 000)

Рис. 2. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ після охолодження зі швидкостями:  
а, б – 12 °С/с; в, г – 26 °С/с; д, е – 34 °С/с

Охолодження зі швидкістю 34 °C/c призводить до формування по границям колишнього аустеніту дрібнодисперсного фериту. При цьому, структура являє собою бейнітно-мартенситний конгломерат з невеликою кількістю доевтектоїдного фериту, який розташовується навколо бейнітної складової. Бейнітні колонії мають ярко виражену рейкову морфологію (рис. 2 д, е). Вміст фериту складає не більше 10 %, вміст бейніту та мартенситу становить 60 % та 30 % відповідно.

Результати підрахунків геометричних розмірів структурних складових, які формуються за зсувним механізмом перетворення представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

**Геометричні розміри колоній бейнітну та мартенситу**

Швидкість охолодження	12 °C/c	26 °C/c	34 °C/c
Середній розмір колоній	24 мкм	30,5 мкм	34,2 мкм

Аналіз наведених даних показує, що збільшення швидкості охолодження призводить до зростання геометричних розмірів колоній бейніту та мартенситу. Це пояснюється тим, що збільшення швидкості охолодження призводить до зниження швидкості дифузійних процесів, які відбуваються під час перетворення переохолодженого аустеніту. Як наслідок, майже не відбувається формування бар'єрів на фронті зростаючої колонії, що дає можливість колонії збільшувати власні розміри.

Для оцінки взаємозв'язку між структурним станом та морфологією поверхонь руйнування було виконано комплекс фрактографічних досліджень. Оцінку кількості в'язкої та крихкої складової у зламах здійснювали шляхом застосування макрофрактографічного аналізу.

Проведений комплекс досліджень показав, що в зразку охолодженому у технічному маслі, зі швидкістю ~ 12 °C/c, руйнування проходить переважно по крихкому механізму, кількість в'язкої

складової ~27 %. У зламі зразка, який було охолоджено у холодну воду ( $V_{\text{охол}} \approx 26 \text{ °C/c}$ ) кількість в'язкої складової зменшилася до 20 %. Охолодження у 10 % розчині NaCl ( $V_{\text{охол}} \approx 34 \text{ °C/c}$ ) призводить до появи не більше ніж 8 % в'язкого зламу.

Дані мікрофрактографічного аналізу наведено на рисунку 3.

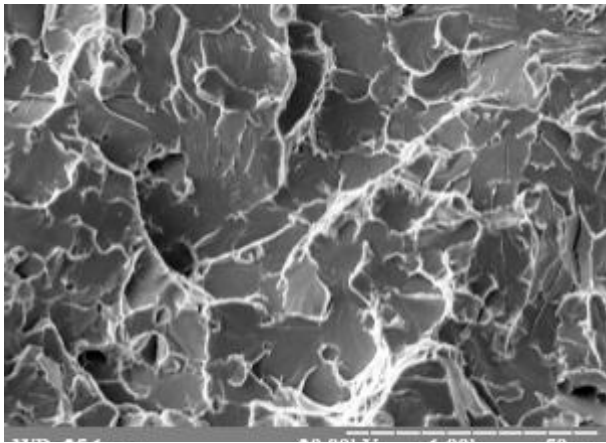
Охолодження зі швидкістю 12 °C/c (рис. 3 а, б) сприяло формуванню структури бейніту та фериту (65 % та 30 % відповідно), залишок це мартенсит – 5 %. При такому структурному стані руйнування проходить з наявністю в'язкої та крихкої фаз у співвідношенні 73 % на 27 %. При цьому, ступінь пластичної деформації перед злиттям порожнин залежить головним чином від відстані між сусідніми порожнинами, що у свою чергу часто визначається щільністю розподілу часток, що випали. Разом з цим, у зразку спостерігається наявність внутризеренного руйнування, присутній також квазікрихкий злам.

Квазівідрив на початковій стадії утворення фасетки виявляє ознаки переважно кристалітного відриву, тоді як у місцях злиття мікротріщин виявляються ознаки пластичного руйнування.

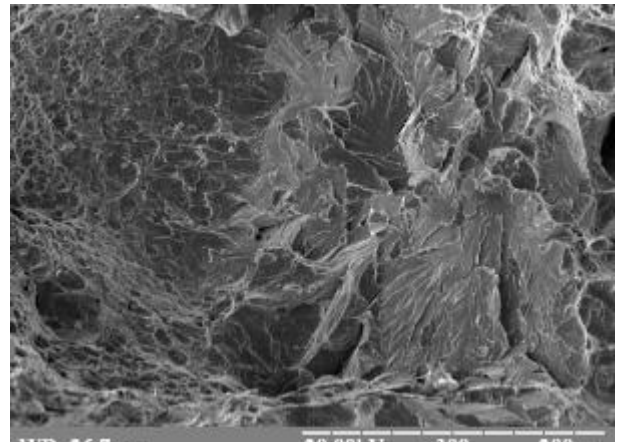
Фактографічний аналіз зламу зразка, що охолоджувався у холодній воді, зі швидкістю ~ 26 °C/c, показує що крихкий злам збільшується, порівняно зі зразком охолодженим у масло, і становить вже близько 80 %. Цьому сприяє зменшення вмісту феритної фази на користь бейнітно - мартенситної складової, яка складає відповідно 70 % та 15 %. Такий структурний стан сприяє збільшенню твердості, а відповідно і крихкості матеріалу.

Завдяки мартенситу ступінь пластичної деформації теж зменшується. Мікрофрактографічний аналіз показав, що руйнування відбувалося за рахунок злиття мікропорожнин (на поверхні зламу наявні елементи, які свідчать, що руйнування відбулося шляхом злиття мікропорожнин), так і за рахунок внутризереного руйнування вірогідно бейнітних та/або мартенситних колоній.

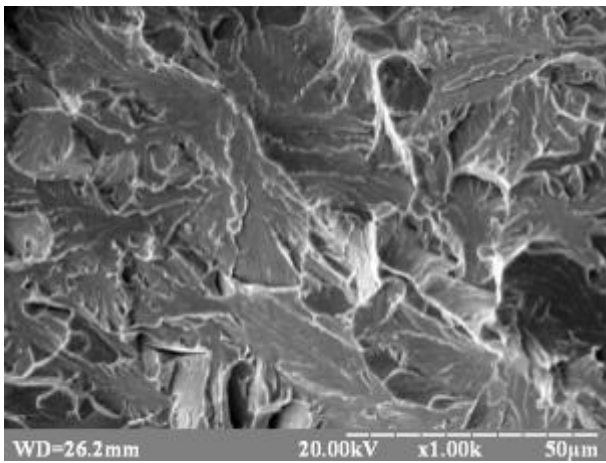




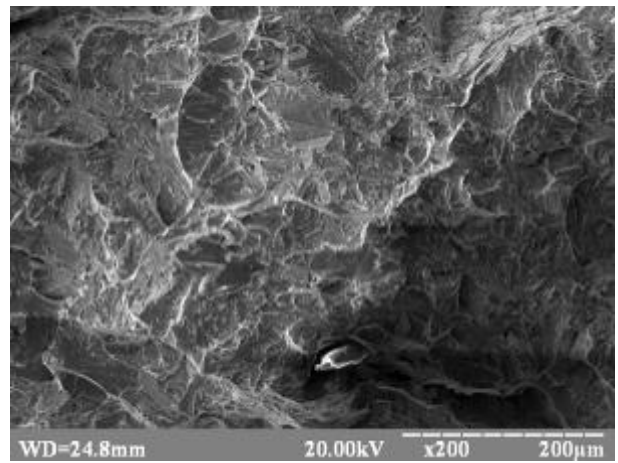
*a*



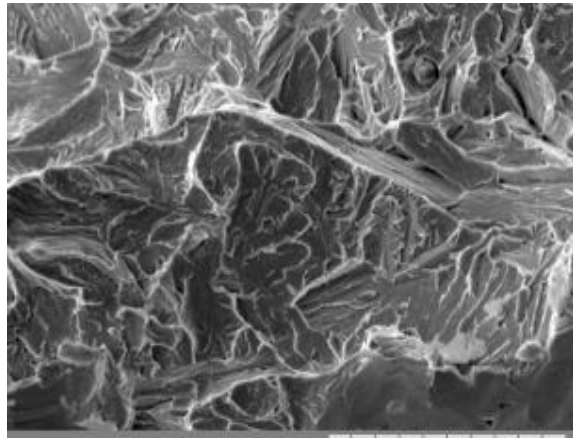
*б*



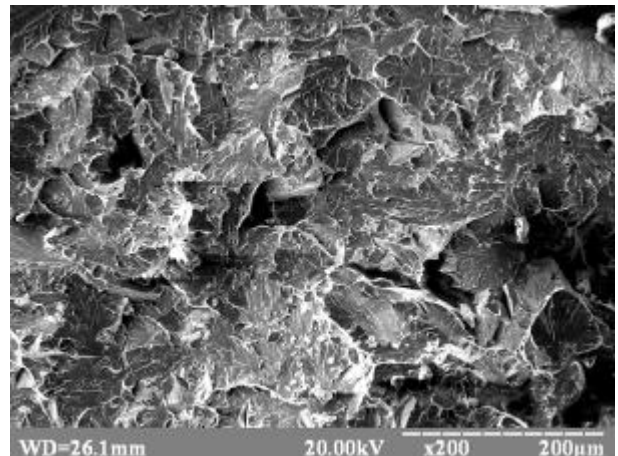
*в*



*г*



*д*



*е*

*Рис. 3. Структура зламів сталі 10Г2ФБ після охолодження зі швидкостями:  
а, б – 12 °С/с; в, г – 26 °С/с; д, е – 34 °С/с*

Після охолодження у солоній воді (10 % NaCl) в зразку зформувалася бейнітно–мартенситна структура (60 % та 30 % відповідно) та феритна складова структури (не перевищує 10 %). Аналіз зламу зразка показує, що крихка складова зламу складає

~ 92 %. В зразку переважає внутризеренне руйнування, яке може проходити при майже повній відсутності пластичної деформації. Зона поширення тріщини представляє типовий квазіотрив з незначними ознаками пластичної деформації.



а



б

Рис. 4. Кількісний аналіз поверхонь руйнування:  
 а – залежність відсоткового вмісту крихкої складової зламу від швидкості охолодження;  
 б – залежність розмірів ділянок квазікрихкого руйнування від швидкості охолодження

Для виявлення закономірностей між структурним станом сталі та механізмом руйнування було проведено кількісний аналіз відсоткового вмісту крихкої складової зламу та розмірів ділянок квазікрихкого руйнування в залежності від швидкості охолодження. Відповідні дані узагальнено та наведено на рисунку 4.

## Висновки

1. Проведений комплекс досліджень дозволив проаналізувати взаємозв'язок між структурним станом та морфологією поверхонь руйнування низьковуглецевих низьколегованих сталей.

2. Встановлено, що збільшення швидкості охолодження призводить до зростання відсоткового вмісту продуктів бейнітного та мартенситного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту. При цьому показано, що одночасно з відсотковою кількістю зростає також і геометричний розмір відповідних колоній. Це обумовлено тим, що при охолодженні з великою швидкістю подавляється ріст феритних зерен і збільшується інші структурні складові.

3. Макрофрактографічний аналіз показує, що руйнування усіх зразків відбувається переважно по крихкому механізму. При цьому, результати мікрофрактографічного аналізу показали наявність певної кореляції між геометричними розмірами колоній бейніту та/або мартенситу та розмірами ділянок квазікрихкого руйнування.

4. При збільшенні швидкостей охолодження зразків, а значить і розміру колоній бейніту та або мартенситу пропорційно зменшується і відстань між зонами квазікрихкого руйнування. Цей факт дозволяє припустити, що пластична деформація локалізується в областях з більш високим ступенем енергії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Паламарчук О., Петришина С. Будівельна галузь України: стан та прогнози. *Економіка та суспільство*. 2023. № 51. С. 125–131. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2497>
2. Бекетов О. В., Большаков В. І., Лаухін Д. В., Іванцов С. В., Лаухін В. Д. Дослідження взаємозв'язку між характеристиками руйнування та структурними складовими низьковуглецевих мікролегованих сталей. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 1 (72). С. 53–58. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/53-58>
3. ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 23 с. (Інформація та документація). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=64876](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64876)
4. De Cooman B. Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8. Pp. 285–303. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359028604000804>
5. Caballero F. G., Miller M. K., Garcia-Mateo C. Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel. *Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. Pp. 889–898. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00400.x>

<https://www.researchgate.net/publication/216224719> Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel

6. Laukhin D. V., Beketov O. 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. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017. Vol. 39, № 10. Pp. 1335–1343. URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i10/1335.html>

7. Бекетов О. В., Іванцов С. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О., Бабенко Є. О. Дослідження загальних особливостей розповсюдження пластичної деформації в сталях з феррито-перлітною структурою. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування.* 2017. Вип. 95. С. 26–34. URL: <http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/100189>

8. Stokes D. J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 221 p. URL : <https://www.researchgate.net/publication/285935810> Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy VP-ESEM

## REFERENCES

1. Palamarchuk O. and Petryshyna S. *Budivelna haluz Ukrainy : stan ta prohnozy* [The construction industry of Ukraine : state and forecasts]. *Ekonomika ta suspilstvo* [Economy and Society]. 2023, no. 51, pp. 125–131. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2497> (in Ukrainian).

2. Beketov O.V., Bolshakov V.I., Laukhin D.V., Ivantsov S.V. and Laukhin V.D. *Doslidzhennia vziaimozv'iazku mizh kharakterystykamy ruynuvannia ta strukturnymy skladovymy nyzkovuhletsevykh mikrolehovanykh stalei* [Research on the relationship between fracture characteristics and structural components of low-carbon microalloyed steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Science Metal and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 1 (72), pp. 53–58. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/53-58> (in Ukrainian).

3. *DSTU 8539:2015. Prokat dlia budivelnykh stalevykh konstruktii. Zahalni tekhnichni umovy* [Rolls for building steel structures. General technical conditions]. [Chynnyi vid 2016-07-01]. Kyiv, 2015, 23 p. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=64876](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64876) (in Ukrainian).

4. De Cooman B. Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 2004, vol. 8, pp. 285–303. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359028604000804>

5. Caballero F.G., Miller M.K. and Garcia-Mateo C. Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel. *Materials Science and Technology.* 2010, vol. 26, pp. 889–898. URL: <https://www.researchgate.net/publication/216224719> Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel

6. Laukhin D.V., Beketov O.V., Rott N.O., Tyuterev I.A., Ivantsov S.V. and Laukhin V.D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017, vol. 39, no. 10, pp. 1335–1343. URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i10/1335.html>

7. Beketov O.V., Ivantsov S.V., Tyuterev I.A., Rott N.O. and Babenko Ye.O. *Doslidzhennia zahalnykh osoblyvostei rozpovsiudzhennia plastychnoi deformatsii v staliakh z ferro-perlitnoiu strukturoiu.* [Study of the general features of the propagation of plastic deformation in steels with a ferro-pearlitic structure]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia* [Civil Engineering, Material Science, Engineering]. 2017, vol. 95, pp. 26–34. URL: <http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/100189> (in Ukrainian).

8. Stokes D.J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008, 221 p. URL : <https://www.researchgate.net/publication/285935810> Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy VP-ESEM

Надійшла до редакції: 16.11.2024.