

УДК 620.181.4:691.714

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270421.36.749

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НА СТРУКТУРНИЙ СТАН НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

БОЛЬШАКОВ В. І.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
ГЕЙЗЕНЦВЕЙ Ю. І.², *здоб.*

^{1*} Кафедра матеріалознавства і обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 47-39-56, e-mail: bolshakov.v.i@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² Кафедра матеріалознавства і обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 611-57-91, e-mail: metkon1951@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1190-5465

Анотація. Постановка проблеми. Розробка та впровадження низьковуглецевих низьколегованих сталей високої міцності в конструктивні елементи споруд доменних печей, які будуть працювати в умовах нагрівання до високих температур є актуальною проблемою і може дати істотний ефект під час експлуатації будівель та споруд. **Мета статті** – встановлення змін в структурному стані низьковуглецевих низьколегованих сталей в залежності від підвищення температури. **Висновок.** Умовно температури, за яких можуть експлуатуватися досліджувані сталі, можна поділити на два рівні: температура, нижче за яку не виявляється значних структурних змін; температура, за якої спостерігаються значні структурні зміни, що призводять до зниження надійності конструкцій. Наявність двох рівнів, пов'язаних як із розвитком дифузійних процесів, так і зі здатністю структурного стану опиратися впливу температурних напружень (структурна стійкість). Структурна стійкість сталі при підвищенні температури обумовлена процесами, що наближають систему до положення термодинамічної рівноваги порівняно з низькотемпературним станом (структурний стан за кімнатної температури), яка зазвичай є оптимальною з погляду експлуатаційних властивостей. До таких змін належать процеси рекристалізації, коагуляції виділень та інші фазові перетворення, що призводять до змін макро- та мікроструктури, які погіршують експлуатаційні властивості матеріалу. За відносно високих температур ці процеси відбуваються зі значною швидкістю, внаслідок чого саме вони є вирішальними при обмеженні можливості застосування цього матеріалу.

Ключові слова: *структурний стан; вогнестійкість; низьковуглецеві низьколеговані сталі; температура нагріву*

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE INCREASE ON THE STRUCTURAL STATE OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEEL

BOLSHAKOV V.I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
HEZENTSVEI Yur.I.², *External Cand.*

^{1*} Department of Material Science and Materials Treatment, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 47-39-56, e-mail: bolshakov.v.i@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² Department of Material Science and Materials Treatment, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (067) 611-57-91, e-mail: metkon1951@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1190-5465

Abstract. Problem statement. The development and implementation of low-carbon low-alloy steels of high strength in the structural elements of blast furnaces, which will operate in conditions of heating to high temperatures is an urgent problem and can give a significant effect during the operation of buildings and structures.. **Purpose of the article.** establishing changes in the structural state of low-carbon low-alloy steels depending on the temperature rise. **Conclusion.** Conventionally, the temperatures at which the studied steels can be operated can be divided into two levels: the temperature below which no significant structural changes are detected; temperature at which significant structural changes are observed, which lead to a decrease in the reliability of structures. The presence of two levels associated with both the development of diffusion processes and the ability of the structural state to resist the effects of

temperature stresses (structural stability). The structural stability of steel with increasing temperature is due to the processes that bring the system closer to the position of thermodynamic equilibrium compared to low temperature (structural state at room temperature), which is usually optimal in terms of performance. Such changes include the processes of recrystallization, coagulation of secretions and other phase transformations that lead to changes in the macro- and microstructure that impair the performance properties of the material. At relatively high temperatures, these processes occur at a significant rate, as a result of which they are crucial in limiting the possibility of using this material.

Keywords: *structural condition; fire resistance; low-carbon low-alloy steels; heating temperature*

Постановка проблеми. У комплексі споруд доменних печей кожух є найвідповідальнішим елементом, який сприймає значне технологічне навантаження, особливо внаслідок впливу нерівномірного підвищення температури власних елементів конструкцій. Наприклад, матеріал футерівки кожуха доменної (броня) може нагріватися до температур вище ніж 900 °С. Як наслідок, балки, колони, ферми й інші елементи металоконструкцій можуть втратити міцність, деформуватися а, в деяких випадках, зруйнуватися. Застосування у проектах способів вогнезахисту, рекомендованих типовою серією 400-0-17 «Конструктивні рішення щодо захисту металевих конструкцій від впливу вогню», або нових матеріалів, зокрема вапняних фарб або мінераловатних плит, не дає ефективного захисту, особливо у вузлах з'єднань конструкцій. При цьому, заходи з виконання вогнезахисту є кошторисними, потребують більш частого проведення періодичного відновлення або, у певних випадках, аварійного зупинення та проведення комплексу ремонтних робіт, що призводить до великих фінансових втрат. Таким чином, розробка та впровадження низьковуглецевих низьколегованих сталей високої міцності в конструктивні елементи споруд доменних печей, які будуть працювати в умовах нагрівання до високих температур є актуальною проблемою і може дати істотний ефект під час експлуатації будівель та споруд.

Аналіз публікацій. Сучасні норми захисту споруд доменних печей від впливу температури експлуатації жорстко регламентують границі вогнестійкості. Величини границь вогнестійкості елементів споруд, що виготовляються зі сталі, рекомендовано досягати заходами, що забезпечують теплозахист, із матеріалів, які

мають низьку теплопровідність [1–4]. При цьому не враховуються специфіка роботи металопрокату в реальних виробничих обставинах, а саме наявності середньо- і сильноагресивного середовищ. Як наслідок, появи високого рівня внутрішніх мікронапружень, що зумовлює формування складного напружено-деформованого стану. В результаті, з'являється ймовірність пластичної деформації елементів конструкцій і втрати несучої здатності. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є використання в конструкціях споруд доменних печей високоміцних низьковуглецевих низьколегованих сталей, які можуть витримувати вплив підвищених температур та безаварійно працювати в подібних умовах експлуатації. При цьому, як показано в роботі [5], такі сталі повинні забезпечувати при короткочасному нагріванні до температур 600...700 °С показники міцності на рівні 60...70 % від характеристик, які отримано при випробуваннях за температури 20 °С.

Мета статті – встановити зміни в структурному стані низьковуглецевих низьколегованих сталей в залежності від підвищення температури.

Результати досліджень. Як матеріали для дослідження обрано низьковуглецеві низьколеговані сталі 10Г2ФБЮ, 09Г2С, СтЗсп. Хімічний склад зазначених марок сталей представлено в таблицях 1–3.

Сталь СтЗсп – сталь звичайної якості, яка не містить у своєму складі кошторисних легуючих елементів. Низьколегована сталь марки 09Г2С є наймасовішою сталлю, яка застосовується у будівництві.

Низьколегована високоміцна сталь марки 10Г2ФБЮ має у складі легувальні елементи ванадій та ніобій, які характерні для вогнестійких марок сталей.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 10Г2ФБЮ

Нормативні вимоги	Масова частка елементів, %										
	C	Mn	Si	S	p	Cr	Ni	Cu	V	Nb	Ti
до сталі 10Г1ФБЮ за ГОСТом 19281-2014	0,09	1,64	0,55	0,004	0,009	0,03	0,05	0,03	0,05	0,05	0,020
	0,08... 0,13	1,60... 1,80	0,15... 0,35	Не більше					0,05... 0,12	0,02... 0,06	0,010... 0,035
				0,035	0,030	0,30	0,30	0,30			

Таблиця 2

Хімічний склад сталі марки 09Г2С

Нормативні вимоги	Масова частка елементів, %										
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V		
до сталі 09Г2С за ГОСТом 19281-2014	0,09	1,64	0,55	0,004	0,009	0,03	0,05	0,03	0,001		
	Не більше 0,12	1,30... 1,70	0,50... 0,80	Не більше							
				0,035	0,030	0,030	0,30	0,30	0,12		

Таблиця 3

Хімічний склад сталі марки СтЗсп

Вимоги для сталі СтЗсп	Масова частка елементів										
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Al		
ДСТУ 2651: 2005	0,16	0,50	0,20	0,004							
ГОСТ 380-2005	0,14... 0,22	0,40... 0,50	0,15... 0,30	Не більше							
				0,04	0,05	0,30	0,030	0,030	-		

Мікроструктура сталей в початковому стані до проведення експерименту по впливу температури (температура +20 °С) наведено на рисунку 1.

Вплив температури на структурний стан сталей, які досліджуються, аналізувався після нагріву до температур +600 °С, +800 °С та витримки з розрахунку 1 хвилина на 1мм площі поперечного перерізу. Результати відповідних мікроструктурних досліджень узагальнено та представлено на рисунку 2.

Спільний аналіз мікроструктур наведених на рисунках 1, 2 даних показує, що структура всіх досліджуваних сталей являє собою ферито-перлітний конгломерат. Із підвищенням температури спостерігаються процеси розпаду перлітної складової структури (що мають дифузійну природу) і процеси рекристалізації феритної складової. Згідно з літературними джерелами (наприклад, [1; 6]) підвищення температури понад 600 °С зумовлює

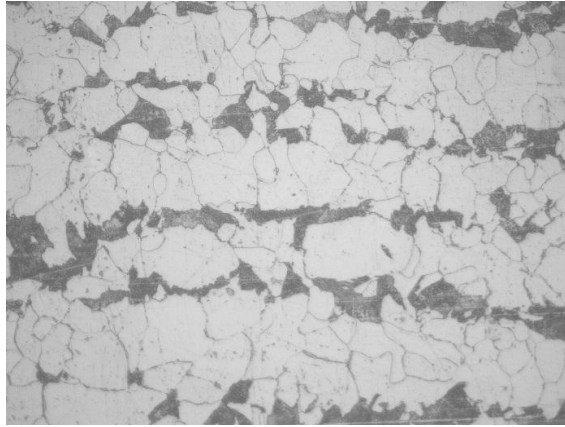
утворення карбо-нітридної фази. Виділення карбідів найчастіше відбувається на межах зерен і залежить від дифузійного перерозподілу вуглецю.

Характерною особливістю сталі 10Г2ФБЮ є наявність у хімічному складі ніобію. Присутність цього хімічного елемента зумовлює формування карбонітридів на межах зерен феритної фази, які роблять додатковий внесок у високотемпературну міцність [7].

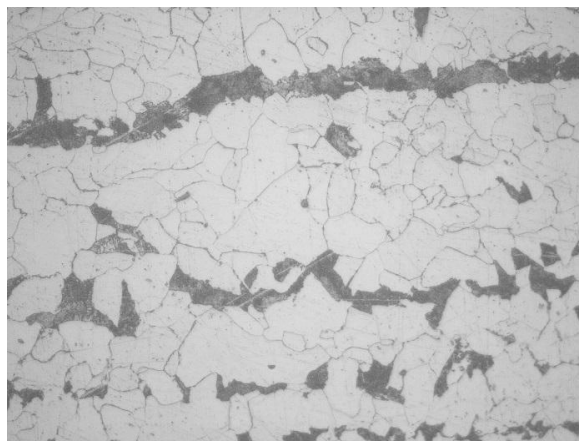
З погляду термодинаміки, підвищення температури спричиняє підвищення швидкості перебігу процесів, що наближають систему до стану термодинамічної рівноваги (розпад перлітної складової та рекристалізація фериту). Ці процеси забезпечуються підвищенням швидкості дифузії (значні зміни в структурі досліджуваних сталей спостерігаються за підвищення температури від 600 до 800 °С) та зумовлюють зниження

мікронапружень і, як наслідок, зниження рівня вільної енергії.

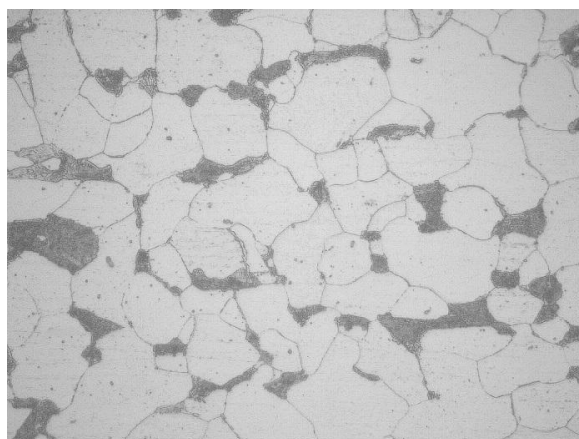
Таким чином, при підвищенні температури в структурі досліджуваних сталей можна виокремити такі процеси:



a ($\times 500$)



б ($\times 500$)



в ($\times 500$)

Рис. 1 Структура сталей, які досліджувались, у стані постачання (температура +20 °С):
a – сталь 10Г2ФБЮ; *б* – сталь 09Г2С;
в – сталь Ст3сп

- зниження ступеня внутрішніх мікронапружень;
- рекристалізація феритної складової;
- розпад твердих розчинів;
- коагуляція карбо-нітридної фази (виділення цементитної складової на межах зерен, що добре видно на сталі 09Г2С і 10Г2ФБЮ).

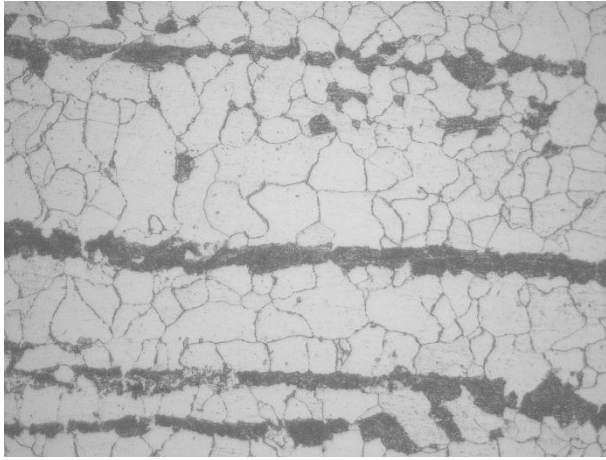
Для виявлення впливу підвищення температури на відсоткове співвідношення структурних складових було виконано кількісний аналіз із використанням методу січних. Результати подано в таблиці 4.

Аналіз даних, наведених у таблиці 4, показує, що для досліджуваних марок сталей підвищення температури не спричиняє зміну відсоткового співвідношення структурних складових — фериту та перліту). Для виявлення впливу підвищення температури на геометричні розміри структурних складових було виконано кількісний аналіз, результати якого подано в таблиці 5.

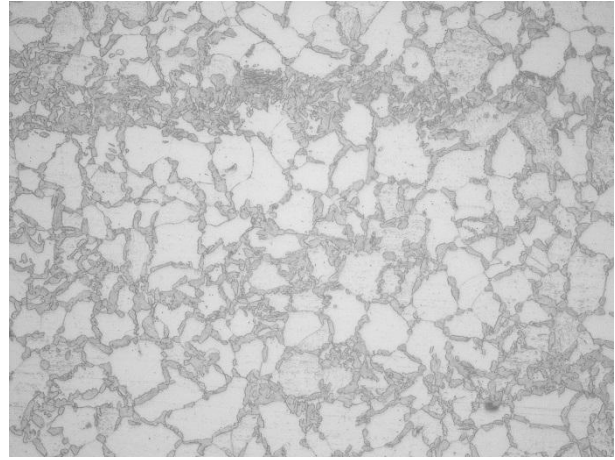
Аналіз даних, наведених у таблиці 5, показує, що зі збільшенням температури спостерігається зростання розмірів феритної складової для всіх досліджуваних марок сталей. Збільшення геометричних розмірів феритної складової пояснюється процесами рекристалізації. Зменшення розмірів перлітної складової зумовлено процесами розпаду перліту і підвищенням температури. Таким чином, проведений комплекс досліджень дозволив встановити, що для сталі Ст3сп зі збільшенням температури від 20 до 600 °С відсоткове співвідношення структурних складових не змінюється, як і їх геометричний розмір. При підвищенні температури до 800 °С геометричний розмір колоній зменшується, самі колонії розміщуються на межах зерен фериту, при цьому їх кількість збільшується (рис. 2 *д, е*). Відсоткове співвідношення структурних складових не змінюється з підвищенням температури. Для сталі 09Г2С зі збільшенням температури від 20 до 600 °С співвідношення структурних складових не змінюється, як і їх геометричний розмір. За підвищення температури до 800 °С спостерігається роздрібнення перлітних

колоній, що свідчить про процеси розпаду перліту (рис. 2 *в, з*). Для сталі 10Г2ФБЮ зі збільшенням температури від 20 до 600 °С

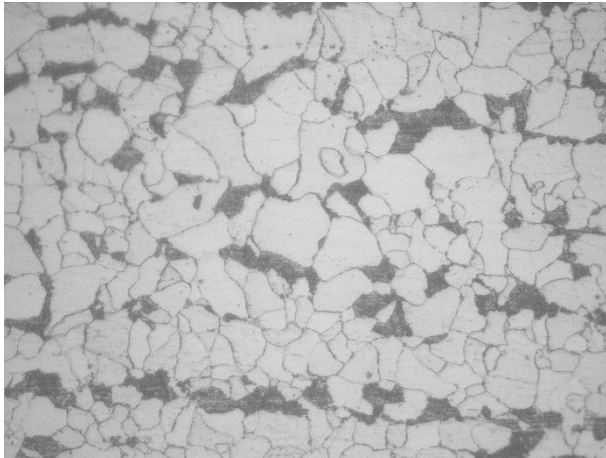
відсоткове співвідношення структурних складових не змінюється, як і їх геометричний розмір.



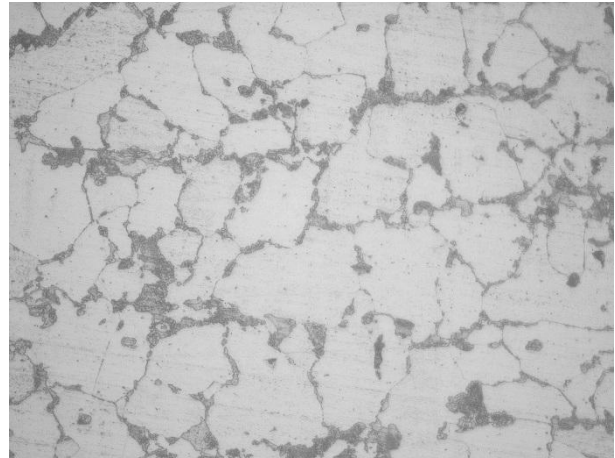
a (×500)



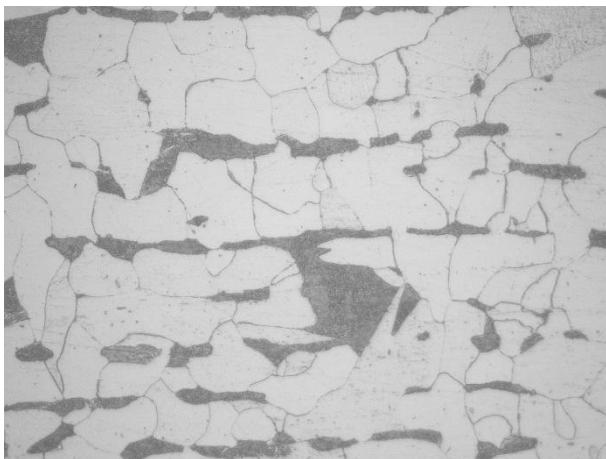
б (×500)



в (×500)



з (×500)



д (×500)



е (×500)

Рис. 2. Структура досліджуваних сталей після нагріву: а, б – сталь 10Г2ФБЮ; в, з – сталь 09Г2С; д, е – сталь Ст3сп; а, в, д – температура нагріву +600 °С; б, з, е – температура нагріву +800 °С

Таблиця 4

Відсоткове співвідношення структурних складових

Температура, °С	Марка сталі					
	СтЗсп		09Г2С		10Г2ФБЮ	
	% Фер	% Пер	% Фер	% Пер	% Фер	% Пер
20	60	40	70	30	80	20
600	60	40	70	30	80	20
800	60	40	70	30	80	20

Таблиця 5

Геометричні розміри структурних складових

Температура, °С	Марка сталі					
	СтЗсп		09Г2С		10Г2ФБ	
	Дф, мм	Дп, мм	Дф, мм	Дп, мм	Дф, мм	Дп, мм
20	0,037	0,033	0,021	0,022	0,018	0,020
600	0,036	0,034	0,023	0,020	0,020	0,018
800	0,056	0,018	0,030	0,017	0,030	0,015

За підвищення температури до 800 °С спостерігається роздрібнення перлітних колоній, що свідчить про процеси розпаду перліту (рис. 2 б).

Висновки

1. Умовно температури, за яких можуть експлуатуватися досліджувані сталі, можна поділити на два рівні: температура, нижче за яку не виявляється значних структурних змін; температура, за якої спостерігаються значні структурні зміни, що призводять до зниження надійності конструкцій. Наявність двох рівнів, пов'язаних як із розвитком дифузійних процесів, так і зі здатністю структурного стану опиратися впливу температурних напружень (структурна стійкість).

2. Структурна стійкість сталі при підвищенні температури обумовлена процесами, що наближають систему до положення термодинамічної рівноваги порівняно з низькотемпературним станом (структурний стан за кімнатної температури), яка зазвичай є оптимальною з погляду експлуатаційних властивостей. До таких змін належать процеси рекристалізації, коагуляції виділень та інші фазові перетворення, що призводять до змін макро- та мікроструктури, які погіршують експлуатаційні властивості матеріалу. За відносно високих температур ці процеси відбуваються зі значною швидкістю, внаслідок чого саме вони є вирішальними при обмеженні можливості застосування цього матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вахитова Л. Н., Калафат К. В. Основы огнезащиты стальных конструкций. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2015. № 2. С. 25–32.
2. Морозов Ю. Д. Огнестойкие строительные стали. *Металлургия*. 2007. № 7. С. 34–45.
3. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. Москва : Пожарная безопасность и наука, 2001. 159 с.
4. Сорокин А. А. Работа конструкций доменных печей. Москва : Metallurgia, 1976. 259 с.
5. Гезенцевей Ю. І. Внутрішні критерії оцінки якості конструктивних рішень при проектуванні сталевих будівельних конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2020. № 4. С. 42–46.
6. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 400 с.
7. Бокштейн С. Строение и свойства металлических сплавов. Москва : Metallurgia, 1971. 496 с.

REFERENCES

1. Vakhytova L.N. and Kalafat K.V. *Osnovy vohnezakhystu stalevykh konstruksiy* [Fundamentals of fire protection of steel structures]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial construction and engineering structures]. 2015, no. 2, pp. 25–32. (in Ukrainian).
2. Morozov Yu. D. *Ognestojkie stroitel'nye stali* [Fire resistant construction steels]. *Metalurhiya* [Metallurgy]. 2007, no. 7, pp. 34–45. (in Russian).
3. Roytman V.M. *Inzhenernye resheniya po ocenke ognestojkosti proektiroumyh i rekonstruiruemyh zdaniy* [Engineering solutions for assessing the fire resistance of projected and reconstructed buildings]. Moscow : Pozharnaya bezopastnost` i nauka Publ., 2001, 159 p. (in Russian).
4. Sorokin A. A. *Robota konstruksiy domennykh pechey* [Work of blast furnace structures]. Moscow : Metalurhiya Publ., 1976, 259 p. (in Russian).
5. Hezentsvey Yu.I. *Vnutrishni kriterii otsinki yakosti konstruktivnykh RISHEN' pry proyektuvanni stalevyh budivel'nykh konstruksiy* [Internal criteria for assessing the quality of structural solutions in the design of steel structures]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial construction and engineering structures]. 2020, no. 4, pp. 42–46. (in Ukrainian).
6. Hottshtayn H. *Fiziko-himicheskie osnovy materialovedeniya* [Physical and chemical foundations of materials science]. Moscow : BYNOM. Laboratoriya znan', 2009, 400 p. (in Russian).
7. Bokshteyn S. *Stroenie i svoystva metallicheskih splavov* [Structure and properties of metal alloys]. Moscow : Metalurhiya Publ., 1971, 496 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 10.04.2021.