

УДК: 621.785.4: 620.18: 69.058.2

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.55.767

## ФОРМУВАННЯ ПОЛІГОНІЗОВАНОЇ СТРУКТУРИ В ТОВСТОЛИСТОВОМУ ПРОКАТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ У ТРЬОХ НАПРЯМАХ

БОЛЬШАКОВ В. І.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ГЕЗЕНЦВЕЙ Ю. І.<sup>2</sup>, *здоб.*

<sup>1\*</sup> 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](mailto:bolshakov.v.i@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup> 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](mailto:metkon1951@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1190-5465

**Анотація. Постановка проблеми.** Необхідно розробити технологічну схему виробництва товстолистого прокату, засновану на створенні стійкої полігонізованої структури аустеніту, яка формується під час гарячої деформації аж до температур верхньої частини міжкритичного інтервалу. Подальше утворення численних зародків доєвтектоїдного фериту не тільки на великокутових, а й на полігональних межах підвищує дисперсність феритних зерен металу, який надходить на чистову прокатку, тому в готових листах формується більш дисперсна феритно-перлітна структура і підвищуються механічні властивості в трьох напрямках. **Мета статті** – підвищення комплексу механічних властивостей товстих листів, виготовлених за технологією контрольованої прокатки. Основними завданнями були збереження полігонізованої структури гарячедеформованого аустеніту і створення умов для її успадкування виділення перед чистовою прокаткою доєвтектоїдного фериту. **Висновок.** Запропоновано технологічну схему гарячої деформації товстолистого прокату, засновану на створенні стійкої полігонізованої структури аустеніту, яка формується за гарячої деформації аж до температур верхньої частини міжкритичного інтервалу. Подальше формування численних зародків доєвтектоїдного фериту не тільки на великокутових, а і на полігональних межах підвищує дисперсність феритних зерен металу, що надходить на чистову прокатку, тому в готових листах формується більш дисперсна кінцева феритна структура і підвищуються механічні властивості. Збільшення числа центрів зародження феритної фази, ініціює утворення її навіть у несприятливих (збагачених марганцем та іншими аустенітстабілізуючими елементами) ліквационних ділянках, в результаті чого знижується феритно-перлітна смугастість, вирівнюється структура і властивості в трьох напрямках, що актуально в разі використання товстолистого прокату в будівельних конструкціях. Пропонована технологічна схема розширює можливості традиційної контрольованої прокатки і може бути названа полігонізаційною контрольованою прокаткою, що дозволяє поряд із рекристалізаційною і нормалізаційною прокатками більш ефективно використовувати механізми успадкування дефектів у процесі термомеханічної обробки. Результати досліджень дозволили рекомендувати товстолистий прокат зі сталі 10Г2ФБЮ до використання в будівництві як матеріалу для виготовлення металевих каркасів висотних споруд і великопрогонових перекриттів.

**Ключові слова:** *структурний стан; низьковуглецеві низьколеговані сталі, полігонізаційна контрольована прокатка, Z-наряж*

## FORMATION OF POLIHONIZED STRUCTURE IN STEEL PLATES FOR MECHANICAL PROPERTIES IN THREE DIRECTIONS

BOLSHAKOV V.I.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
HEZENTSVEI Yur.I.<sup>2</sup>, *External Cand.*

<sup>1\*</sup> 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](mailto:bolshakov.v.i@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup> Department of Planning and Organization of Production, 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](mailto:metkon1951@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1190-5465

**Abstract. Problem statement.** To develop a technological scheme for the production of sheet metal, which is based on the creation of a stable polygonized structure of austenite, which is formed during hot deformation up to the temperatures of the upper part of the intercritical interval. Further formation of numerous pre-eutectoid ferrite nuclei not only at large angles but also at polygonal boundaries increases the dispersion of ferritic grains of the metal entering the rolling, so in the finished sheets a more dispersed ferrite-pearlite structure is formed and mechanical properties increase in three directions. **Purpose of the article** – increasing the complex of mechanical properties of thick sheets made by the technology of controlled rolling. The main tasks were to preserve the polygonized structure of hot-deformed austenite and to create conditions for its inheritance allocated before finishing rolling pre-eutectoid ferrite. **Conclusion.** The technological scheme of hot deformation of thick-sheet rolled metal based on creation of steady polygonized structure of austenite which is formed at hot deformation up to temperatures of the top part of an intercritical interval is offered. Further formation of numerous pre-eutectoid ferrite nuclei not only at large angles but also at polygonal boundaries increases the dispersion of ferritic grains of the metal entering the rolling, so in the finished sheets a more dispersed final ferrite structure is formed and mechanical properties increase. Increasing the number of nucleation centers of the ferrite phase, initiates its formation even in unfavorable (enriched with manganese and other austenitostabilizing elements) liquation areas, resulting in reduced ferritic-pearlitic striation, equalizes the structure and properties in three directions, which is relevant in the case of construction structures. The proposed technology expands the capabilities of traditional controlled rolling and can be called polygonization controlled rolling, which allows along with recrystallization and normalization rolling to more effectively use the mechanisms of inheritance of defects in thermomechanical processing. The results of research allowed to recommend thick-rolled steel 10G2FBYu for use in construction as a material for the manufacture of metal frames of high-rise buildings and long-span floors.

**Keywords:** structural condition; low-carbon low-alloy steels; polygonization controlled rolling; Z-direction

**Постановка проблеми.** Один із шляхів використання вітчизняного металопрокату на внутрішньому ринку України – це застосування сталей вітчизняного виробництва у будівельній галузі, насамперед у домо- та мостобудуванні. При цьому вітчизняний металопрокат повинен бути конкурентоздатним порівняно з закордонними аналогами, як за комплексом властивостей, так і за собівартістю готових виробів.

Одна з найважливіших вимог, що висуваються до сучасних будівельних сталей, – підхід до розв’язання наукової задачі, який ґрунтується на забезпеченні механічних властивостей поздовжнього, поперечного та Z-напрямку прокату. Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення механічних властивостей і розширення сфери застосування прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва для будівельного та мостобудівного призначення актуальні як із наукової, так і з економічної точки зору.

**Аналіз публікацій.** Наразі найбільш поширена технологія, що дозволяє здійснювати з мінімальними енергетичними затратами на формозміну, необхідну для переходу від сляба до товстого листа з низьковуглецевих сталей з умістом вуглецю

0,10...0,18 % без додавання карбідотворних елементів, – це гаряча прокатка. Такий технологічний процес дозволяє отримати в готовому прокаті порівняно невисокі показники міцності ( $\sigma_T = 250...350$  МПа). Однак ці сталі добре зварюються, порівняно дешеві і мають високі пластичні та в'язкі характеристики [1–3].

Технологічний процес будують таким чином, щоб створити в металі можливо більш дисперсну структуру і отримати так звані «структуровані» сталі [4]. Для цього застосовують термомеханічну обробку в технологічному потоці [2; 5], з використанням перетворень бейнітного [3; 6] і мартенситного [7] типів, а також дислокаційне і полігонізаційне зміцнення [8].

Будь-яке зміцнення пов'язане з насиченням металу великою кількістю дефектів, що, у свою чергу, спричинює ускладнення і подорожчання технологічного процесу через збільшення ступеня деформації (частих обтиснень і загального коефіцієнта формозміни). Однак у більшості випадків зміцнення прокату різними способами термомеханічної обробки економічно вигідніше, ніж більш дороге легування [1; 2].

Зокрема, однією з прогресивних технологій постає контрольована прокатка, яка використовує процес подрібнення феритного зерна на кінцевому етапі деформації в міжкритичному інтервалі температур [9].

**Мета дослідження** – підвищення комплексу механічних властивостей товстих листів, виготовлених за технологією полігонізаційної контрольованої прокатки.

**Результати досліджень.** Як матеріал для дослідження обрано низьковуглецеву низьколеговану сталь 10Г2ФБЮ. Хімічний склад сталі наведено в таблиці 1.

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

Температурно-деформаційний режим контрольованої прокатки зазвичай створюють у такій послідовності: нагрівання слябів у методичній печі до температур 1 100...1 200 °С; гомогенізувальна витримка близько 4...6 год.; чорнова прокатка із

закінченням деформації за температур 980...1 100 °С охолодження розкатів до температур 720...770 °С; чистова прокатка до необхідної товщини й уповільнене охолодження до кімнатної температури.

Такий процес має відомі плюси [9], однак у нього є деякі недоліки. В першу чергу, це необхідність додаткового легування, що має за рахунок утворення частинок високотемпературних карбонітридів стримувати зростання аустенітного зерна, інакше можуть знизитися показники ударної в'язкості листа [1; 2].

По-друге, на основі встановленого взаємозв'язку між температурно-деформаційними параметрами технологічного процесу й особливостями формування структур полігонізації і рекристалізації в аустеніті і фериті в товстолистовому металопрокаті стало можливим повніше використовувати ресурси контрольованої прокатки [10].

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 ГОСТ 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			

По-третє, цей процес придатний, в основному, для виробництва листів товщиною не більше 20 мм, оскільки зі збільшенням товщини готової продукції властивості міцності й ударна в'язкість знижуються через зменшення сумарної фізичної деформації [1; 2; 6].

Щоб компенсувати небажаний вплив зниження ступеня деформації, відповідальної за створення дрібного зерна і високої ударної в'язкості в готовому прокаті, пропонується підвищити дисперсність і стійкість полігонізованої структури, що формується до моменту закінчення гарячої деформації аустеніту. Для цього необхідно так побудувати технологічний процес, щоб полігональні межі, які утворюються за високотемпературної деформації аустеніту,

могли служити додатковими центрами зародження кристалів  $\alpha$ -фериту. Основна складність при цьому полягає в попередженні рекристалізації і збереженні полігональної структури аж до початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення.

Для цього слід розробити технологічні схеми контрольованої прокатки товстого листа, які застосовні для подальшого вдосконалення існуючої технології виробництва металопрокату з урахуванням збільшення товщини листа, стабілізації і підвищення механічних і експлуатаційних властивостей. Однак експлуатація такого листа в конструкціях висотних будівель або великопрогонових споруд, де реалізуються схеми навантаження більш складні, ніж у нафтопровідних трубах, неможлива через

високу анізотропію механічних властивостей. Отже, необхідно розробити такі режими прокатки, щоб міцнісні та експлуатаційні показники забезпечувалися не тільки уздовж і поперек, а й по товщині прокату (в Z-напрямку).

На основі аналізу проведених теоретичних і практичних досліджень [11] показано, що робити корекцію температурно-деформаційних режимів прокатки необхідно ще на стадії попередньої гарячої деформації в чорновій кліті.

Для цього був розроблений експериментальний режим прокатки сталі 10Г2ФБЮ зі збільшеною кількістю циклів деформації і чорнової кліті і скороченням часу перебування на обвідному рольгангу. Корекцію температурно-деформаційних режимів контрольованої прокатки здійснювали так, щоб у товстолистовому прокаті створити насичений субзеренними межами аустеніт, при цьому стримати процеси рекристалізації до початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення. Така структура може забезпечувати підвищення і стабілізацію механічних і експлуатаційних властивостей.

Аналіз мікроструктури отриманого прокату показав, що в міру збільшення кількості циклів деформації розміри зерен і субзерен фериту, а також перлітна смугастість у готових листах зменшуються. Результати механічних випробувань показують, що за збільшення числа циклів деформації в чорновій кліті на 6 межа плинності підвищується на 40...50 МПа зі збереженням високих значень відносного видовження (табл. 2).

У зв'язку із застосуванням збільшеного числа циклів виникла необхідність скоротити тривалість подальшого перебування розкату на обвідному рольгангу перед чистою прокаткою. Це необхідно, з одного боку, для збереження продуктивності стану, з іншого – для більш повного збереження полігонізованої структури аустеніту до початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення.

Проведені серії експериментів підтверджують позитивний вплив

скорочення часу перебування металу на обвідному рольгангу за рахунок підвищення швидкості охолодження підкату до температур початку чистої прокатки. Скорочення паузи між деформацією в чорновій і чистовій клітях знижує ймовірність перебігу рекристалізаційних процесів у полігонізованій структурі фериту перед деформацією в чистовій кліті.

Під час подальшого деформування в чистовій кліті метал набуває більш подрібненої кінцевої феритно-перлітної структури, яка забезпечує в готовому прокаті необхідний комплекс механічних властивостей у трьох напрямках.

З експериментального режиму були прокатані сляби зі сталі 10Г2ФБЮ, при цьому в чорновій кліті прокатного стану число циклів деформації було збільшено на 6 зі збереженням сумарної деформації незмінною. Температура кінця деформації слябів у чорновій кліті склала в середньому 920 °С, тобто знизилася на 50...70 °С порівняно зі штатною технологією, час перебування на обвідному рольгангу склав 5 хв 40 с порівняно з 8 хв за штатною технологією. Мікроструктура листів із сталі 10Г2ФБЮ, виготовлених за скоригованим режимом, характеризується дисперсністю і зменшенням перлітної смугастості (рис.), що позитивно впливає на механічні властивості прокату, в тому числі по товщині листа.

Механічні випробування показали, що листи, прокатані в експериментальному режимі, мають показники міцності вищі, ніж виготовлені за штатною технологією, зі збереженням високого рівня пластичності (табл. 2). Необхідно відзначити позитивний вплив застосування режимів із підвищеною дробністю деформації в чорновій кліті на підвищення міцності по товщині листа.

Порівняльний аналіз структури і механічних властивостей листів, виготовлених із штатної і запропонованої технологій, показав перспективність напрямку досліджень і дозволив виявити переважний вплив параметрів прокатки товстого листа в чорновій кліті порівняно з чистою.

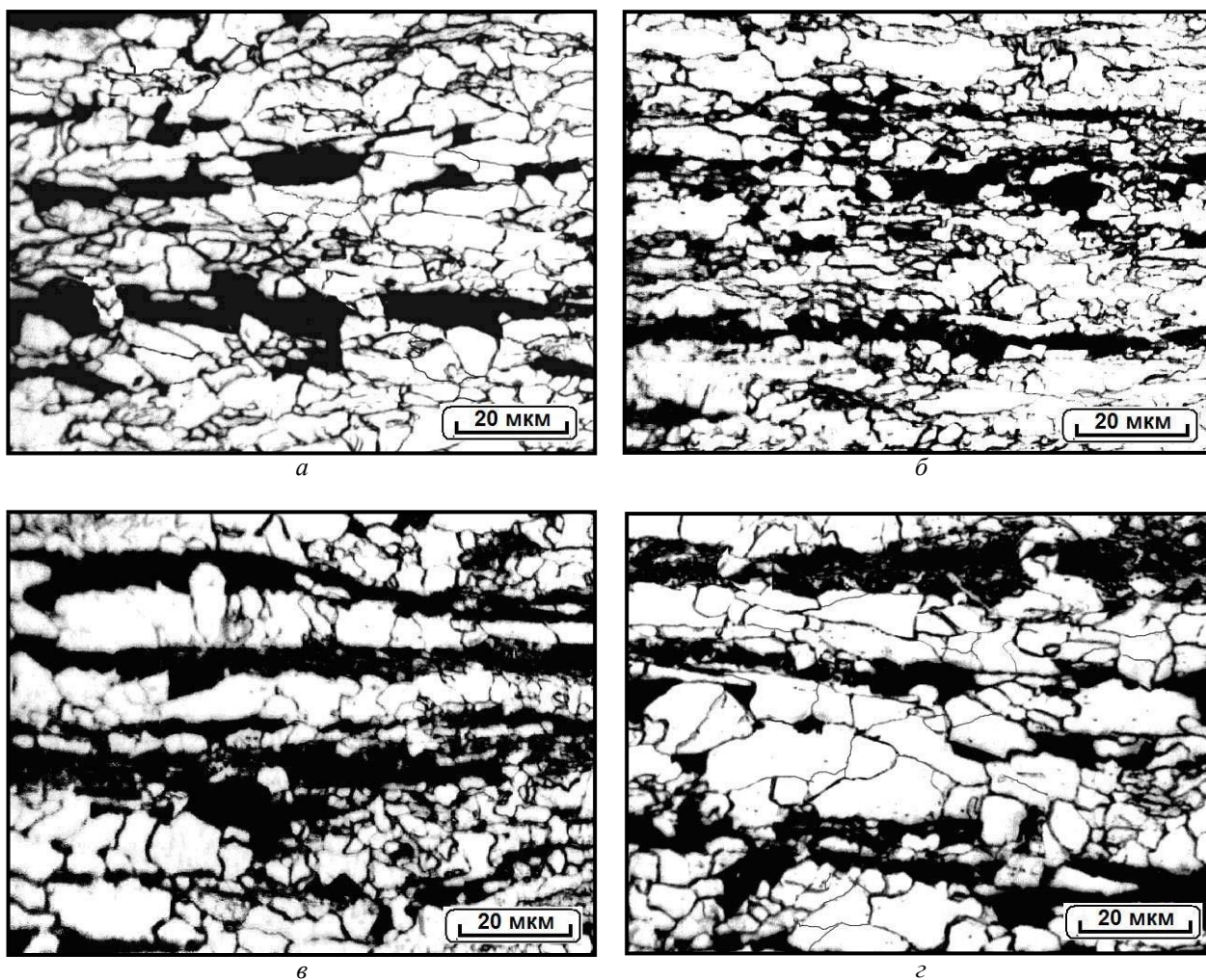


Рис. Мікроструктура товстолистого прокату зі сталі 10Г2ФБЮ:  
а, б – поверхня; в, г – середина; а, в – штатна технологія; б, г – запропонована

Таблиця 2

**Результати механічних випробувань листів, прокатаних штатним та експериментальним режимами**

Температура кінця прокатки в чорновій клітці, °С	Кількість додаткових циклів деформації	Напрямок досліджень					
		уздовж		упоперек		Z-напрямок	
		$\sigma_T$ , МПа	$\delta_2$ , %	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_2$ , %	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_2$ , %
980	–	525	36	480	34	220	–
920	+6	575	35	550	34	430	–

Отримані результати набувають особливо важливого значення в умовах розроблення технологій прокатки більш товстого листа, де найбільші деформації (обтиску) припадають саме на стани чорнової групи. Вплив поверхневого охолодження в паузі між чорною і чистовою клітцями на структуру і властивості листів із сталі 10Г2ФБЮ вивчали на

прокатаних за уточненим температурно-деформаційним режимом слябах.

Експериментальні прокатки в заводських умовах здійснювали за такими режимами: перший сляб катали за штатною технологією, без проміжного охолодження між клітцями (порівняльний гуркіт). Другий, третій і четвертий сляби після чорнової прокатки охолоджували по всій довжині протягом 90, 60 і 30 с відповідно.

Мікроструктурні дослідження прокату після різних варіантів охолодження показали, що підходожднювання гуркату після чорнової кліті подрібнює зерно фериту в поверхневих шарах готових листів.

Аналізуючи дані таблиці, можна зробити висновки, що міцність і пластичні показники поздовжнього і поперечного напрямків прокатки залишилися практично на колишньому рівні (спостерігається невелике підвищення властивостей – в межах 10 %). Однак така корекція режиму сприятливо позначається на підвищенні міцності властивостей по товщині листа. Таким чином, з уведенням в дію більш потужних форсунок охолоджувальних пристроїв можна очікувати підвищення комплексу механічних властивостей товстолистого прокату зі сталі 10Г2ФБЮ.

#### **Висновки**

1. Запропоновано технологічну схему гарячої деформації товстолистого прокату, засновану на створенні стійкої полігонізованої структури аустеніту, яка формується за гарячої деформації аж до температур верхньої частини міжкритичного інтервалу. Подальше формування численних зародків доевтектоїдного фериту не тільки на великокутових, а й на полігональних межах підвищує дисперсність феритних зерен металу, що надходить на чистову прокатку, тому в готових листах формується більш дисперсна кінцева феритна структура і підвищуються механічні властивості.

2. Збільшення числа центрів зародження феритної фази ініціює утворення її навіть на

несприятливих (збагачених марганцем та іншими аустенітстабілізуючими елементами) ліквіційних ділянках, в результаті чого знижується феритно-перлітна смугастість, вирівнюється структура і властивості в трьох напрямках, що актуально в разі використання товстолистого прокату в будівельних конструкціях.

3. Пропонована технологія розширює можливості традиційної контрольованої прокатки і може бути названа полігонізаційною контрольованою прокаткою, що дозволяє поряд із рекристалізаційною і нормалізаційною прокатками більш ефективно використовувати механізми успадкування дефектів за термомеханічної обробки.

4. Запропонована технологічна схема прокатки товстих листів може бути реалізована без капітальних витрат на наявному обладнанні металургійних комбінатів України.

5. Запропонована технологічна схема прокатки товстого листа сприяє підвищенню та стабілізації пластичності і в'язкості за низьких температур, і знижує відсоток відсортювання товстого листа за механічними властивостями.

6. Результати досліджень дозволили рекомендувати товстолистий прокат зі сталі 10Г2ФБЮ до використання в будівництві як матеріалу для виготовлення металевих каркасів висотних споруд і великопрогонових перекриттів.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Лаухин Д. В. и др. Влияние длительности аустенитизации и деформации на структуру и свойства малоуглеродистых сталей 09Г2С и 10Г2ФБ. *Theoretical Foundation of Civil Engineering : Polish-Ukrainian Transactions*. Warsaw, 2005. Vol. 13. Pp. 83–88.
2. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. Москва : Металлургия, 1977. 432 с.
3. Гриднев В. И., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. Киев : Наукова думка, 1974. 231 с.
4. Yokota T., Garica-Mateo C., Bhadeshia H. K. D. H. Formation of nanostructured steel by phase transformation. *Scripta Materialia*. 2004. Vol. 51. Pp. 767–770.
5. Bolshakov V.I. Thermomechanical treatment of construction steels. 3-d edition. Canada : *Basilian Press*, 1998. 316 p.
6. Langford G., Cohen M. Subgrains strengthening of materials. *Trans. ASM*. 1969. Vol. 62. Pp. 823–835.



7. Sadahiro Yamamoto, Hiroyasu Yokoyama, Katsumi Yamada and Masakazu Niikura. Effects of the austenite grain size and deformation in the unrecrystallized austenite region on bainite transformation. *Behavior and Microstructure. ISIJ Int.* 1995. Vol. 35, № 8. Pp. 1020–1026.
8. Kurdumov G.V., Sachs G. Über das Mechanismus den Stahlhartung. *Zeit. Phys.* 1930. Vol. 64. Pp. 325–329.
9. Сухомлин Г. Д., Большаков В. И. Специальные границы зерен в металлах и сплавах промышленной чистоты. *Строительство, материаловедение, машиностроение.* Вып. 10. 2000. С. 140–147.
10. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Лаухин Д. В. и др. Получение высокой прочности низкоуглеродистой микролегированной стали путем создания в ее структуре наноразмерных продуктов распада аустенита. *Металознавство та термічна обробка металів.* 2013. № 2 (57). С. 5–13.
11. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Лаухин Д. В. и др. Влияние дробности деформации в черновой клетке и снижение содержания углерода в сталях, микролегированных ниобием и ванадием, на формирование структуры и комплекса свойств проката. *Строительство, материаловедение, машиностроение.* 2013. Вып. 67. С. 295–302.

## REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Sukhomlyn G.D., Laukhin D.V. and oth. *Vliyanie dlitel'nosti austenitizacii i deformacii na strukturu i svoystva malouglerodistykh stalej 09G2S i 10G2FB* [Influence of the duration of austenitization and deformation on the structure and properties of low-carbon steels 09G2S and 10G2FB]. *Theoretical Foundation of Civil Engineering : Polish-Ukrainian Transactions.* Warsaw, 2005, vol. 13, pp. 83–88. (in Russian).
2. Bernshteyn M.L. *Struktura deformirovannykh metallov* [The structure of deformed metals]. Moscow : Metallurhiya Publ., 1977, 432 p. (in Russian).
3. Hrydnev V.I., Havrylyuk V.H. and Myeshkov Yu.Ya. *Prochnost' i plastychnist' kholodnodsfornirovannoy staly* [Strength and ductility of cold formed steel]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1974, 231 p. (in Russian).
4. Yokota T., Garica-Mateo C. and Bhadeshia H. K. D. H. Formation of nanostructured steel by phase transformation. *Scripta Materialia*, 2004, vol. 51, pp. 767–770.
5. Bolshakov V.I. *Thermomechanical treatment of construction steels; 3-d edition.* Basilian Press, Canada, 1998, 316 p.
6. Langford G. and Cohen M. Subgrains strengthening of materials. *Trans. ASM*, 1969, vol. 62, pp. 823–835.
7. Sadahiro Yamamoto, Hiroyasu Yokoyama, Katsumi Yamada and Masakazu Niikura. Effects of the austenite grain size and deformation in the unrecrystallized austenite region on bainite transformation. *Behavior and Microstructure. ISIJ Int.*, 1995, vol. 35, no. 8, pp. 1020–1026.
1. Kurdumov G.V. and Sachs G. Über das Mechanismus den Stahlhartung. *Zeit. Phys.*, 1930, vol. 64, pp. 325–329.
9. Sukhomlyn G.D. and Bol'shakov V.I. *Special'nye granicy zeren v metallah i splavah promyshlennoj chistoty* [Special grain boundaries in industrial grade metals and alloys]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannya* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Vol. 10, 2000, pp. 140–147. (in Russian).
10. Bolshakov V.I., Sukhomlyn H.D., Laukhin D.V. and oth. *Poluchenie vysokoy prochnosti nizkouglerodistoy mikrolegirovannoy stali putem sozdaniya v ee strukture nanorazmernih produktov raspada austenita* [Obtaining high strength of low-carbon microalloyed steel by creating nanoscale products of austenite decomposition in its structure]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 2 (57), pp. 5–13. (in Russian).
11. Bolshakov V.I., Sukhomlyn G.D., Laukhin D.V. and oth. *Vliyanie drobnosti deformacii v chernovoj kleti i snizhenie soderzhaniya ugleroda v stalyah, mikrolegirovannykh niobiem i vanadiem, na formirovanie struktury i kompleksa svoystv prokata* [Influence of the fractional deformation in the roughing stand and a decrease in the carbon content in steels microalloyed with niobium and vanadium on the formation of the structure and complex of properties of rolled products]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannya* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2013, vol. 67, pp. 295–302. (in Russian).

Надійшла до редакції : 03.06.2021.