

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

ВПЛИВ СХЕМИ ПРОКАТКИ ТА ПІСЛЯДЕФОРМАЦІЙНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ЗІ СТАЛІ, ЩО ВМІЩУЄ V–Nb–Al

СТАВРОВСЬКА В. Є.¹
ЄФРЕМЕНКО В. Г.², *д. т. н., проф.*,
ЗОТОВ Д. С.^{3*}, *к. т. н.*,
САГІРОВ Р. І.⁴
ЗУРНАДЖИ В. І.⁵
ЧАБАК Ю. Г.⁶, *к. т. н.*

¹ ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», вул. Лепорського, 1, 87500, Маріуполь, Україна, тел. + 38 (0629) 46-50-77, e-mail: vera.stavrovskaya@metinvestholding.com

² Кафедра фізики, Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, 87555, Маріуполь, Україна, тел. + 38 (066) 948-83-25, e-mail: vgefremenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4537-6939

^{3*} ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», вул. Лепорського, 1, 87500, Маріуполь, Україна, тел. + 38 (0629) 46-79-03, e-mail: dmitriy.zotov@metinvestholding.com

⁴ ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», вул. Лепорського, 1, 87500, Маріуполь, Україна, тел. + 38 (0629) 46-72-28, e-mail: ruslan.sagirov@metinvestholding.com

⁵ Кафедра фізики, Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, 87555, Маріуполь, Україна, тел. + 38 (096) 398-11-25, e-mail: vadim.zurnadzhy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0290-257X

⁶ Кафедра фізики, Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, 87555, Маріуполь, Україна, тел. + 38 (097) 218-16-72, e-mail: julia.chabak25@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3743-7428

Анотація. Постановка проблеми. Конструкційний сталевий прокат становить основну частку виробництва сучасної металургії. Підвищення механічних властивостей прокату доцільно вести в рамках технологій, які передбачають використання прокатного нагріву, що дозволяє економити енергоносії і знижувати собівартість продукції. **Мета роботи.** Вибір раціональної схеми прокатки і післядеформаційного охолодження листового прокату з конструкційної сталі. **Матеріал і методика.** Матеріал дослідження – листовий прокат завтовшки 20 мм зі сталі S355J2 (EN 10025), мікролегованої комплексом V–Nb–Al. Методика – випробування на механічні властивості відповідно до вимог EN 10025. **Результати.** Зіставлені механічні властивості листового прокату після виконання стандартної гарячої прокатки, нормалізуючої прокатки, контрольованої прокатки, а також після контрольованої прокатки з подальшим прискореним охолодженням за різними режимами. **Висновки.** Показано, що застосуванням контрольованої прокатки з прискореним до 460...530 °C охолодженням можливо суттєво (на третину, до категорії 500Q) підвищити міцність сталі при зростанні її хладностійкості і при збереженні пластичності на задовільному рівні. Таке підвищення комплексу властивостей досягається без застосування термообробки зі спеціального нагріву, що є економічно вигідним напрямком.

Ключові слова: конструкційна сталь; листовий прокат; прокат; прискорене охолодження; механічні властивості

EFFECT OF SCHEME OF ROLLING AND POST-DEFORMATION COOLING ON MECHANICAL PROPERTIES OF ROLLED SHEET MADE OF V–Nb–Al-ALLOYED STEEL

STAVROVSKAYA V.E.¹
EFREMENKO V.G.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
ZOTOV D.S.^{3*}, *Ph. D.*,
SAGIROV R.I.⁴,
ZURNADZHY V.I.⁵
CHABAK Yu.G.⁶, *Ph. D.*

¹ PJSC "AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS", 1, Leporskogo str., Mariupol, Ukraine, tel. + 38 (0629) 46-50-77, e-mail: vera.stavrovskaya@metinvestholding.com

² Physics Department, Priazovsky State Technical University, 7, Uversitetskaya str., Mariupol, Ukraine, tel. + 38 (066) 948-83-25, e-mail: vgefremenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4537-6939

^{3*} PJSC "AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS", 1, Leporskogo str., Mariupol, Ukraine, tel. + 38 (0629) 46-79-03, e-mail: dmitriy.zotov@metinvestholding.com

⁴ PJSC "AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS", 1, Leporskogo str., Mariupol, Ukraine, tel. + 38 (0629) 46-72-28, e-mail: ruslan.sagirov@metinvestholding.com

⁵ Physics Department, Priazovsky State Technical University, 7, Universitetskaya str., Mariupol, Ukraine, tel. + 38 (096) 398-11-25, e-mail: vadim.zurnadzhy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0290-257X

⁶ Physics Department, Priazovsky State Technical University, 7, Universitetskaya str., Mariupol, Ukraine, tel. + 38 (097) 218-16-72, e-mail: julia.chabak25@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3743-7428

Abstract. Problem statement. Structural steel products are the bulk of the production of modern metallurgy. It is advisable to increase the mechanical properties of rolled products in the framework of technologies involving the use of rolling heating, which saves energy and reduces the production cost. **Purpose.** The choice of a rational scheme of rolling and post-deformation cooling of rolled steel made of structural steel. **Material and Methods.** The study material is 20 mm thick sheet steel made of S355J2 steel (EN 10025) microalloyed with V–Nb–Al complex. Methodology – tests for mechanical properties according to the requirements of EN 10025. **Results.** The mechanical properties of sheet metal are compared after performing standard hot rolling, normalizing rolling, controlled rolling, and also after controlled rolling with subsequent accelerated cooling in various modes. **Conclusions.** It is shown that by using controlled rolling with accelerated cooling to 460...530 °C, it is possible to significantly (by one third, up to category 500Q) increase the strength of steel with an increase in its cold resistance and at the same time maintaining plasticity at an acceptable level. Such an increase in the complex of properties is achieved without the use of heat treatment with special heating, which is an economically advantageous direction.

Keywords: structural steel; sheet rolling; rolling; accelerated cooling; mechanical properties

Введение

Листовой прокат из конструкционных марок стали является одним из наиболее востребованных видов металлопродукции [1]. Прокат повышенной прочности изготавливают из низкоуглеродистой стали, микролегированной сильными карбидообразующими элементами (V, Nb, Ti) [2; 3]. Широкое распространение получили технологии, связанные с формированием заданных механических свойств на стадии прокатки или сразу после ее завершения. К их числу относятся: нормализующая прокатка (НП) [4], контролируемая прокатка (КП) [2; 5; 6], ускоренное контролируемое охлаждение (УКО) [7; 8].

Повышение комплекса механических свойств конструкционной стали возможно также за счет применения термической обработки с отдельного нагрева (нормализации, закалки и отпуска), однако это приводит к повышению себестоимости производства проката. Поэтому особый интерес представляют технологии, обеспечивающие достижение заданного уровня свойств непосредственно с прокатного нагрева. Выбор оптимальной технологической схемы такой обработки целесообразно проводить на основе сравнительных исследований, выполненных с применением проката одного химического состава, желательнее, одной плавки. Вместе с тем, в литературе известно мало подобных исследований, имеющих комплексный характер.

Цель работы – выбор рациональной схемы последеформационного охлаждения листового проката из конструкционной стали, микролегированной комплексом V + Nb + Al с учетом требований Евроноорм EN 10027.

Материал и методы исследования. Материалом служил листовой прокат толщиной 20 мм из стали S355J2, выпускаемой по Евронормам 10025,

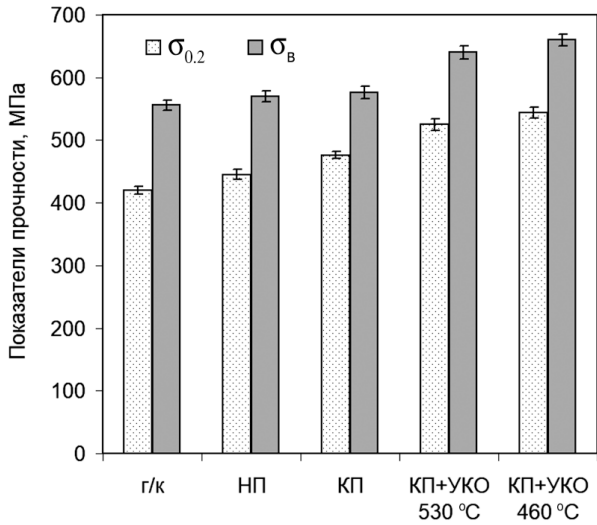
содержащий, в мас. %: 0,12 C; 1,52 Mn; 0,19 Si; 0,010 S; 0,010 P; 0,052 V; 0,033 Nb; 0,033 Al; 0,0025 Ca (Cr, Ni, Cu – не более 0,05 каждого; Mo – 0,01). Были опробованы различные технологические схемы прокатки и охлаждения, а именно: а) стандартная прокатка (с завершением прокатки при 950...1 000 °C); б) НП (с завершением прокатки при 800...830 °C); в) КП (с завершением прокатки при 700...720 °C); г) КП + УКО (с завершением прокатки при 790...810 °C). В последнем случае прокатанные листы охлаждали водой от 780 ± 20 °C до 530 ± 20 °C (режим 1) и до 460 ± 20 °C (режим 2) с интенсивностью 15 ± 4 °C/с и 18 ± 4 °C/с соответственно.

После охлаждения листы укладывали в штабель, где они замедленно остывали до температуры не выше 100 °C в течение 40 ч. Механические свойства определяли согласно EN 10025-1 испытаниями на растяжение и ударный изгиб (в последнем случае – на образцах с V-образным надрезом).

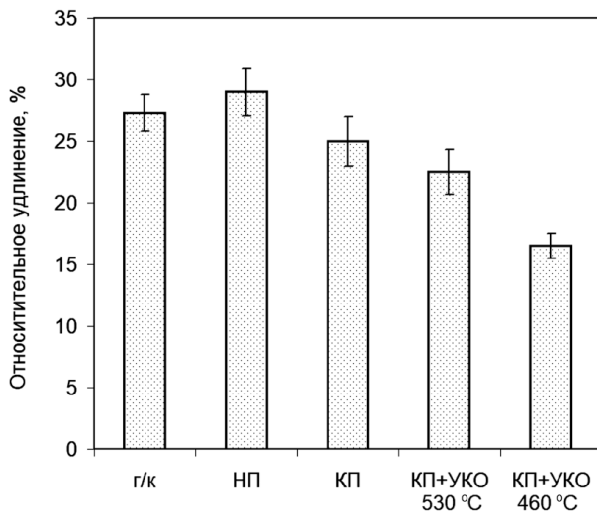
Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 1 представлены данные о механических свойствах проката, обработанного по различным схемам.

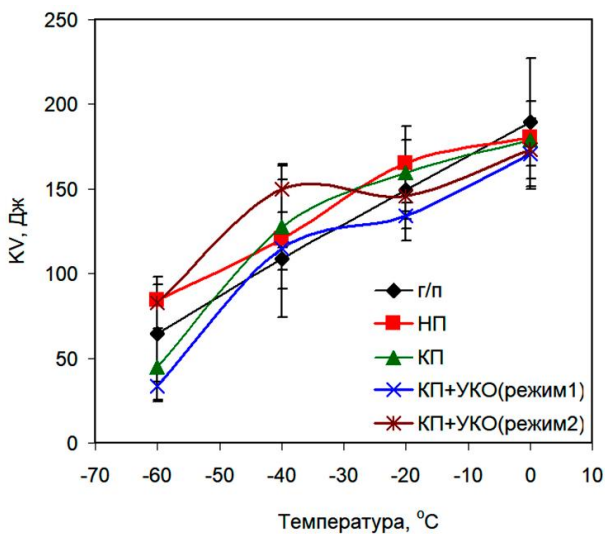
Прокат в горячекатаном состоянии имеет самую низкую (изо всех опробованных вариантов) прочность – ($\sigma_{0,2}/\sigma_B$) 420/556 МПа, что соответствует категориям прочности 355N и 420N. Нормализующая прокатка повысила прочностные свойства в среднем на 20 МПа – до 445/570 МПа. Контролируемая прокатка с окончанием чистой прокатки в двухфазном интервале (700...720 °C) обеспечила рост предела текучести на 56 МПа относительно горячекатаного состояния (до 476/576 МПа), что соответствует категории прочности 460N.



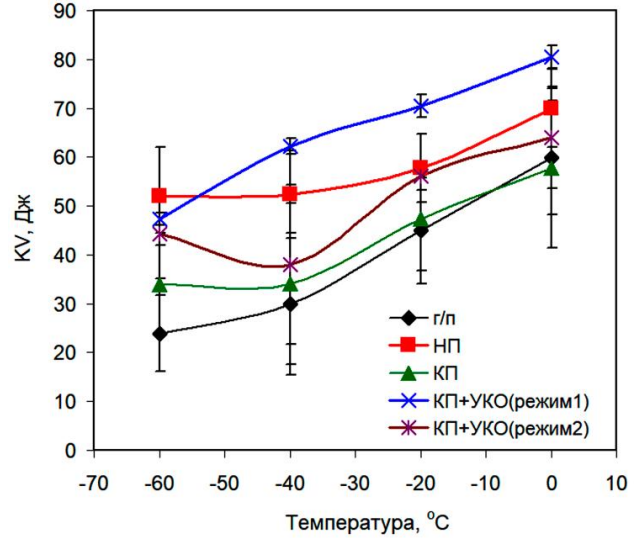
a



b (б)



в (с)



г (d)

Рис. 1. Влияние схемы последеформационного охлаждения на механические свойства листового проката толщиной 20 мм из стали S355J2: а – показатели прочности, б – относительное удлинение, в – работа удара в продольном направлении, г – работа удара в поперечном направлении / Fig. 1. The effect of the scheme of post-deformation cooling on mechanical properties of rolled sheets 20 mm thick made of steel S355J2: a – strength indicators, b – elongation, c – impact energy (longitudinal direction), d – impact energy (transversal direction)

Наиболее существенный рост прочности был зафиксирован в результате реализации схемы КП + УКО. По завершении ускоренного охлаждения при 530 °C предел текучести достиг 525 МПа, а временное сопротивление – 640 МПа. Еще более высокая прочность (544/660 МПа) была достигнута в результате охлаждения до 460 °C. Такая прочность соответствует уровню категории 500Q, относящейся к стали в состоянии закалки и отпуска, а также удовлетворяет категории K60(X70) для штрипсовой стали.

Повышение прочности относительно горячекатаного состояния сопровождалось ростом относительного удлинения после НП и его снижением после КП; в последнем случае этот показатель остался на удовлетворительном для категории 460N уровне. Проведение обработки КП + УКО (режим 1) дополнительно снизило пластичность стали до $\delta = 22\%$, что, впрочем, удовлетворяет требованиям категории 500Q. Минимально достигнутая пластичность ($\delta = 16,5\%$) соответствует обработке по схеме КП+УКО (режим 2).

Как следует из рисунка 1 в, г и рисунка 2, с понижением температуры испытаний работа удара стали монотонно снижается. Несмотря на это, вплоть до -40 °C ее средние значения в продольном

направлении для разных схем обработки сохраняются на высоком уровне (не ниже 120 Дж). При $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ резко возрос разброс значений работы удара для схем КП и КП + УКО (режим 1), однако при этом минимальные значения (69...86 Дж) удовлетворяют требованиям категорий 460NL и 500QL. Для диапазона температур от -40 до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ преимущество по этой характеристике имеют схемы НП и КП + УКО (режим 2).

При испытаниях поперечных ударных образцов установлено, что практически во всем диапазоне температур максимальную работу удара дает схема КП + УКО (режим 1), несколько уступает ей схема НП. Схемы НП и КП соответствуют требованиям категорий 420NL и 460NL, соответственно, а КП + УКО (режимы 1 и 2) – категории 500QL. В горячекатаном состоянии сталь имеет минимальную работу удара.

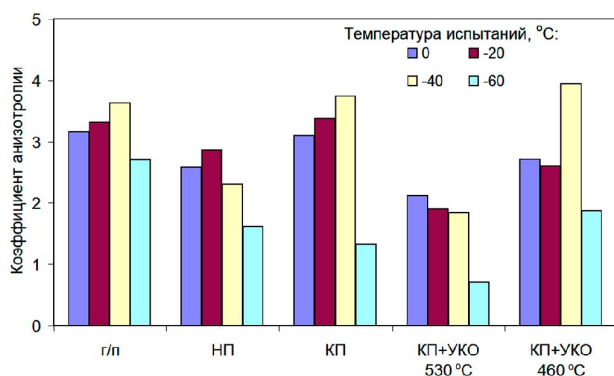


Рис. 2. Влияние схемы последеформационного охлаждения на анизотропию проката по работе удара / Fig. 2. The effect of the scheme of post-deformation cooling on anisotropy of rolled steel in impact energy

Приведенные данные показывают, что варьируя лишь температурой конца прокатки и скоростью охлаждения, можно повысить предел текучести стали S355J2 на 29,5 % – от 420 до 544 МПа. Рост прочности сопровождается сохранением или повышением работы удара в интервале от -20 до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ на продольных образцах и от -20 до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на поперечных образцах. Наиболее перспективна схема КП+УКО (режим 2), которая снижает анизотропию работы удара до минимального уровня (рис. 2). Таким образом, высокий уровень свойств стали S355J2 может быть достигнут обработкой с прокатного нагрева, что имеет несомненные экономические выгоды.

Выводы

Исследован уровень механических свойств стали S355J2, микролегированной комплексом V + Nb + Al, после различных схем прокатки (стандартная, нормализующая, контролируемая) и ускоренного охлаждения с прокатного нагрева. Показана возможность существенного (до 30 %) повышения в стали уровня прочности и работы удара (при отрицательных температурах) за счет применения контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением до $460\text{...}530\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нормализующая прокатка приводит к незначительному росту предела текучести, однако обеспечивает статистическое значимое повышение пластичности и значительное увеличение ударной вязкости относительно горячекатаного состояния.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сталь для магистральных газопроводов / [Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко]. – Москва : Металлургия, 1989. – 288 с. – Режим доступа : <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=metallurgiya&author=matrosov-ii&book=1989>
2. Большаков В. И. Влияние режимов контролируемой прокатки на структуру и свойства низкоуглеродистой микролегированной стали 10Г2ФБ / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов, Н. В. Сахник, Е. М. Кузмичев, А. А. Тараненко, Ю. М. Снежковская // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2009. – Вып. 48, ч. 3. – С. 237–242. – Режим доступа : <http://oaji.net/articles/2017/2528-1507198792.pdf>
3. Laber K. The effect of the normalizing rolling of S355J2G3 steel round bars on the selected mechanical properties of finished product / K. Laber, H. Dyja // Solid State Phenomena. – 2010. – Vol. 165. – Pp. 294–299. – Режим доступа : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.429.5182&rep=rep1&type=pdf>
4. Zhao M. C. The effects of thermomechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel / M. C. Zhao, K. Yang, Y. Y. Shan // Materials Science and Engineering A. – 2002. – Vol. 335. – Pp.14–20. – Режим доступа : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509301019049>
5. Lan L. Phase transformation, microstructure, and mechanical properties of X100 pipeline steels based on TMCP and HTP concepts / L. Lan, Z. Chang, X. Kong, C. Qiu, D. Zhao // Journal of Materials Science. – 2017. – Vol. 52. – Pp. 1661–1678. – Режим доступа : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-016-0459-6>
6. Lee J. Review of accelerated cooling of steel plate / J. Lee, S. Samanta, M. Steeper // Ironmaking & Steelmaking. – 2017. – June. – Pp. 268–273. – Режим доступа : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1743281215Y.000000010a?journalCode=yirs20>

7. Matrosov M. Y. A study of the microstructure of niobium-microalloyed pipe steel after different modes of controlled rolling with accelerated cooling / M. Y. Matrosov, L. I. Efron, A. A. Kichkina, I. V. Lyasotskii // Metal Science and Heat Treatment. – 2008. – Vol. 50. – Pp. 44–49. – Режим доступу : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-008-9034-3>

REFERENCES

1. Matrosov Ju.I., Litvinenko D.A. and Golovanenko S.A. *Stal' dlya magistral'nyh gazoprovodov* [Steel for the gas-main pipelines]. Moscow : Metallurgia Publ., 1989, 288 p. (in Russian).
2. Bol'shakov V.I., Suhomlin G.D., Lauhin D.V. Beketov A.V., Sahnik N.V., Kuzmichev E.M., Taranenko A.A. and Snezhkovskaja Ju.M. *Vliyanie rezhimov kontrolirujemoj prokatki na strukturu i svojstva nizkouglerodistoj mikrolegirovannoj stali 10G2FB* [The Effect of the controlled rolling on the structure and properties of the lowcarbon microalloyed steel 10G2FB]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashynostroenie* [Building, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2009, no. 48, part. 3, pp. 237–242. (in Russian).
3. Laber K. and Dyja H. The effect of the normalizing rolling of S355J2G3 steel round bars on the selected mechanical properties of finished product. *Solid State Phenomena*, 2010, vol. 165, pp. 294–299.
4. Zhao M.C., Yang K. and Shan Y.Y. The effects of thermomechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel. *Materials Science and Engineering A*, 2002, vol. 335, pp. 14–20.
5. Lan L., Chang Z., Kong X., Qiu C. and Zhao D. Phase transformation, microstructure, and mechanical properties of X100 pipeline steels based on TMCP and HTP concepts. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, pp. 1661–1678.
6. Lee J., Samanta S. and Steeper M. Review of accelerated cooling of steel plate. *Ironmaking & Steelmaking*, 2017, pp. 268–273.
7. Matrosov M.Y., Efron L.I., Kichkina A.A. and Lyasotskii I.V. A study of the microstructure of niobium-microalloyed pipe steel after different modes of controlled rolling with accelerated cooling. *Metal Science and Heat Treatment*, 2008, vol. 50, pp. 44–49.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина), д-ром техн. наук, доц. В. Н. Волчуком (Украина).

Статья поступила в редакцию 11.03.2019.

Принята в печать 14.03.2019.