



АНАЛИЗ МИРОВОГО УРОВНЯ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕКАТАНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ХЛАДОСТОЙКОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ $\geq 600 \text{ Н/мм}^2$

Полецков П.П., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Лопатина Е.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Обоснована перспективность применения высокопрочных конструкционных сталей при изготовлении сварных конструкций, подъемно-транспортного оборудования и различных элементов техники, эксплуатируемой в условиях низких температур Крайнего Севера (до -60°C). Показано, что основным нормативным документом, регламентирующим комплекс требований к химическому составу и уровню механических свойств конструкционных высокопрочных хладостойких сталей, является европейский стандарт EN 10025-6. На основе анализа нормативных документов, а также технических спецификаций крупных отечественных и зарубежных производителей данного вида проката определен комплекс требований, которым должна отвечать продукция: высокая прочность ($\sigma_b = 700\text{--}950 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_t \geq 600 \text{ Н/мм}^2$), пластичность (относительное удлинение δ_5 не менее 14%, минимальный радиус изгиба $\geq 2t$), также низкотемпературная ударная вязкость ($\text{KCV-60} \geq 34 \text{ Дж/см}^2$). Выявлено, что достижение требуемого комплекса свойств в толщинах от 8 до 50 мм обеспечивается путем закалки стали с последующим высоким отпуском, а для толщин до 10 мм также за счет применения технологии контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

Ключевые слова: высокопрочная хладостойкая сталь, технические требования, листовая горячекатаная сталь северного исполнения, конструкционная сталь, механические свойства.

Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук и ведущих научных школ Российской Федерации – гранта Президента РФ (Соглашение №075-15-2020-205 от 17.03.2020 г. (вн. № МК-1979.2020.8)).

© Полецков П.П., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Лопатина Е.В., 2020

Для цитирования

Анализ мирового уровня разработок в области производства горячекатаного высокопрочного хладостойкого листового проката с пределом текучести $\geq 600 \text{ Н/мм}^2$ / Полецков П.П., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Лопатина Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 32–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-32-38>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANALYSIS OF GLOBAL DEVELOPMENT IN PRODUCING HOT-ROLLED HIGH-STRENGTH COLD-RESISTANT SHEETS WITH A YIELD STRENGTH OF 600 MPa AND OVER

Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Nikitenko O.A., Lopatina E.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The paper contains a rationale for the prospect of using high-strength structural steels in manufacturing welded structures, hoisting and transport equipment and various elements of equipment operating at low temperatures in the Far North (down to -60°C). It is shown that EN 10025-6 is a main document regulating the set of requirements for the chemical composition and mechanical properties of structural high-strength cold-resistant steels. By analyzing the regulatory documents, as well as technical specifications of large Russian and foreign manufacturers of this type of rolled products, the authors determined a set of requirements to be met by the products: high strength ($R_m = 700-950$ MPa, $R_{eH} \geq 600$ MPa), ductility (relative elongation $A_5 \geq 14\%$, minimum bending radius $\geq 2t$), as well as resistance to low temperatures ($KCV^{-60} \geq 34$ J/cm²). It was revealed that the required set of properties for steel products with a thickness of 8 to 50 mm was achieved by steel quenching followed by high tempering, and for thicknesses of up to 10 mm by using controlled rolling and accelerated cooling.

Keywords: high-strength cold-resistant steel, technical requirements, hot-rolled steel sheets for Arctic service, structural steel, mechanical properties.

The research was funded as part of the state support of young Russian researchers – PhD holders and doctors of sciences and leading scientific schools of the Russian Federation – by the grant of the President of the Russian Federation (Agreement No.075-15-2020-205 dated 17.03.2020 (internal No. MK-1979.2020.8)).

For citation

Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Nikitenko O.A., Lopatina E.V. Analysis of Global Development in Producing Hot-Rolled High-Strength Cold-Resistant Sheets with a Yield Strength of 600 MPa and over. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 32–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-32-38>

Введение

Традиционно при производстве несущих сварных каркасных конструкций, подъемно-транспортного оборудования, деталей узлов, рамных и корпусных элементов горнодобывающей техники используются малоуглеродистые и обычные низколегированные конструкционные стали. Однако эффективность их работы в сложных климатических условиях в районах Крайнего Севера при температурах до -60°C резко снижается, что также усугубляется воздействием агрессивных сред, статических, динамических, импульсных и циклических нагрузок, интенсивным абразивным износом. Перспективными в данном направлении являются высокопрочные стали, обладающие достаточной прочностью, чтобы выдерживать высокие нагрузки, а также удовлетворительной пластичностью и вязкостью, малой чувствительностью к концентраторам напряжений и малой склонностью к хрупкому разрушению при низких

и сверхнизких критических температурах, хорошей свариваемостью, необходимой для изготовления герметичной аппаратуры, труб и тонкостенных конструкций [1–7]. Помимо этого, использование высокопрочных сталей взамен обычных конструкционных позволяет уменьшить толщину материала без потери конструктивной прочности, что, в свою очередь, ведет к снижению массы металлоконструкций, уменьшению трудоемкости строительно-монтажных работ и затрат на транспортировку металла. Это вызывает необходимость разработки новых инновационных материалов, определяющих их функциональное назначение, а также развитие технологий их обработки [8–14].

Основная часть

Основным нормативным документом, регламентирующим требования к высокопрочным сталим, в том числе и в хладостойком исполнении, является европейский стандарт

EN 10025-6 [15]. Согласно данному стандарту высокопрочные конструкционные стали северного исполнения поставляются в термоулучшенном состоянии (после закалки и высокого отпуска) по 6 группам прочности с пределом текучести от 460 Н/мм² (при толщине от 3 до 50 мм). Для обеспечения долгосрочной эксплуатации конструкций и оборудования высокопрочный листовой прокат должен подвергаться испытаниям на растяжение, ударный изгиб (KCV) при пониженных температурах, а также при толщине от 3 до 16 мм на изгиб до угла 90°. Требования по механическим свой-

ствам высокопрочного проката в северном исполнении для различных групп прочности представлены в **табл. 1**.

Помимо требований по механическим свойствам в стандарте регламентируется предельное массовое содержание основных легирующих элементов в стали (**табл. 2**). Поскольку рассматриваемый вид высокопрочного листового проката предназначен для изготовления сварных конструкций, необходимым условием также является ограничение верхнего значения углеродного эквивалента CEV для обеспечения удовлетворительной свариваемости стали.

Таблица 1. Требования к механическим свойствам высокопрочного проката северного исполнения в соответствии с EN 10025-6

Table 1. Requirements for mechanical properties of high-strength rolled products for Arctic service as per EN 10025-6

Группа прочности	Механические свойства						
	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² , не менее	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %, не менее	Ударная вязкость в поперечном направлении, Дж, не менее			Минимальный радиус оправки при изгибе, мм
				KCV ⁻²⁰	KCV ⁻⁴⁰	KCV ⁻⁶⁰	
S460QL1	460	550-720	17	35	30	27	3,0t
S500QL1		590-770	17				
S550QL1		640-820	16				
S620QL1		700-890	15				
S690QL1		770-940	14				
S890QL1		940-1100	11				

Таблица 2. Требования к химическому составу высокопрочного проката северного исполнения в соответствии с EN 10025-6 по ковшевой пробе

Table 2. Requirements for a chemical composition of high-strength rolled products for Arctic service as per EN 10025-6 by a ladle sample

Группа прочности	C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	CEV, %, не более
	Массовая доля химических элементов, %, не более														
S460QL1	0,20	0,80	1,7	0,020	0,010	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,47
S500QL1															0,65
S550QL1															0,72
S620QL1															
S690QL1															
S890QL1															

С целью оценки мирового уровня разработок в области производства высокопрочных конструкционных листовых сталей северного исполнения был проведен анализ технических характеристик выпускаемого отечественными и зарубежными производителями проката. Наиболее крупными зарубежными производителями высокопрочного листового проката, на долю которых приходится большая часть мирового рынка, являются: Dillinger (Германия), SSAB (Швеция) и Voestalpine Stahl GmbH (Австрия). На территории России производство высокопрочных конструкционных сталей обеспечивают ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь» [16–18]. Химический состав и достижимый уровень механических свойств сталей, реализуемых указанными компаниями, представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

Установлено, что для достижения требуемого комплекса механических свойств при производстве высокопрочных конструкционных сталей северного исполнения с пределом текучести более 600 Н/мм² используется низкоуглеродистая сталь с содержанием **C** до 0,20% масс. и добавлением микролегирующих элементов в виде **V** до 0,20% или комплексно **Nb-V-Ti** до 0,44%. Для зарубежных производителей характерным является легирование стали **Mn** до 2,1%. В сталях, выпускаемых

отечественными производителями, содержание **Mn** не превышает 1,2%. Также высокопрочные стали, производимые по технологии закалки и высокого отпуска, характеризуются достаточно большим содержанием **Cr** – до 1,7%, а также наличием дорогостоящих легирующих элементов – **Ni** до 2,0% и **Mo** до 0,7%. Помимо этого, термически улучшаемые высокопрочные стали отличаются микродобавками **B** до 0,006% для повышения их прокаливаемости.

Кроме того, на основе анализа технических спецификаций определено, что для обеспечения надежности и долговечности при эксплуатации металлоконструкций и оборудования в условиях Крайнего Севера прокат для их производства должен сочетать в себе такие свойства, как высокая прочность ($\sigma_b = 700\text{--}950 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_t \geq 600 \text{ Н/мм}^2$), пластичность (относительное удлинение $\delta 5$ не менее 14%, минимальный радиус изгиба $\geq 2t$), а также стойкость к низким температурам ($KCV-60 \geq 34 \text{ Дж/см}^2$). При этом достижение требуемого комплекса свойств обеспечивается путем закалки стали с проведением последующего высокого отпуска, а для толщин до 10 мм также за счет применения технологии контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

Таблица 3. Химический состав отечественных и зарубежных высокопрочных хладостойких марок сталей
Table 3. Chemical composition of Russian and foreign high-strength cold-resistant steel grades

Марка стали (страна)	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	Mo	Nb	V	Ti	B	Al
не более														не менее
Strenx 600 MC (TM) (Швеция)	0,12	0,21	1,90	0,010	0,025	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 650 MC (TM) (Швеция)	0,12	0,21	2,00	0,010	0,025	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 700 MC (TM) (Швеция)	0,12	0,21	2,10	0,010	0,020	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 700 MC plus (TM) (Швеция)	0,12	0,25	2,10	0,010	0,020	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 700 (QT) (Швеция)	0,20	0,60	1,60	0,010	0,020	0,80	0,30	2,0	0,70	-	-	-	0,005	-
Aldur 620 (QT) (Австрия)	0,20	0,80	1,70	0,010	0,020	1,50	0,50	2,0	0,70	0,06	0,12	0,05	0,005	0,018
Aldur 700 (QT) (Австрия)	0,20	0,80	1,70	0,010	0,020	1,50	0,50	2,0	0,70	0,06	0,12	0,05	0,005	0,018
Dillimax 690 (QT) (Германия)	0,20	0,50	1,60	0,005	0,018	1,50	-	1,8	0,60	V+Nb 0,10		-	0,004	-
14Х2ГМР (QT) (Россия)	0,17	0,37	1,20	-	-	1,70	0,30	0,3	0,55	-	0,03	-	0,006	-
14ХМНДФР (QT) (Россия)	0,17	0,37	0,90	-	-	0,70	0,40	1,0	0,55	-	0,10	-	0,006	-
09ХГН2МД (QT) (Россия)	0,11	0,33	0,67	0,003	0,007	0,70	0,70	2,2	0,35	-			-	0,036

Примечание:

«-» – в спецификации производителя не регламентируется; QT – состояние поставки после закалки и отпуска;
TM – термомеханическая прокатка.

Таблица 4. Уровень механических свойств высокопрочного хладостойкого конструкционного проката, достигаемый отечественными и зарубежными производителями
Table 4. Mechanical properties of high-strength cold-resistant structural steel rolled products achieved by Russian and foreign steelmakers

Марка стали (страна)	Механические свойства					Углеродный эквивалент			Изгиб			Состояние поставки			
	Толщина проката t , мм	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа не менее	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %, не менее	Ударная вязкость в поперечном направлении, Дж/см ² , не менее			t , мм	CEV не более	CET не более	t , мм	Минимальный радиус оправки, мм			
					KCV ⁻²⁰	KCV ⁻⁴⁰	KCV ⁻⁶⁰								
Strenx 600 MC (Швеция)	6,01-10	600	650-820	16	50	34	-	6,01-10	0,33*	0,21*	6,01-10	1,4t	1,4t	TM	
Strenx 650 MC (Швеция)	6,01-10	650	700-850	14	50	34	-	6,01-10	0,34*	0,22*	6,01-10	1,5t	1,5t	TM	
Strenx 700 MC (Швеция)	6,01-10	700	750-950	12	50	34	-	6,01-10	0,39*	0,25*	6,01-10	1,6t	1,6t	TM	
Strenx 700 MC PLUS, (Швеция)	3-10	700	750-950	13	-	-	50	3-11,49	0,38*	0,24*	3-10	1,0t	1,0t	TM	
	10,1-12							11,50-12	0,40*	0,26*	10,1-12	1,5t	1,5t		
Strenx 700 (Швеция)	4-53	700	780-930	14	-	86	34	до 5	0,48	0,57	0,34	0,38	≤ 8	1,5t	2,0t
	53,01-100	650	780-930	14				5-30	0,49	0,57	0,32	0,38			
	53,01-100	650	780-930	14				30,01-60	0,52	0,58	0,36	0,39	8-15	1,5t	2,0t
	100,0-160	650	710-900	14				60,01-100	0,58	0,58	0,39	0,39	15-20	2,0t	2,5t
	100,0-160	650	710-900	14				100,01-130	0,67	0,67	0,41	0,41	>20	2,0t	2,5t
	100,0-160	650	710-900	14				130,01-160	0,73	-	0,43	-			
Aldur 620 QL1, (Австрия)	12-50	620	700-890	15	44	37	34	12-50	0,46*	0,29*	-	3t	4t	QT	
	50,01-100	580	700-890	15				50,01-70	0,46*	0,29*					
	50,01-100	580	700-890	15				70,01-100	0,52*	0,32*					
Aldur 700 QL1, (Австрия)	12-50	700	770-940	14	44	37	34	12-30	0,46*	0,29*	-	3t	4t	QT	
	50,01-110	650	760-930	14				30,01-50	0,52*	0,32*					
	50,01-110	650	760-930	14				50,01-100	0,54*	0,35*					
Dillimax 690, (Германия)	6-65	690	770-930	14	50	50	34	6-25	0,50	0,35	-	2t	3t	QT	
	65-100	670						25,01-50	0,55	0,38					
	65-100	670						50,01-100	0,67	-					
14Х2ГМР (Россия)	≤ 20	700	760-930	14	-	44	-	-	-	-	-	-	-	QT	
14ХМНДФР (Россия)	≤ 20	700	760-930	14	-	44	-	-	-	-	-	-	-	QT	
09ХГН2МД (Россия)	4-70	620	720-890	15	-	-	34	-	-	-	-	-	-	QT	

Примечания. Состояние поставки: QT – после закалки и отпуска; ТМ – после термомеханической прокатки.

* Типичное значение (не гарантируется). Значение углеродного эквивалента CEV и CET определяется по анализу химического состава по ковшевой пробе, исходя из формул:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \text{ (согласно IIW)}; CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \text{ (согласно SEW 088)}.$$

Выводы

На основе анализа технических спецификаций отечественных и зарубежных производителей определены:

- комплекс требований, которым должна соответствовать высокопрочная конструкционная сталь, эксплуатируемая в условиях Крайнего Севера: $\sigma_b = 700-950 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_t \geq 600 \text{ Н/мм}^2$, $\delta_5 \geq 14\%$, $KCV^{60} \geq 34 \text{ Дж/см}^2$;
- предельное содержание легирующих элементов для разработки новой высокопрочной экономнолегированной стали;
- технологические способы производства, обеспечивающие получение требуемого комплекса свойств для проката толщиной от 8 до 50 мм, заключающиеся в проведении закалки с последующим высоким отпуском, а для толщин до 10 мм – за счет применения технологии контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

Список литературы

1. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е. И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 211 с.
2. Морстройтехнология. URL: <https://morproekt.ru/articles/prezentatsii/147-konstruktivno-tehnologicheskie-resheniya-kak-osnova-protivodejstviya-surovym-prirodno-klimaticeskim-usloviyam-krajnego-severa-pri-stroitelstve-gidrotehnicheskikh-sooruzhenij>
3. Lv Z., Qian L., Liu S., Zhan L., Qin S Preparation and Mechanical Behavior of Ultra-High Strength Low-Carbon Steel // Materials. 2020. Т. 13. № 2. С. 459.
4. Анализ технических требований, предъявляемых к ультрахладостойкому листовому прокату / М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Г. Набатчиков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. Т. 17, № 2. С. 52–60.
5. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Salganik V.M. The study of transformation kinetics for over-cooled austenite of the new high-strength steel with increased cold resistance // CIS Iron and Steel Review. 2020, vol. 19, pp. 56–59.
6. Исследование структуры и механических свойств высокопрочных конструкционных сталей / Банных О.А., Сорокин А.М., Банных И.О. и др. // Электрометаллургия. 2018. № 2. С. 2–7.
7. Солнцев Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы: учебник для вузов. СПб.: Химиздат, 2017. 480 с.
8. Голосиенко С.А., Сошина Т.В., Хлусова Е.И. Новые высокопрочные хладостойкие стали для арктического применения // Производство проката. 2014. № 2. С. 17–24.
9. Инновационные металлические материалы: монография / К.В. Аксенова, Л.А. Барков, М.П. Барышников и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 371 с.
10. Основные виды и области применения наноструктурированного высокопрочного листового проката / Чукин М.В., Салганик В.М., Полецков П.П. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 41–44.
11. Тиссен Р. Г., Пауль Г., Зебальд Р. Новые высокопрочные марки сталей с улучшенными технологическими свойствами // Черные металлы. 2019. № 8. С. 51–55
12. Густов Д.Ю., Густов Ю.И., Юшков А.А. Исследование механических свойств высокопрочных сталей зарубежного производства для строительной техники // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 8. С. 46–49.
13. Разработка импортозамещающей технологии производства листового проката из высокопрочной конструкционной стали северного исполнения / Чукин М.В., Полецков П.П., Гущина М.С. и др. // Производство проката. 2019. № 4. С. 5–11.
14. BS EN 10025-6:2004+A1:2009 Hot rolled products of structural steels — ICS 77.140.10; 77.140.50Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.
15. Металлоснабжение и сбыт. URL: <https://metalinfo.ru/ru/news/116142>
16. Технические новинки. URL: <http://www.kobelcowelding.jp/russian/education-center/technicalhighlight/vol02.html>.
17. Северсталь. URL: <https://www.severstal.com/rus/catalogue/metal/severweld>.

References

1. Rybin V.V., Malyshevsky V.A., Khlusova E.I. *Vysokoprochnye svarivaemye uluchshaemye stali* [High-strength welded heat-treatable steels]. Saint Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2016, 211 p. (In Russ.)
2. Morstroytechnology. Available at: <https://morproekt.ru/articles/prezentatsii/147-konstruktivno-tehnologicheskie-resheniya-kak-osnova-protivodejstviya-surovym-prirodno-klimaticeskim-usloviyam-krajnego-severa-pri-stroitelstve-gidrotehnicheskikh-sooruzhenij>
3. Lv Z., Qian L., Liu S., Zhan L., Qin S. Preparation and mechanical behavior of ultra-high strength low-carbon steel. Materials, 2020, vol. 13, no. 2, p. 459.
4. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatnikov D.G. et al. Analysis of technical requirements for ultra cold-resistant

- steel sheets. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya* [Bulletin of SUSU. Metallurgy series], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 52–60. (In Russ.)
5. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Salganik V.M. The study of transformation kinetics for over-cooled austenite of the new high-strength steel with increased cold resistance. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 19, pp. 56–59.
6. Bannykh O.A., Sorokin A.M., Bannykh I.O. et al. Study on the structure and mechanical properties of high-strength structural steels. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2018, no. 2, pp. 2–7. (In Russ.)
7. Solntsev Yu.P. *Khladostoykie stali i splavy: uchebnik dlya vuzov* [Cold-resistant steels and alloys: Textbook for universities]. Saint Petersburg: Khimizdat, 2017, 480 p. (In Russ.)
8. Golosienko S.A., Soshina T.V., Khlusova E.I. New high-strength cold-resistant steels for Arctic applications. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2014, no. 2, pp. 17–24. (In Russ.)
9. Aksanova K.V., Barkov L.A., Baryshnikov M.P. et al. *Innovatsionnye metallichеские materialy: monografiya* [Innovative metallic materials: monograph]. Magnitogorsk: NMSTU Publishing House, 2016, 371 p. (In Russ.)
10. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P. et al. The main types and applications of nanostructured high-strength sheet metal. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 4 (48), pp. 41–44. (In Russ.)
11. Thiessen R.G., Paul G., Sebald R. Innovative high-strength steels with enhanced mechanical parameters. *Chernye Metally* [Ferrous Metals], 2019, no. 8, pp. 51–55. (In Russ.)
12. Gustov D.Yu., Gustov Yu.I., Yushkov A.A. Study on mechanical properties of high-strength steels of foreign production for construction equipment. *Mekhanizatsiya stroitelstva* [Construction Mechanization], 2017, vol. 78, no. 8, pp. 46–49. (In Russ.)
13. Chukin M.V., Poletskov P.P., Gushchina M.S. et al. Development of an import-substituting technology for the production of sheet products from high-strength structural steel for Arctic service. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2019, no. 4, pp. 5–11. (In Russ.)
14. BS EN 10025-6: 2004 + A1: 2009 Hot rolled products of structural steels - ICS 77.140.10; 77.140.50 Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.
15. *Metallosnabzhenie i sbyt* [Metal Supply and Sales]. Available at: <https://metalinfo.ru/ru/news/116142>
16. Technical highlight. Available at: <http://www.kobelco-welding.jp/russian/education-center/technical-highlight/vol02.html>
17. Severstal. Available at: <https://www.severstal.com/rus/catalogue/metal/severweld>

Поступила 30.09.2020; принята к публикации 02.11.2020; опубликована 25.12.2020
Submitted 30/09/2020; revised 02/11/2020; published 25/12/2020

Полецков Павел Петрович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pavel_poletskov@mail.ru

Кузнецова Алла Сергеевна – младший научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: allakuznetsova@mail.ru

Алексеев Даниил Юрьевич – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: D.U.Alekseev@mail.ru

Никитенко Ольга Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: olganikitenko@list.ru

Лопатина Екатерина Витальевна – магистр,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: lopatina.yekaterina2016@yandex.ru

Pavel P. Poletskov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pavel_poletskov@mail.ru

Alla S. Kuznetsova – Junior Research Associate,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: allakuznetsova@mail.ru

Daniil Yu. Alekseev – postgraduate student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: D.U.Alekseev@mail.ru

Olga A. Nikitenko – PhD (Eng.), Research Associate,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: olganikitenko@list.ru

Ekaterina V. Lopatina – master,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: lopatina.yekaterina2016@yandex.ru