

# НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.771.2

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88>

## НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАХЛАДОСТОЙКОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Полецков П.П.<sup>1</sup>, Хакимуллин К.<sup>2</sup>, Набатчиков Д.Г.<sup>3</sup>, Гущина М.С.<sup>1</sup>, Алексеев Д.Ю.<sup>1</sup>, Кузнецова А.С.<sup>1</sup><sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия<sup>2</sup> Хосокава Колб GmbH, Бонн, Германия<sup>3</sup> ООО «Инжиниринговый центр Термодеформ-МГТУ», Магнитогорск, Россия

### Аннотация

Рассмотрена актуальность разработки и освоения стратегически важной для Российской Федерации технологии производства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката. Выполнен сравнительный анализ основных технических характеристик разрабатываемой продукции и лучших мировых аналогов. Обосновывается целесообразность организации производства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката в условиях российского металлургического предприятия полного цикла. Показано, что свойства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката будут соответствовать основным требованиям, предъявляемым к зарубежной продукции. Кроме того, значения временного сопротивления разрыву будут превышать соответствующие значения свойств зарубежных аналогов не менее чем на 15%, а значения работы удара при низких температурах – не менее чем на 25%. Отмечается, что для разработки технологических режимов, обеспечивающих получение необходимого комплекса свойств, нужно провести комплекс экспериментальных исследований с привлечением ученых и специалистов в области обработки давлением и материаловедения. Описаны основные технологические принципы, обеспечивающие возможность достижения высоких эксплуатационных характеристик стального проката в условиях действующего металлургического производства. Приведены потенциальные потребители разрабатываемой инновационной продукции.

**Ключевые слова:** хладостойкость, наноструктурированная высокопрочная сталь, листового прокат, механические свойства, импортозамещение, машиностроение.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 03.G25.31.0235).*

### Введение

Одним из стратегических направлений развития отечественной экономики в целом и металлургической промышленности России в частности является активное внедрение наукоемких технологий и применение инновационных достижений в области создания и обработки перспективных материалов. Это диктует необходимость создания новых ультрахладостойких сталей и проката, которые должны обладать сложным комплексом механических свойств, определяющих их функциональное назначение – сочетать сверхпрочность и высокую пластичность, обладать высокой износостойкостью и ударной вязкостью при сверхнизких критических температурах.

Это открывает перспективы импортозамещения материалов, в том числе криогенных, используемых в условиях сверхнизких (до  $-196^{\circ}\text{C}$ ) критических температур. Организация производства указанной продукции планируется в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при участии специалистов и ученых ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и Инжинирингового центра «Термодеформ-МГТУ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение по основным техническим характеристикам с лучшими мировыми аналогами [1–7] и результаты оценки конкурентных преимуществ разрабатываемой продукции приведены в **таблице**.

© Полецков П.П., Хакимуллин К., Набатчиков Д.Г., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., 2017.

Сравнение разрабатываемой продукции по основным характеристикам с лучшими мировыми аналогами

Назначение разрабатываемой наукоемкой продукции	Ближайший аналог	Основные характеристики продукции			
		Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup>		Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	
		Аналоги	Разработка	Аналоги	Разработка
Листовой прокат из криогенной конструкционной стали для производства, транспортировки и хранения сжиженного природного газа	N-TUF 295N, 325N; N-TUF 365-570; N-TUFCR 130, 196	27 при -68°C и ниже	34 при -80°C и ниже (до -196°C)	420-820	420-1170
Листовой прокат из низкотемпературной стали для труб по перспективным проектам добычи и транспортировки ПАО «Газпром»	X70, X80	35 при -48°C	50 при -48°C	570-765	610-810
Листовой прокат из хладостойкой высокопрочной стали для транспортного и тяжелого машиностроения	DILLIMAX 690 E – 1100, DI-RACK	27 при -60°C	35 при -60°C	700-1500	700-1750
Листовой прокат из конструкционной стали северного исполнения для мостостроения, производства подъемных механизмов и средств транспортировки грузов	Domex 315 MC – 550 MC, Strenx 700MC E – 1100MC	27 при -40°C	38 при -40°C	390-1450	600-1700

Как следует из таблицы, разрабатываемый ультрахладостойкий наноструктурированный листовой прокат будет обладать высокими эксплуатационными характеристиками, превышающими зарубежные аналоги по сочетанию сверхпрочности и высокой пластичности. Указанный комплекс потребительских характеристик разрабатываемой продукции будет достигнут за счет реализации следующих основных принципов [8–10]:

- обеспечение требуемого химического состава стали, в том числе точности содержания основных легирующих и микролегирующих элементов за счет выплавки стали с использованием процессов внепечного рафинирования и вакуумирования;
- формирование максимально возможной дисперсности параметров микроструктуры стали заданного химического состава с применением специальных научно обоснованных температурно-временных и деформационных параметров многостадийной обработки, сочетающей методы различной физической природы;
- снижение охрупчивания стали за счет строгого контроля тепловых и деформационных режимов обработки в прокатном переделе;
- повышение вязкости стали и исключение скоплений неметаллических включений и их глобуляризации за счет модифицирования;
- улучшение свариваемости и прочностной вязкости стали за счет уменьшения количества углерода;
- повышение прочности и ударной вязкости стали за счет уменьшения размера зерна и прецизионного микролегирования различными карбонитридообразующими металлами (Ti, V, Nb),

соединения которых равномерно выделяются по ферритной матрице и дисперсно упрочняют ее;

- реализация механизма твердорастворного упрочнения металла за счет легирования стали марганцем;
- увеличение прокаливаемости стали за счет легирования элементами бора и хрома;
- повышение сопротивления стали хрупкому разрушению за счет введение добавок никеля, меди и молибдена;
- повышение чистоты стали за счет удаления вредных примесей (серы, фосфора), газов и неметаллических включений;
- достижение требуемого качества продукции при экономически оправданных затратах за счет реализации многостадийной термической обработки листового проката при необходимости.

Ультрахладостойкий наноструктурированный листовой прокат будет производиться на толстолистовом стане 5000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). По результатам предварительных маркетинговых исследований установлено, что основными зарубежными производителями аналогичной импортной продукции являются: Industeel, Бельгия; Voestalpine Grobblech GmbH, Австрия; ArcelorMittal, США; DILLINGER, Германия; SALZGITTER Mannesman Grobblech GMBH, Германия; Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation Group, Япония; JFE Steel Corporation, Япония; SSAB, Швеция; NLMK Clabecq, Бельгия.

Основными потенциальными потребителями разрабатываемой инновационной продукции будут: ПАО «Газпром», ПАО «ЧТПЗ», ПАО «ТМК»,

АО НПО «Тяжкопромарматура», АО «КОНАР», АО «ТД «ММК», ООО «Спецмостоконструкции», АО «ЗТЗ», ЗАО «САЗ», ОАО «АЗ «УРАЛ», ОАО «КАМАЗ», ООО группа «ГАЗ», ЗАО «Курган-стальмост», ЗАО «Воронежстальмост», ЗАО «У-УСМ», ЗАО «Лискимонтажконструкция» и др.

### Заключение

Выполнен анализ основных технических характеристик разрабатываемой продукции в сравнении с лучшими мировыми аналогами. Показано, что механические и эксплуатационные свойства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката будут соответствовать основным требованиям, предъявляемым к зарубежной продукции. Кроме того, значения временного сопротивления разрыву будут превышать их не менее чем на 15%, а значения работы удара при низких температурах – не менее чем на 25%.

### Список литературы

1. Ulewicz R., Mazur M., Bok<sup>o</sup>uvka O. Structure and mechanical properties of fine-grained steels // *Transportation Engineering*. 2013, № 41/2, pp. 111–115.
2. Schwinn V., Bauer J., Fluess P. Recent developments and applications of TMCP steel plates. *Revue de Metallurgie*, 2011, no. 5, pp. 283–294.
3. Junru Li, Chaolei Zhang, Bo Jiang, Leyu Zhou, Yazheng Liu. Effect of large-size M23C6-type carbides on the low-temperature toughness of martensitic heat-resistant steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 685, pp. 248–257.
4. Seok Su Sohn, Seokmin Hong, Junghoon Lee, Byeong-Chan Suh, Sung-Kyu Kim, Byeong-Joo Lee, Nack J. Kim, Sunghak Lee. Effects of Mn and Al contents on cryogenic-temperature tensile and Charpy impact properties in four austenitic high-Mn steels. *Acta Materialia*, 2015, vol. 100, pp. 39–52.
5. Huang Wang, Guo He. Effects of Nb/Cr on the cryogenic impact toughness of the deposited metal of ENiCrFe-9. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 672, pp. 15–22.
6. Lu Y.Q., Hui H. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 130, pp. 628–637.
7. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур / Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В. и др. // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата Eurastrencold-2013. Якутск, 2013. С. 5–7.
8. Влияние легирующих элементов на свойства сталей при различных скоростях охлаждения / Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г. и др. // *Качество в обработке материалов*. 2016. №1 (5). С. 5–8.
9. Математические зависимости механических свойств от химического состава и режимов термической обработки высокопрочного листового проката / Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г. и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. №4. С. 72–75.
10. Исследование влияния температуры отпуска на механические свойства высокопрочного листового проката / Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г. и др. // *Материалы XVII Международной научной конференции «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов»* / под ред. Ярослава Борыца. Ченстохов, 2016. С. 227–231.

Поступила 09.03.17.

Принята в печать 27.04.17.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88>

## THE PURPOSE AND THE APPLICATION OF ULTRA-LOW TEMPERATURE RESISTANT NANOSTRUCTURED ROLLED STEEL

**Pavel P. Poletskov** – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pavel\_poletskov@mail.ru

**Konstantin Khakimullin** – Project Engineer

Hosokawa Kolb GmbH, Bonn, Germany. E-mail: khakimullin@hosokawa-kolb.de, khakimullin.k@gmail.com

**Dmitry G. Nabatchikov** – Ph.D. (Eng.), Deputy Director

Engineering Center Termodeform-NMSTU LLC, Russia. E-mail: nabat4ikov@mail.ru

**Marina S. Gushchina** – Master's Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: marina.mgn.89@mail.ru

**Daniil Yu. Alekseev** – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: D.U.Alekseev@mail.ru

**Alla S. Kuznetsova** – Research Fellow

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: allakuznetsova.mgtu@mail.ru

### Abstract

This article examines the relevance of developing a technique for producing ultra-low temperature resistant nanostructured rolled steel, which is of strategic importance for the Russian Federation. The article includes

a comparative analysis of the key characteristics of the developed product versus its best world counterparts. The authors give their reasons supporting the relevance of launching the production of ultra-low temperature resistant nanostructured rolled steel at an integrated iron

and steel site in Russia. It is shown that the properties of the ultra-low temperature resistant nanostructured rolled steel will meet the requirements set for the foreign counterparts. Compared with its foreign counterparts the above product will have a minimum of 15% gain in tensile strength and a minimum of 25% gain in impact strength. The authors note that in order to define the best processes that will yield the required properties, an experimental study will be required involving academics and experts specialising in metal forming and materials. The article describes the basic technology that can enable an existing steel maker to produce rolled products offering excellent properties. The article also specifies some of the potential consumers of this innovative product.

**Keywords:** Low-temperature resistance, nanostructured high-strength steel, rolled steel, mechanical properties, import substitution, mechanical engineering.

*The work was carried out with financial support from the Ministry of education and science within the framework of the implementation of the complex project on creation of hi-tech production, performed with the participation of Russian educational institutions (contract 03.G25.31.0235).*

#### References

1. Ulewicz R., Mazur M., Bokuvka O. Structure and mechanical properties of fine-grained steels. *Transportation Engineering*. 2013, no. 41/2, pp. 111–115.
2. Schwinn V., Bauer J., Fluess P. Recent developments and applications of TMCP steel plates. *Revue de Metallurgie*, 2011, no. 5, pp. 283–294.
3. Junru Li, Chaolei Zhang, Bo Jiang, Leyu Zhou, Yazheng Liu. Effect of large-size M23C6-type carbides on the low-temperature toughness of martensitic heat-resistant steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 685, pp. 248–257.
4. Seok Su Sohn, Seokmin Hong, Junghoon Lee, Byeong-Chan Suh, Sung-Kyu Kim, Byeong-Joo Lee, Nack J. Kim, Sunghak Lee. Effects of Mn and Al contents on cryogenic-temperature tensile and Charpy impact properties in four austenitic high-Mn steels. *Acta Materialia*, 2015, vol. 100, pp. 39–52.
5. Huang Wang, Guo He. Effects of Nb/Cr on the cryogenic impact toughness of the deposited metal of ENiCrFe-9. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 672, pp. 15–22.
6. Lu Y.Q., Hui H. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 130, pp. 628–637.
7. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic testing of materials, structural elements, equipment and machinery in extremely low temperatures. *Trudy VI Evraziyskiy simpozium po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata Eurastrencold-2013* [Proceedings of the VI Eurasian Symposium on the Strength of Materials and Machines Designed for Cold Climates Eurastrencold-2013], Yakutsk, 2013, pp. 5–7. (In Russ.).
8. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A. The effect of alloying elements on steel properties at different cooling rates. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality of materials processing], 2016, no. 1(5), pp. 5–8. (In Russ.).
9. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu., Khakimullin K. Mathematical dependences between the mechanical properties of high-strength rolled sheet steel and its chemical composition and heat treatment conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 4, pp. 72–75. (In Russ.).
10. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A. Study of the effect of the tempering temperature on mechanical properties of high-strength sheet metal. *Trudy XVII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Novye tekhnologii i dostizheniya v metallurgii i inzhenerii materialov i protsessov": materialy konferentsii pod red. Yaroslava Borytsa* [XVII International Scientific Conference "New Technologies and Developments in Metallurgy and Material and Production Engineering", Proceedings of the conference edited by Jarosław Boryca, Rafal Wyczolkowski], Czestochowa, 2016, pp. 227–231.

Received 09/03/17

Accepted 27/04/17

#### Образец для цитирования

Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / Полецков П.П., Хакимуллин К., Набатчиков Д.Г., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №2. С. 85–88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88>

#### For citation

Poletskov P.P., Khakimullin K., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S. The purpose and the application of ultra-low temperature resistant nanostructured rolled steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 85–88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88>