

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К УЛЬТРАХЛАДОСТОЙКОМУ ЛИСТОВОМУ ПРОКАТУ

**М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Г. Набатчиков,
Д.Г. Емалеева, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова**

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск*

Выполнен анализ технических требований, предъявляемых к ультрахладостойкому листовому прокату по выбранным направлениям наукоемких отраслей промышленности. Определены возможные потребители разрабатываемой продукции и конкуренты, предлагающие аналогичную продукцию. Проведен анализ показателей качества, установленных для аналогичной продукции в технических документах российских и зарубежных организаций. Установлен достигнутый уровень свойств данного вида проката в России и за рубежом.

Ключевые слова: ультрахладостойкий листовый прокат; листовый прокат из криогенной конструкционной стали; листовый прокат из низкотемпературной стали для труб; листовый прокат из хладостойкой высокопрочной стали; листовый прокат из конструкционной стали северного исполнения; технические требования.

Проблема разработки и производства листового проката для изготовления хладостойких изделий ответственного назначения является одной из центральных и наиболее актуальных в современной металлургии. Вместе с тем, она тесно связана с проблемой эффективности производства, т. е. уменьшения затрат при изготовлении материалов и конструкций с требуемым комплексом служебных характеристик.

Стратегия импортозамещения включает разработку, освоение и производство ультрахладостойкого листового проката следующих видов [1–7]:

1) листовый прокат из криогенной конструкционной стали для перспективных проектов производства, транспортировки и хранения сжиженного природного газа;

2) листовый прокат из низкотемпературной стали для труб по перспективным проектам добычи и транспортировки ПАО «Газпром»;

3) листовый прокат из хладостойкой высокопрочной стали для транспортного и тяжелого машиностроения;

4) листовый прокат из конструкционной стали северного исполнения для мостостроения, производства подъемных механизмов и средств транспортировки грузов.

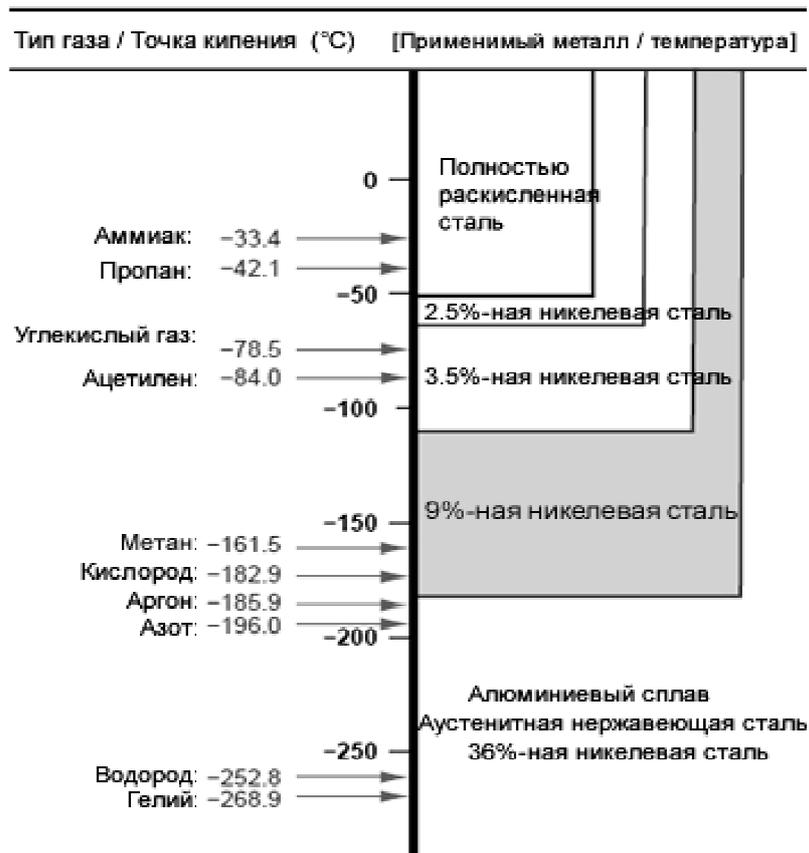
Листовой прокат из криогенной конструкционной стали

На сегодняшний день природный газ является наиболее экономичным, экологичным и безопасным топливом. В России использование природного газа в качестве моторного топлива является одним из приоритетных направлений развития нефтегазового комплекса. Согласно прогнозу Международного газового союза рост парка газобаллонного автотранспорта составит к 2020 г. 50 млн единиц, а к 2030 г. – более 100 млн единиц [8].

Природный газ в качестве моторного топлива может использоваться как в сжатом (сжатом), так и в сжиженном (криогенном) виде. Сжиженный природный газ (СПГ) представляет собой природный газ, охлажденный до температуры $-161,5^{\circ}\text{C}$ для хранения и транспортировки в жидком виде. Хранится сжиженный газ в изотермических резервуарах при температуре кипения, которая поддерживается вследствие его испарения.

Выбор материала резервуаров для сжиженного газа обусловлен точкой кипения соответствующего газа (см. рисунок), так как сжижение должно происходить при крайне низкой температуре.

Стали для криогенной техники должны обеспечивать необходимую прочность в соче-



Точки кипения разных сжиженных газов и металлы, из которых могут производиться резервуары для их хранения [9]

тании с высокой вязкостью и пластичностью, обладать малой чувствительностью к концентрации напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению.

Нормируемыми показателями качества листового проката из криогенной конструкционной стали являются:

- условный предел текучести $R_{p0,2}$, МПа при температуре 20 °С;
- временное сопротивление R_m , МПа при температуре 20 °С;
- относительное удлинение A_{50} , % при температуре 20 °С;
- ударная вязкость KCV Дж/см² (работа удара KV, Дж) при сверхнизких критических температурах до -196 °С;
- поперечное расширение (мм) в результате испытаний Шарпи образца с V-образным надрезом.

В настоящее время данные стали в России не производятся. В связи с этим стратегически важным является освоение технологии производства аналогов импортных криогенных сталей, применяемых при строительстве

объектов производства, транспортировки и хранения СПГ:

- CryElso™ 201LN, 203, 5, 7, 9Q (Industeel, Бельгия);
- никелевые стали X12Ni5, X7Ni9 по EN 10028-4, A / SA 553 Type I по ASTM / ASME 553 (voestalpine Grobblech GmbH, Австрия);
- сталь с содержанием 9 % Ni по ASTM A353, ASTM A553 Type I, (ArcelorMittal, США);
- криогенные стали DILLINGER (Германия) с содержанием 1,5–3,5 % Ni (-105 °С), 5–9 % Ni (-196 °С);
- N-TUF 295N, 325N, 325, 365, 490, 570, N-TUF CR 130, N TUF CR 196 (Nippon Steel Corporation, Япония);
- JIS SLA, SL2N • 3N • 9N, ASTM/ASME A203, A353, A553, JFE-LT1, 5Ni-TM, JFE-HITEN590L, 610L, JFE-HITEN590U2L, 610U2L, JFE-HITEN780FL (JFE Steel Corporation, Япония);
- криогенные стали с 7%-ным содержанием никеля: SL7N 590 по JIS G 3127, A841 Grade G по ASTM A841 / A841M (технология

Таблица 1

Технические требования к листовому прокату из криогенной конструкционной стали для перспективных проектов производства, транспортировки и хранения сжиженного природного газа

№	Толщина проката t , мм	$R_{p0,2}$, МПа	R_m , МПа	A_{50} , %	KCV, не менее			Поперечное расширение, не менее, мм	Импортные аналоги / нормативная документация
		не менее или в пределах			Дж/см ²	при t , °C	\pm / =		
1	≤ 30	355	490–640	22	34	–80	\pm	0,38	CryElso 203, JFE-LT1.5Ni-TM, N-TUF 365, 15Ni14, 12Ni14 / EN 10028-4, ASTM A203 Grade E
	$30 < t \leq 50$	345			50		=		
	$50 < t \leq 80$	335			34		–101		
2	≤ 30	390	530–710	20	50	–80	\pm	0,38	CryElso TM 5, N-TUF ^{CR} 130, X12Ni5 / EN10028-4, ASTM A537 class 2, ASTM A203
	$30 < t \leq 50$				380		75		
	$30 < t \leq 50$	380			34	–120			
					50				
3	≤ 30	490	640–840	18	87	–80	\pm	0,38	CryElso TM 7, CryElso TM 9Q, N-TUF ^{CR} 196, SL7N590, X7Ni9 / ASTM A841 Grade G, ASTM A353, ASTM A553, EN 10028-4
	$30 < t \leq 50$				480		125		
	$30 < t \leq 50$	480			42	–196			
					34				

TMCP Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation Group, Япония).

По результатам анализа зарубежных стандартов на листовую прокат из криогенной конструкционной стали, а также обзора достигнутого уровня свойств данного вида продукции ведущими мировыми производителями, определены технические требования планируемых к освоению криогенных конструкционных сталей (табл. 1).

Листовой прокат из низкотемпературной стали для труб

Для обеспечения высокой надежности газо- и нефтепроводов в сложных климатических условиях листовая прокат для изготовления сварных труб должен иметь повышенный уровень низкотемпературной вязкости, сопротивляемость вязким и хрупким разрушениям при низких температурах, статических, циклических и динамических воздействиях. Использование таких характеристик трещиностойкости, как угол раскрытия при вершине трещины – СТОА, величина раскрытия трещины – СТОД, различные коэффициенты интенсивности напряжений способствует выяснению закономерностей распространения вязких трещин. Анализ существующих требований приведен в табл. 2.

Листовой прокат из хладостойкой высокопрочной стали

Для изготовления тяжело нагруженных сварных конструкций все более широкое

применение получают высокопрочные стали с повышенной хладостойкостью. Необходимость использования таких сталей стала очевидной, прежде всего, в связи с освоением природных ресурсов приполярных районов и Арктического шельфа страны. В связи с этим особую актуальность приобретает освоение и производство импортных аналогов высокопрочных закаленных и отпущенных сталей для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих при низких температурах (до –60 °C):

- JFE-HITEN590U2L, JFE-HITEN590L, JFE-HITEN610U2L, JFE-HITEN610L, JFE-HITEN690L, JFE-HITEN710L, JFE-HITEN780L, JFE-HITEN780FL, JFE-HITEN780ML (JFE Steel Corporation, Япония);

- ABREXTM400LT, 450LT, 500LT (Nippon Steel Corporation, Япония);

- Strenx 700, 900, 960, 1100 (SSAB, Швеция);

- DILLIMAX 690 E, 890 E, 965 E, 1100, DI-RACK (DILLINGER, Германия).

Основные потенциальные потребители инновационной продукции: ОАО «АЗ «УРАЛ», ОАО «КАМАЗ», ООО группа «ГАЗ», ЗАО «Курганстальмост», ЗАО «Воронежстальмост», ЗАО «У-УСМ», предприятия компаний «Мостостройиндустрия», «Уралмостостроя» и прочие.

Листовой прокат из хладостойкой высокопрочной стали должен обладать сложным комплексом требований, сочетающих взаимопротиворечивые характеристики для обеспечения надежности конструкций:

Таблица 2

Технические требования к листовому прокату из низкотемпературной стали для труб

№	Толщина проката t , мм	$R_{e0,5}$, МПа	R_m , МПа	A_2 ($50,8\text{мм}$), %	$R_{t0,5}/R_m$		КСУ, не менее		DWTТ, мм		HV10	СТОД не менее		Скорость общей коррозии, мм/год	Стойкость к водородному растрескиванию, не более		Стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию, не более	Примечание
					не менее	или в пределах	при $t \leq 20^\circ\text{C}$	при $t > 20^\circ\text{C}$	при $t \leq 20^\circ\text{C}$	при $t > 20^\circ\text{C}$		мм	при $t \leq 20^\circ\text{C}$		при $t > 20^\circ\text{C}$	CLR, %		
1	28,5; 30,2; 41,0	505-610 ⊥ 490-590 =	570-680 ⊥ 550-680 =	33 ⊥ =	0,90 ⊥ 0,92 =	213	48	±	90	±	240	0,35	-38	-	-	-	Прокат толстолистовой из низкотемпературной стали К60 для подводных газопроводов	
2	25,8	505-600 ⊥ 495-595 =	600-700 ⊥ 560-700 =	δ_5 22 ⊥ =	0,90 ⊥ =	190	-20 -40 -60	± ± ±	90	-20 -40 -60	250	0,30	-20 -40 -60	-	-	-	Прокат толстолистовой из низколегированной стали К60	
3	16,0	830-1050	915-1145	*	0,99	231	-30 -20	± ±	75	-20 -20	-	0,14	-20	-	-	-	X120 Nippon Steel	
4	20,0	710-830 ⊥ 640-830 =	790-910 ⊥ 755-910 =	25 ⊥ =	0,95 ⊥ =	250 320	-40 -20	± ±	90	-20	300	0,30	-20	-	-	-	Прокат толстолистовой из стали класса прочност К80 (X100) для производства электросварных труб	
5	8,0-20,0	380 ⊥	510-710 ⊥	22 ⊥	0,90 ⊥	105	-60	±	90	-20	250	-	-	-	-	-	Прокат толстолистовой из стали класса (категорий) прочности К52-К60 (X56-X70) для электросварных прямошовных труб	
6	8,0-22,0	290 ⊥	385 ⊥	-	0,90 ⊥	84	-60	±	доля вязкой составляющей в изломе (КСУ)	-	HRB	-	-	0,5	6	3	70	Прокат листовой горячекатаный из низколегированной стали повышенной коррозионной стойкости и хладостойкости
7	8,0-32,0	380-500 ⊥ 380-480 ⊥	510-610 ⊥ 510-610 ⊥	δ_5 23 ⊥	0,90 ⊥ 0,87 ⊥	88,2	-50	±	доля вязкой составляющей в изломе (КСУ)	60 80	HRB < 92 ед.	-	-	0,5	6	3	70	Прокат толстолистовой из стали класса (категорий) прочности К52-К60 (X56-X70) для электросварных прямошовных труб

Таблица 3

Сведения о мировых аналогов хладостойких высокопрочных сталей для транспортного и тяжелого машиностроения

Фирма	Страна	Член ЕС, НАТО	Марка стали	Толщина, мм	σ_{τ} , Н/мм ² , не менее	σ_{τ} , Н/мм ²	δ_5 , %	Механические свойства								
								Удлинение не менее,	Ударная вязкость КСЧ при температуре, °С	Дж/см ² , не менее						
DILLINGER	Германия	ЕС/НАТО	DILLIMAX 690 E	<65	690	770-940	14	50	0							
				65-100	670	770-940				44	-20					
				100-150	630	720-900				38	-40					
				150-200	610	700-880				34	-60					
				<50	890	940-1100				34	-60					
				50-80	850	900-1100										
				80-100	830	880-1100										
				DILLINGER	Германия	ЕС/НАТО				DILLIMAX 965 E	<50	960	980-1150	12	34	-60
											50-60	930	950-1120			
											60-100	850	900-1100			
8-40	1100	1200-1500	34				-40									
DI-RACK Type B	690	770-940	60				-60									
DI-RACK Type S	723	830-990	60				-37									
JFE HITEN590U2L	450	590-710	20				-									
JFE HITEN590L	450	590-710	20				-									
JFE HITEN610U2L	490	610-730	19				-									
JFE HITEN610L	490	610-730	19				-									
JFE Steel Corporation	Япония	-	JFE HITEN690L	6-32	570	690-800	17	-	-							
				JFE HITEN710L	6-40	615				710-840	-	-				
				JFE HITEN780L	6-50	685				780-930	-	-				
				JFE HITEN780FL	6-40	685				780-930	-	-				
				JFE HITEN780ML	<50	685				780-930	16	43	-60			
				ABREX 400LT	4-60	1162				1207	-	34	-40			
				ABREX 450LT	<50	1089				1465	-	34	-40			
				ABREX 500LT	<80	1198				1680	-	27	-40			
				Nippon Steel Corporation	Япония	-				Strenx 700	4-53	700	780-930	14	86	-40
											53-100	650	780-930			
100-160	650	710-900	34				-60									
4-53	900	940-1100	27				-40									
53-100	830	880-1100	27				-60									
4,0-53,0	960	980-1150	12				-40									
SSAB	Швеция	ЕС	Strenx 960	53,1-100	850	900-1100	10	50	-40							
				4-5	1100	1250-1550				27	-40					
				8												

Таблица 4

Характеристики аналогов листового проката из конструкционной стали северного исполнения

Фирма	Страна	Член ЕС, НАТО	Марка стали	Толщина, мм	$\sigma_{\text{т}}$, Н/мм ² , не менее	$\sigma_{\text{в}}$, Н/мм ²	Механические свойства		Ударная вязкость КСЧ Дж/см ² , не менее	Ударная вязкость КСЧ при температуре, °С	Изгиб	
							Удлинение δ_5 , %, не менее	Ударная вязкость КСЧ Дж/см ² , не менее				
ОАО ММК	РФ	–	MAGSTRONG S600MC	6–10	600	650–820	13	–	–	–	1,5t	
			MAGSTRONG S700MC	5–12	700	750–950	12	–	–	–	2t	
			MAGSTRONG S700	8–15	700	750–950	12	–	–	–	–	2t
			MAGSTRONG W600	8–50	600	650–820	15	–	–	–	–	1,5t
			MAGSTRONG W700	8–50	700	750–950	14	–	–	–	–	2t
			MAGSTRONG W900	8–50	950	1050	11	–	–	–	–	5t
			MAGSTRONG A500	8–12	1200	1450	8	–	–	–	–	6t
			Strenx 600 MC	6–10	600	650–820	16	–	–	–	–	1,4t
			Strenx 650 MC	6–10	650	700–850	14	–	–	–	–	1,5t
			Strenx 700 MC	6–10	700	750–950	12	–	–	–	–	1,6t
SSAB	Швеция	ЕС	Strenx 700 MC Plus	3–10	700	750–950	13	–	–	–	1,0t	
			Strenx 900 MC	10–12	700	750–950	13	–	–	–	1,5t	
			Strenx 900 MC	3–8	900	930–1200	8	–	–	–	–	3t
			Strenx 960 MC	8–10	900	930–1200	8	–	–	–	–	3,5t
			Strenx 960 MC	3–10	960	980–1250	7	–	–	–	–	3,5t
			Strenx 960 MC Plus	3–6	960	980–1250	10	–	–	–	–	3,5t
			Strenx 1100 MC	3–8	1100	1250–1450	7	–	–	–	–	4,0t
			Alform 700M	8–15	700	770–1050	10	–	–	–	–	–
			Alform 900 x-treme	15–50	680	770–1050	12	–	–	–	–	–
			Alform 960 x-treme	50–60	650	770–1050	12	–	–	–	–	–
Voestalpine Grobbblech GmbH	Австрия	ЕС	Alform 900 x-treme	8–30	900	940–1100	11	–	–	–	3t	
			Alform 960 x-treme	8–25	960	980–1150	10	–	–	–	3t	
			Alform 1100 x-treme	15–20	1100	1120–1300	8	–	–	–	–	5t
			Alform 1100 x-treme	20–25	1080	1100–1300	8	–	–	–	–	5t
NLMK Slabescq	Бельгия	ЕС/НАТО	Quend 700, Quend 960	4–50	700–960	780–1150	12	–	–	–		

- сочетание высокой прочности и пластичности;
- высокие характеристики ударной вязкости;
- низкая температура вязко-хрупкого перехода;
- высокий уровень трещиностойкости;
- сопротивление усталостному разрушению.

Анализ импортных аналогов хладостойкой высокопрочной стали для транспортного и тяжелого машиностроения приведены в табл. 3.

Листовой прокат из конструкционной стали северного исполнения

Одним из факторов повышения конкурентоспособности металлопроката является снижение себестоимости продукции при обеспечении требуемого заказчиком уровня качества.

Снижение себестоимости продукции без ухудшения потребительских характеристик возможно за счет оптимизации технологического процесса производства – применения экономически эффективных систем легирования и микролегирования, а также рациональных режимов термомеханической прокатки, обеспечивающих заданный уровень механических свойств при наименьших затратах.

Таким образом, целесообразно освоение производства экономичных хладостойких конструкционных сталей по технологии термомеханической прокатки без дополнительной термообработки. К таким сталям относятся импортные высокопрочные стали:

- Alform plate 700M, Alform x-treme, Toughcore (voestalpine Grobblech GmbH, Австрия);
- Strenx 700 MC, Strenx 700 MC Plus, Strenx 900 MC, Strenx 900 Plus, Strenx 960 MC, Strenx 960 Plus, Strenx 1100 MC (SSAB, Швеция).

Эта продукция находит широкое применение в целом ряде отраслей, таких как производство подъемных механизмов и средств транспортировки грузов, изготовлении кранов буровых платформ, поездов и легкорельсовых транспортных средств, мостостроении. Аналоги конструкционной стали северного исполнения приведены в табл. 4.

Выводы

Выполнен анализ технических требований, предъявляемых к ультрахладостойкому листовому прокату, а также уровня свойств дан-

ного вида продукции, достигнутого ведущими зарубежными производителями. Определены основные позиции импортных аналогов хладостойких сталей, планируемых к производству в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 02.G25.31.0235).

Литература

1. Wang, H. *Effects of Nb/Cr on the Cryogenic Impact Toughness of the Deposited Metal of ENiCrFe-9* / H. Wang, G. He // *Materials Science and Engineering A*. – 2016. – Vol. 672. – P. 15–22.
2. *The Behavior of a 1.4301 Stainless Steel Subjected to Cryogenic Temperatures* / I.V. Crismaru, D. Dragomir-Stanciu, M.V. Atanasiu, G.L. Pintilei // *Procedia Technology*. – 2015. – Vol. 19. – P. 247–253.
3. Lu, Y.Q. *Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels* / Y.Q. Lu, H. Hui // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 130. – P. 628–637.
4. *Time-Dependent Temper Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Steel: Correlation Between Microstructural Evolution and Mechanical Properties During Tempering at 650 °C* / Ch. Li, L. Han, G. Yan et al. // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 480. – P. 344–354.
5. *High Strength Quenched and Tempered (Q+T) Steels for Pressure Vessels* / G. Luxemburger, M. Bockelmann, P. Wolf et al. // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2004. – Vol. 81, no. 2. – P. 159–171.
6. *Fatigue and Fracture Behavior of a Nickel-Chromium Free Austenitic Steel* / V.K. Saxena, M.S. Gopala Krishna, P.S. Chhaunker, V.M. Radhakrishnan // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 1994. – Vol. 60, no. 2. – P. 151–157.
7. *Pötzschke, M. Corrosion Resistance of Stainless Steels and Nickel Alloys in Artificial Sea Water* / M. Pötzschke, M.B. Rockel // *Desalination*. – 1983. – Vol. 44, no. 1–3. – P. 295–305.
8. СПГ – проекты. – <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/lng/>
9. *Технические новинки*. – <http://www.kobelco>

welding.jp/russian/education-center/technical-highlight/vol02.html.

10. Шабалов, И.П. О необходимых и достаточных технических требованиях на сталь-

ные электросварные трубы большого диаметра / И.П. Шабалов // Металлург. – 2010. – № 10. – С. 6–12.

Чукин Михаил Витальевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологий обработки материалов, первый проректор – проректор по научной и инновационной работе, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; m.chukin@mail.ru.

Полецков Павел Петрович, д-р техн. наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; pavel_poletskov@mail.ru.

Набатчиков Дмитрий Геннадьевич, канд. техн. наук, заместитель директора ООО «Инжиниринговый центр Термодеформ-МГТУ, г. Магнитогорск; nabat4ikov@mail.ru.

Емалеева Динара Гумаровна, канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; emaleevadg@mail.ru.

Гущина Марина Сергеевна, магистрант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; marina.mgn.89@mail.ru.

Кузнецова Алла Сергеевна, научный сотрудник научно-исследовательского сектора, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Поступила в редакцию 5 апреля 2017 г.

DOI: 10.14529/met170207

ANALYSIS OF TECHNICAL REQUIREMENTS FOR NANOSTRUCTURED STEEL PLATES RESISTANT TO ULTRA-LOW TEMPERATURES

M.V. Chukin, m.chukin@mail.ru,

P.P. Poletskov, pavel_poletskov@mail.ru,

D.G. Nabatchikov, nabat4ikov@mail.ru,

D.G. Emaleeva, emaleevadg@mail.ru,

M.S. Gushchina, marina.mgn.89@mail.ru,

A.S. Kuznetsova, allakuznetsova.mgtu@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The paper presents an analysis of technical requirements for ultra-low temperature resistant steels, which are used in high-tech industry areas. The potential consumers of the developed products are determined and alternative manufacturers are described. Metal quality characteristics that are demanded by technical documents of Russian and foreign organizations for similar products are analyzed. Currently achieved level of properties of this kind of rolled products is also described.

Keywords: low temperature resistant steel plates; cryogenic steels; high-tech pipe steels; high strength steels; northern area steels; technical requirements.

References

1. Wang H., He G. 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. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.067
2. Crismaru I.V., Dragomir-Stanciu D., Atanasiu M.V., Pintilei G.L. The Behavior of a 1.4301 Stainless Steel Subjected to Cryogenic Temperatures. *Procedia Technology*, 2015, vol. 19, pp. 247–253. DOI: 10.1016/j.protcy.2015.02.036
3. 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. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.282
4. Li Ch., Han L., Yan G., Liu Q., Luo X., Gu J. Time-Dependent Temper Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Steel: Correlation Between Microstructural Evolution and Mechanical Properties During Tempering at 650 °C. *Journal of Nuclear Materials*, 2016, vol. 480, pp. 344–354. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.08.039
5. Luxenburger G., Bockelmann M., Wolf P., Hanus F., Cawelius R., Buchholz J. High Strength Quenched and Tempered (Q+T) Steels for Pressure Vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, vol. 81, no. 2, pp. 159–171. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2003.11.006
6. Saxena V.K., Gopala Krishna M.S., Chhaunker P.S., Radhakrishnan V.M. Fatigue and Fracture Behavior of a Nickel-Chromium Free Austenitic Steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1994, vol. 60, no. 2, pp. 151–157. DOI: 10.1016/0308-0161(94)90021-3
7. Pöttschke M., Rockel M.B. Corrosion Resistance of Stainless Steels and Nickel Alloys in Artificial Sea Water. *Desalination*, 1983, vol. 44, no. 1–3, pp. 295–305. DOI: 10.1016/0011-9164(83)87128-8
8. SPG – Proekty [Liquefied Natural Gas – Projects]. Available at: <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/lng/> (accessed 5 April 2017).
9. *Tekhnicheskie novinki* [Technical Innovations]. Available at: <http://www.kobelco-welding.jp/russian/education-center/technical-highlight/vol02.html> (accessed 5 April 2017).
10. Shabalov I.P. [About the Necessary and Sufficient Technical Requirements for Steel Electric-Welded Pipes of Large Diameter]. *Metallurg*, 2010, no. 10, pp. 6–12. (in Russ.)

Received 5 April 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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. DOI: 10.14529/met170207

FOR CITATION

Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Emaleeva D.G., Gushchina M.S., Kuznetsova A.S. Analysis of Technical Requirements for Nanostructured Steel Plates Resistant to Ultra-Low Temperatures. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 52–60. (in Russ.) DOI: 10.14529/met170207
