



УДК 669:620.19+669.15-194.56

DOI 10.17073/0368-0797-2024-5-573-578



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ И ВАНАДИЯ НА КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ Cr – Mn СТАЛЕЙ

Ю. Н. Гойхенберг¹, Д. С. Полухин² ¹ Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)² ООО «Научно-технический центр Конар» (Россия, 454010, Челябинск, Енисейская ул., 8)

poluhin.dmitriy@konar.ru

Аннотация. Исследованы фазовый состав, параметры кристаллической решетки, механические свойства и коррозионная стойкость под напряжением высокоазотистых аустенитных и аустенито-ферритных Cr–Mn сталей после гомогенизирующей обработки, старения и холодной пластической деформации. Установлено, что легирование Cr–Mn сталей кремнием и ванадием может приводить к образованию разных количеств ферромагнитного δ -феррита и уже с малых его содержаний к существенному упрочнению, обусловленному зернограницным эффектом. Присутствие δ -феррита оказывает упрочняющий эффект как после гомогенизирующей обработки, так и при холодной пластической деформации. В легированных ванадием Cr–Mn сталях даже после аустенитизирующей обработки при 1250 °C сохраняется более мелкое зерно аустенита 8 – 9 номера, чем у сталей, легированных кремнием, имеющих после закалки от более низкой температуры (1150 – 1170 °C) большее по размеру зерно 6 – 7 балла. Образование даже небольших количеств δ -феррита приводит к снижению сопротивления коррозионному растрескиванию высокоазотистых хромомарганцевых сталей. При этом сопротивление коррозионному растрескиванию высокоазотистых сталей с δ -ферритом оказывается значительно ниже, чем у содержащих 0,4 % азота и более однофазных Cr–Mn аустенитных сталей. Старение вызывает существенное упрочнение высокоазотистых, легированных как кремнием, так и ванадием, Cr–Mn сталей с δ -ферритом и сопровождается потерей ферромагнетизма при значительном уменьшении ударной вязкости и пластичности. Исчезновение ферромагнетизма, по-видимому, обусловлено тем, что происходит распад δ -феррита на σ -фазу и парамагнитный азотсодержащий аустенит. Микроструктурные и рентгеноструктурные исследования свидетельствуют о том, что старение стали с δ -ферритом протекает по непрерывному механизму, сопровождающемуся монотонным снижением параметра решетки аустенита в связи с выделением из него нитридов. Старение двухфазных сталей, приводящее к исчезновению δ -феррита и ферромагнетизма, вызвало катастрофическое снижение стойкости против коррозионного растрескивания.

Ключевые слова: высокоазотистые Cr – Mn стали, δ -феррит, микроструктура, механические свойства, коррозионная стойкость под напряжением

Для цитирования: Гойхенберг Ю.Н., Полухин Д.С. Влияние кремния и ванадия на коррозионно-механические свойства высокоазотистых Cr – Mn сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(5):573–578. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-573-578>

EFFECT OF SILICON AND VANADIUM ON CORROSION-MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-NITROGEN Cr – Mn STEELS

Yu. N. Goikhenberg¹, D. S. Polukhin² ¹ South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)² LLC “Scientific and Technical Centre KONAR” (8 Eniseiskaya Str., Chelyabinsk 455030, Russian Federation)

poluhin.dmitriy@konar.ru

Abstract. The authors studied the phase composition, crystal lattice parameters, mechanical properties and stress corrosion resistance of high-nitrogen austenitic and austenitic-ferritic Cr–Mn steels after homogenizing treatment, aging and cold plastic deformation. It was established that alloying of Cr–Mn steels with silicon and vanadium can lead to the formation of different amounts of ferromagnetic δ -ferrite and, from its low content, to significant hardening due to the grain-boundary effect. The presence of δ -ferrite has a hardening effect both after homogenizing treatment and during cold plastic deformation. In vanadium-alloyed Cr–Mn steels, even after austenitization treatment at 1250 °C, a finer grain of austenite of 8 – 9 numbers is retained than those of steels alloyed with silicon, having after quenching from a lower temperature (1150 – 1170 °C) larger grain

of 6 – 7 numbers. Formation of even small amounts of δ -ferrite leads to a decrease in corrosion cracking resistance of high-nitrogen chromium-manganese steels. At the same time, corrosion resistance of high-nitrogen steels with δ -ferrite is significantly lower than that of austenitic steels containing 0.4 % nitrogen and more single-phase Cr–Mn. Aging causes significant hardening of high-nitrogen, alloyed with both silicon and vanadium, Cr–Mn steels with δ -ferrite and is accompanied by a loss of ferromagnetism with a significant decrease in toughness and ductility. Disappearance of ferromagnetism seems to be due to the fact that δ -ferrite disintegrates into a σ -phase and a paramagnetic nitrogen-containing austenite. Microstructural and X-ray diffraction studies indicate that the aging of steel with δ -ferrite proceeds by a continuous mechanism, accompanied by a monotonous decrease in the lattice parameter of austenite due to the release of nitrides from it. Aging of two-phase steels, leading to the disappearance of δ -ferrite and ferromagnetism, caused a catastrophic decrease in corrosion cracking resistance.

Keywords: high-nitrogen Cr – Mn steels, δ -ferrite, microstructure, mechanical properties, stress corrosion resistance

For citation: Goikhenberg Yu.N., Polukhin D.S. Effect of silicon and vanadium on corrosion-mechanical properties of high-nitrogen Cr – Mn steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(5):573–578. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-573-578>

ВВЕДЕНИЕ

При оценке перспектив, последовательности освоения и результатов использования безуглеродных технологий в металлургии отмечается [1], что альтернативой углероду, как упрочняющему сталь элементу, может быть азот, который ее упрочняет в большей мере, чем углерод в традиционных сталях [2; 3]. Разработаны коррозионностойкие высокоазотистые стали, содержащие не менее 12 мас. % хрома и имеющие высокую статическую и циклическую прочность, износостойкость, повышенную способность к пластической деформации при сохранении хорошей пластичности и ударной вязкости [4; 5]. Известно, что аустенитные Cr–Ni и Cr–Mn стали, а также коррозионностойкие мартенситные и аустенито-мартенситные стали имеют низкое сопротивление коррозионному растрескиванию (КР) под напряжением [6]. Более высокие значения предела длительной коррозионной стойкости наблюдаются у сталей ферритного и аустенито-ферритного классов. Не подверженными коррозионному растрескиванию в различных средах оказались аустенитные высокоазотистые Cr–Mn стали, которые обладают еще высокой стойкостью против водородной хрупкости и высокой коррозионно-усталостной прочностью [7 – 10].

В работах [10; 11] рассмотрено влияние кремния на тонкую структуру и износостойкость высокоазотистых Cr–Mn сталей в условиях сухого трения скольжения. Установлено, что легирование кремнием повышает сопротивление адгезионному изнашиванию при сохранении низких значений коэффициента трения

($f = 0,25 – 0,33$). Влияние кремния на трибологические свойства этих сталей связано с активизацией планарного скольжения дислокаций. В работе [10] также отмечается, что хромомарганцевые метастабильные аустенитные стали, легированные 0,15 – 0,25 мас. % азота, обладают повышенным сопротивлением кавитационно-эрозионному разрушению [12] и абразивному изнашиванию [13], которое во многом объясняется образованием при контактном нагружении α -мартенсита деформации. Высокое сопротивление стали Nitronic 60 адгезионному изнашиванию авторы [14; 15] связывают с низкой энергией дефектов упаковки аустенита, способностью стали к интенсивному деформационному упрочнению и образованию на поверхности трения окисных пленок, препятствующих схватыванию.

Представляет интерес оценить сопротивление КР азотсодержащих Cr–Mn сталей с аустенито-ферритной структурой. Целью работы является изучение влияния некоторых ферритообразующих элементов (таких как кремний и ванадий) на коррозионно-механические свойства Cr–Mn сталей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Стали выплавляли в обычных условиях при атмосферном давлении в 60-кг индукционной печи. Химический состав изученных сталей приведен в табл. 1. Содержание серы и фосфора во всех выплавленных сталях не превышало 0,01 и 0,04 мас. % соответственно. Слитки азотсодержащих сталей гомогенизировали при 1150 °С в течение 8 – 15 ч и проковывали на

Таблица 1. Химический состав высокоазотистых Cr – Mn сталей и содержание в них δ -феррита

Table 1. Chemical composition of high-nitrogen Cr – Mn steels and content of δ -ferrite in them

Марка стали	Содержание элементов, вес. %						Количество δ -феррита, %
	N	Si	V	Cr	Mn	C	
10X16Г17C4A0,3	0,28	4,50	0,09	16,0	17,1	0,11	3
12X19Г19C2A0,5	0,50	2,37	0,13	19,3	19,4	0,13	0
10X19Г20C4A0,5	0,52	4,30	0,18	19,6	20,3	0,10	32
07X18Г19ФА0,4	0,42	0,49	1,04	17,5	18,9	0,07	5
07X19Г18ФА0,7	0,73	0,35	1,07	18,8	18,0	0,07	0

прутки сечением $20 \times 20 \text{ мм}^2$, из которых для определения механических свойств изготавливали стандартные пятикратные разрывные образцы диаметром рабочей части 5 мм и стандартные образцы сечением $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с U-образным надрезом для испытаний на ударную вязкость.

Предел прочности и условный предел текучести сталей определяли с погрешностью $\pm 5 \text{ МПа}$, относительное удлинение – с точностью 0,1 %. Испытания на КР проводили по специально разработанной методике [16] в 20 %-ном водном растворе поваренной соли в дистиллированной воде при комнатной температуре и напряжениях 0,80 – 0,95 от предела текучести.

Микроструктуру изучали на оптическом микроскопе Axio Observer.D1m. Магнитометрические измерения осуществляли на α -фазометре, фиксирующем содержание δ -феррита.

Рентгеноструктурные исследования выполняли на дифрактометре ДРОН-4-07 в железном излучении. Качественный и количественный фазовый анализ осуществляли по методу Ритвельда [17] после оптимизации интерференционных максимумов. Точность количественного фазового анализа составляла $\pm 5 \%$. Прецизионные измерения параметра решетки аустенита проводили по последним интерференционным линиям $311_{\alpha 1}$ и $222_{\alpha 1}$, снятым в дискретном режиме с шагом $0,02^\circ$ [18; 19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеноструктурный и магнитометрический фазовый анализ свидетельствуют о том, что Cr–Mn стали 12X19Г19C2A0,5 и 07X19Г18ФА0,7 находятся в аустенитном состоянии (табл. 1). В сталях с меньшим содержанием азота дополнительно присутствует незначительное количество (3 – 5 %) ферромагнитной фазы δ -феррита, а в стали с 4 % кремния содержание δ -феррита достигает 32 %. Дисперсные зерна δ -феррита разной формы и размеров располагаются, в основном, по границам зерен аустенита (рис. 1).

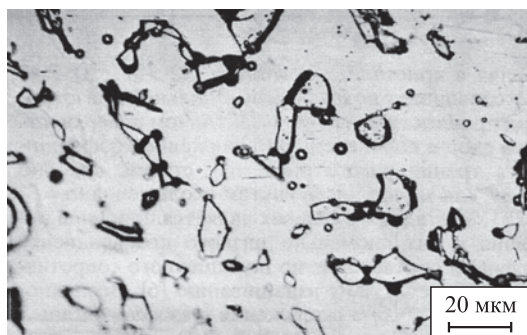


Рис. 1. Микроструктура закаленной от 1100°C стали 10X19Г20C4A0,5 с δ -ферритом

Fig. 1. Microstructure of quenched from 1100°C 10Kh19G20S4A0.5 steel with δ -ferrite

Стали, легированные кремнием, после гомогенизирующей обработки при $1150 - 1170^\circ \text{C}$ имели одинаковый размер аустенитного зерна, соответствующий 6 – 7 баллу. В легированных ванадием сталях даже после аустенитизирующей обработки при 1250°C сохраняется более мелкое зерно аустенита 8 – 9 номера.

Механические свойства сталей после гомогенизирующей обработки приведены в табл. 2. Для сравнения в нижней части таблицы показаны механические свойства подобных Cr–Mn аустенитных сталей с близкой концентрацией азота, но не легированных кремнием или ванадием. Видно, что при равной концентрации азота стали, содержащие δ -феррит, имеют более высокие прочностные свойства и более низкие значения относительного сужения и ударной вязкости, чем аустенитные стали, не легированные кремнием или ванадием, которые способствуют образованию феррита.

Высокоазотистые Cr–Mn стали, содержащие δ -феррит, как и аналогичные аустенитные стали, интенсивно упрочняются в процессе холодной пластической деформации при сохранении хорошей пластичности. Степень упрочнения ($\Delta\sigma/\Delta\epsilon$) сталей с разной концентрацией азота и кремния, а также критическая степень холодной деформации ($\epsilon_{\text{кр}}$), необходимая для достижения у некоторых ответственных изделий (например, бандажных колец мощных турбогенераторов) предела текучести 1200 Н/мм^2 , приведены в табл. 3.

По этим параметрам аустенито-ферритные стали, содержащие 0,3 – 0,5 % азота и 4 % кремния, оказались близки к сталям, не легированным кремнием и содержащим большее количество азота. В то же время легирование 2 % кремния аустенитной стали 12X19Г19C2A0,5 практически не повлияло на степень упрочнения и критическую степень деформации $\epsilon_{\text{кр}}$. Эти параметры оказались такими же, как у стали 08X18Г18A0,5. Отсюда, по-видимому, следует, что присутствие δ -феррита оказывает упрочняющий эффект (зернограницное упрочнение) как после гомогенизи-

Таблица 2. Механические свойства высокоазотистых сталей после гомогенизирующей обработки

Table 2. Mechanical properties of high-nitrogen steels after homogenizing treatment

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ , %	Ψ , %	KCU, Дж/см ²
10X16Г17C4A0,3	465	908	66	63	287
12X19Г19C2A0,5	522	924	65	72	–
10X19Г20C4A0,5	590	982	52	61	–
07X18Г19ФА0,4	530	890	46	63	122
07X19Г18ФА0,7	720	1100	43	62	181
05X14Г20A0,3	350	720	68	74	–
08X18Г18A0,5	530	910	67	73	360
08X19Г19A0,7	570	990	63	72	300

Таблица 3. Степень упрочнения ($\Delta\sigma/\Delta\epsilon$) при холодной пластической деформации на 15, 30, 40 % и критическая степень деформации ($e_{кр}$) для разных Cr – Mn сталей

Table 3. Hardening degree ($\Delta\sigma/\Delta\epsilon$) during cold plastic deformation by 15, 30, 40 % and critical deformation degree ($e_{кр}$) for different Cr – Mn steels

Марка стали	$\Delta\sigma/\Delta\epsilon$ для различных степеней деформации, %			$e_{кр}$, %	Время испытания на КР, ч
	15	30	40		
10X16Г17C4A0,3	56,0	36,2	30,5	37	450 – 500 √
12X19Г19C2A0,5	56,0	37,0	31,2	36	3000 ∧
10X19Г20C4A0,5	65,4	41,6	34,2	27	300 – 2000 √
05X14Г20A0,3	42,0	29,0	24,7	50	430 – 550 √
08X18Г18A0,5	55,0	36,7	31,0	36	5000 ∧
08X19Г19A0,7	66,0	42,0	34,7	26	5300 ∧

Примечание: √ – образцы разрушились при испытаниях на КР; ∧ – образцы сняты с испытаний без следов КР

рующей обработки, так и при холодной пластической деформации.

В тоже время образование даже небольших количеств δ -феррита снижает сопротивление коррозионному растрескиванию высокоазотистых Cr–Mn сталей. Так, если образование 3 % δ -феррита в стали 10X16Г17C4A0,3 не оказало заметного влияния на стойкость против КР по сравнению с аналогичной бескремнистой аустенитной сталью 05X14Г20H4A0,3, имеющей низкую стойкость, то присутствие 32 % δ -феррита в стали 10X19Г20C4A0,5 катастрофически понизило ее сопротивление коррозионному растрескиванию по сравнению с аустенитной сталью 08X18Г18A0,5, не подверженной коррозионному растрескиванию [20 – 22] (табл. 3). В случае легирования кремнием и сохранения аустенитной структуры (сталь 12X19Г19C2A0,5) уменьшения стойкости против КР не наблюдается. Аналогичным образом присут-

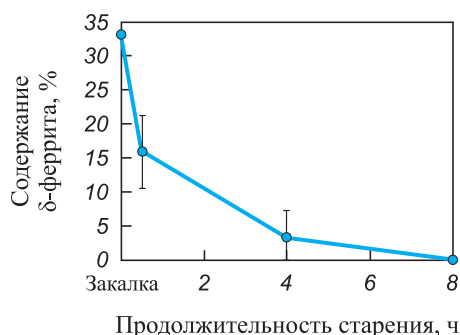


Рис. 2. Изменение содержания δ -феррита в стали 10X19Г20C4A0,5 в зависимости от продолжительности старения при 700 °C

Fig. 2. Change in the content of δ -ferrite in 10Kh19G20S4A0.5 steel depending on duration of aging at 700 °C

ствие δ -феррита сказывается и на сталях, легированных ванадием. Так двухфазная сталь 07X18Г19ФА0,4 подвержена коррозионному растрескиванию в течение 250 – 750 ч при напряжениях 1050 – 1150 Н/мм², а аустенитная сталь 07X19Г18ФА0,7 при том же уровне напряжений снималась с испытаний в течение 5000 ч без каких-либо следов коррозионного растрескивания.

Старение вызывает существенное упрочнение высокоазотистых, легированных как кремнием, так и ванадием, Cr–Mn сталей с δ -ферритом, переводя их в немагнитное состояние. Так, предел текучести ванадийсодержащей высокоазотистой стали 07X18Г19ФА0,4 с 5 % δ -феррита после 16 ч выдержки при 650 °C увеличивается на 290 Н/мм², а аустенитной 07X19Г18ФА0,7 – лишь на 190 Н/мм² по сравнению с гомогенизирующей обработкой при значительном уменьшении ударной вязкости и пластичности у обеих сталей. Отрицательное влияние ванадия и кремния на пластичность и ударную вязкость отмечается также для стареющих углеродсодержащих аустенитных сталей [23]. Заметим, что в высокоазотистой стали, легированной кремнием и содержащей 32 % δ -феррита, твердость после 2 – 4 ч выдержки при 700 °C увеличивается до 35 – 37 HRC, что сопоставимо с твердостью высокоотпущенных легированных сталей с 0,4 % C.

Необходимо отметить, что после старения стали с δ -ферритом становятся немагнитными, по-видимому, в результате его распада (согласно диаграмме состояния) на σ -фазу и парамагнитный азотсодержащий аустенит. При этом содержание δ -феррита монотонно уменьшается с увеличением длительности старения (рис. 2). Микроструктурные и рентгеноструктурные исследования свидетельствуют о том (рис. 3), что старение стали с δ -ферритом протекает по непрерывному механизму, сопровождающемуся монотонным снижением параметра решетки аустенита в связи с выделе-

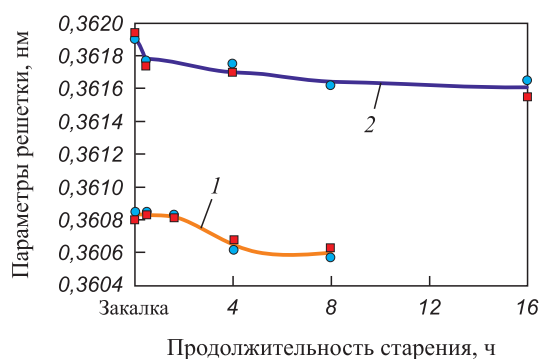


Рис. 3. Зависимость параметра решетки аустенита сталей 10X16Г17C4A0,3 (1) и 10X19Г20C4A0,5 (2) от продолжительности старения при 700 °C:

● – расчет по линии 311_{а1}; ■ – расчет по линии 222_{а1}

Fig. 3. Dependence of austenite lattice parameter of steels 10Kh16G17S4A0.3 (1) and 10Kh19G20S4A0.5 (2) on duration of aging at 700 °C:

● – calculation by line 311_{а1}; ■ – calculation by line 222_{а1}

нием из него нитридов. В то же время в высокоазотистых Cr–Mn сталях аустенитного класса, содержащих более 0,3 % азота и не легированных кремнием, при старении получает существенное развитие прерывистый распад аустенита [24].

Старение двухфазных сталей, приводящее к исчезновению δ -феррита, вызвало катастрофическое снижение стойкости против КР, при этом состаренные образцы испытывали коррозионное растрескивание при выбранных условиях испытания уже в течение 10 – 70 ч.

Выводы

Легирование высокоазотистых Cr–Mn сталей кремнием или ванадием приводит к образованию δ -феррита и существенному упрочнению как после гомогенизирующей обработки, так и при холодной пластической деформации, что обусловлено зернограницным эффектом.

В легированных ванадием Cr–Mn сталях даже после аустенитизирующей обработки при 1250 °C сохраняется более мелкое зерно аустенита (8 – 9 балла), чем у сталей, легированных кремнием, имеющих уже после обработки при 1150 – 1170 °C более крупное зерно 6 – 7 номера.

Образование даже небольших количеств (3 – 5 %) δ -феррита в высокоазотистых Cr–Mn аустенитных сталях одновременно с упрочнением приводит к снижению сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением.

Старение сопровождается дополнительным снижением коррозионной стойкости под напряжением, исчезновением намагниченности и существенным упрочнением высокоазотистых Cr–Mn сталей с δ -ферритом, что обусловлено его распадом, по-видимому, на σ -фазу и азотсодержащий парамагнитный аустенит, а также выделением нитридов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Рошин В.Е., Рошин А.В., Кузнецов Ю.С., Гойхенберг Ю.Н. Технологические и материаловедческие аспекты перехода в черной металлургии на безуглеродные процессы. *Черные металлы*. 2021;(11):10–17. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.11.02>
Roshchin V.E., Roshchin A.V., Kuznetsov Yu.S., Goikhenberg Yu.N. Technological and materials science aspects of the transition in ferrous metallurgy to carbon-free processes. *Chernye metally*. 2021;(11):10–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2021.11.02>
2. Рашев Ц.В. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. София: Издательство Болгарской АН «Проф. Марин Дримов»; 1995:268.
3. Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. Азот как легирующий элемент в сплавах на основе железа. В сборнике научных трудов: *Фазовые и структурные превращения в*
4. *сталях*. Выпуск 3. Под ред. В.Н. Урцева. Магнитогорск; 2003:576.
Kostina M.V., Rigina L.G. Nitrogen-containing steels and methods of their production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(8):606–622. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-606-622>
5. Singhal L.K. Characteristics, distinctive advantages & wide ranging applications of chrome-manganese stainless steels. *Advanced Materials Research*. 2013;794:103–116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.794.103>
6. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. Москва: Металлургия; 1985:270–271.
7. Stein G. Generator-Kappenringe aus nichtmagnetisierbaren Stählen ihre mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerte und ihr Widerstand gegen Korrosion. *VGB Kraftwerkstechnik*. 1985;65(11):1069–1074. (In Germ.).
8. Speidel M.O. Nichtmagnetisierbare Stähle für Generator-Kappenringe, ihr Widerstand gegen Korrosionsermüdung. *VGB Kraftwerkstechnik*. 1981;61(12):1048–1053. (In Germ.).
9. Гойхенберг Ю.Н., Журавлев Л.Г., Мирзаев Д.А., Журавлева В.В., Силина Е.П., Внуков В.Ю. Исследование коррозионного растрескивания, структуры и свойств упрочненных Cr–Mn аустенитных сталей с азотом. *Физика металлов и металловедение*. 1988;65(6):1131–1137.
Goikhenberg Yu.N., Zhuravlev L.G., Mirzaev D.A., Zhuravleva V.V., Silina E.P., Vnuikov V.Yu. Investigation of corrosion cracking, structure and properties of Cr–Mn hardened austenitic steels with nitrogen. *Fizika metallov i metallove-denie*. 1988;65(6):1131–1137. (In Russ.).
10. Коршунов Л.Г., Гойхенберг Ю.Н., Черненко Н.Л. Влияние кремния на структуру, трибологические и механические свойства азотсодержащих хромомарганцевых аустенитных сталей. *Физика металлов и металловедение*. 2003;96(5):100–110.
Korshunov L.G., Goikhenberg Yu.N., Chernenko N.L. Effect of silicon on the structure, tribological behavior, and mechanical properties of nitrogen-containing chromium-manganese austenitic steels. *Physics of Metals and Metallography*. 2003;96(5):535–544.
11. Коршунов Л.Г., Гойхенберг Ю.Н., Черненко Н.Л. Микро-структура, трибологические и механические свойства азотсодержащих нержавеющей аустенитных сталей на хромомарганцевой основе. В сборнике научных трудов: *Фазовые и структурные превращения в сталях*. Выпуск 3. Под ред. В.Н. Урцева. Магнитогорск; 2003:215–242.
12. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. Москва: Металлургия; 1972:189.
13. Lenel U.R., Knott B.R. Structure and properties of corrosion and wear resistant Cr–Mn–N steels. *Metallurgical Transactions A*. 1987;18:847–855. <https://doi.org/10.1007/BF02646926>
14. Schumacher W.J. Stainless steel alternative to cobalt wear alloys. *Chemical Engineering*. 1981;88(19):149–152.
15. Ohriner R.K., Wada T., Whelan E.P., Ocken H. The chemistry and structure of wear-resistant, iron-base hardfacing alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1991;22(5):983–991. <https://doi.org/10.1007/BF02661091>

16. Журавлев Л.Г., Журавлева В.В., Гойхенберг Ю.Н., Мирзаев Д.А. Методика ускоренных испытаний пластичных деформированных металлов на коррозионное растрескивание. *Заводская лаборатория*. 1992;58(3):44–46.
Zhuravlev L.G., Zhuravleva V.V., Goikhenberg Yu.N., Mirzaev D.A. Methodology of accelerated testing of plastic deformed metals for corrosion cracking. *Zavodskaya laboratoriya*. 1992;58(3):44–46.
17. Кржижановская М.Г., Фирсова В.А., Бубнова Р.С. Применение метода Ритвельда для решения задач порошковой дифрактометрии: Учебное пособие. Санкт-Петербургский университет; 2016:67.
18. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. Москва: Металлургия; 1980.
19. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Москва: МИСИС; 1994:328.
20. Speidel M.O. Nitrogen containing austenitic stainless steels. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2006; 37(10):875–880. <https://doi.org/10.1002/mawe.200600068>
21. Рашев Ц.В., Елисеев А.В., Жекова Л.Ц., Боев П.В. Высокоазотистые стали. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(7):503–510.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-7-503-510>
Rashev Ts.V., Eliseev A.V., Zhekova L.Ts., Bogeve P.V. High nitrogen steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(7):503–510. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-7-503-510>
22. Oldfield J.W. Crevice corrosion resistance of commercial and high purity experimental stainless steels in marine environments – the influence of N, Mn, and S. *Corrosion*. 1990;46(7):574–581. <https://doi.org/10.5006/1.3585151>
23. Банных О.А., Блинов В.М. Дисперсионно-твердеющие немагнитные ванадийсодержащие стали. Москва: Наука; 1980:189.
24. Гойхенберг Ю.Н., Мирзаев Д.А., Мирмельштейн В.А., Внуков В.Ю., Лобанова Т.Г. Структура и коррозионно-механические свойства высокоазотистых Cr–Mn сталей с ванадием, упрочненных старением и холодной деформацией. *Физика металлов и металловедение*. 1991;(8):176–182.
Goikhenberg Yu.N., Mirzaev D.A., Mirmel'shtein V.A., Vnukov V.Yu., Lobanova T.G. Structure and corrosion-mechanical properties of high-nitrogen Cr–Mn steels with vanadium hardened by aging and cold deformation. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1991;(8):176–182.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Юрий Нафтулович Гойхенберг, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор кафедры «Материаловедение и физико-химия материалов», Южно-Уральский государственный университет
E-mail: goikhenbergyn@susu.ru

Дмитрий Сергеевич Полухин, к.т.н., исполнительный директор, ООО «Научно-технический центр КОНАР»
E-mail: polukhin.dmitriy@konar.ru

Yurii N. Goikhenberg, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Prof. of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University
E-mail: goikhenbergyn@susu.ru

Dmitrii S. Polukhin, Cand. Sci. (Eng.), Executive Director, LLC “Scientific and Technical Centre KONAR”
E-mail: polukhin.dmitriy@konar.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024
После доработки 02.04.2024
Принята к публикации 23.08.2024

Received 20.03.2024
Revised 02.04.2024
Accepted 23.08.2024