



Оригинальная статья

УДК 621.791.011

DOI 10.17073/0368-0797-2022-2-113-119



ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ АРКТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

М. А. Шекшеев, Е. Н. Ширяева, С. В. Михайлицын,
А. Б. Сычков, А. Н. Емелюшин

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Работа посвящена исследованиям по установлению причин образования трещин в сварных соединениях высокопрочной стали арктического назначения на основе изучения структуры и механических свойств металла шва и зоны термического влияния. Потребителями машиностроительной продукции предъявляются все более высокие требования к сварным соединениям металлоконструкций. Это обуславливает необходимость применения для их производства проката из сталей, которые обладают повышенными механическими и специальными свойствами. В работе показано, что при сварке сталей типа MAGSTRONG W700 в локальных участках сварных соединений наблюдается образование трещин. Установлено, что структура металла шва сварных соединений стали MAGSTRONG W700 характеризуется наличием столбчатых кристаллов с твердостью 312 – 323 HV. Структура металла на участке перегрева зоны термического влияния характеризуется наличием укрупненного первичного зерна, а также пакетными образованиями бейнита и бейнито-мартенсита с твердостью 338 – 352 HV. Уровень временного сопротивления разрыву металла зоны термического влияния составляет 618 – 627 МПа. В зависимости от температуры испытания, значения ударной вязкости металла зоны термического влияния изменяются от 62 до 86 Дж/см². Сталь MAGSTRONG W700 обладает хорошей сопротивляемостью к образованию горячих трещин при сварке ($UCS = 20,3$), однако имеет повышенную склонность к образованию холодных трещин ($C_{эв} \geq 0,48$). Анализ полученных данных показал, что разрушение сварных соединений исследуемой стали происходит по причине ее неудовлетворительной свариваемости. Такая свариваемость обусловлена сложной химической композицией, а также целой совокупностью факторов (таких как формирование неблагоприятных структур в металле сварных соединений при воздействии термических циклов сварки, сложная картина сварочных напряжений, уровень которых превышает временное сопротивление разрыву металла). Структура металла шва имеет крупнокристаллическое строение, что значительно ослабляет соединение.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, сварной шов, зона термического влияния, свариваемость, холодные трещины, горячие трещины, структура металла, механические свойства

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых – гранта Президента РФ (№ МК-3849.2021.4).

Для цитирования: Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н., Михайлицын С.В., Сычков А.Б., Емелюшин А.Н. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений высокопрочной низколегированной стали арктического назначения // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 113–119. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-113-119>

Original article

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL FOR ARCTIC PURPOSES

M. A. Sheksheev, E. N. Shiryaeva, S. V. Mikhailitsyn,
A. B. Sychkov, A. N. Emelyushin

Nosov Magnitogorsk State Technical University (38 Lenina Ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

Abstract. The work is devoted to the research of cracks causes in welded joints of high-strength steel for arctic purposes based on the study of the structure and mechanical properties of the weld metal and the zone of thermal influence. Consumers of machine-building products make increasingly high demands on welded joints of metal structures. This necessitates the use of rolled steels for their production, which have increased mechanical and

special properties. When welding MAGSTRONG W700 type steels, cracks are observed in local sections of welded joints. It was established that the structure of the weld metal of welded joints of MAGSTRONG W700 steel is characterized by the presence of columnar crystals with a hardness of 312 – 323 HV. The metal structure in the overheating area of thermal influence zone is characterized by the presence of enlarged primary grain, as well as batch formations of bainite and bainite-martensite with hardness of 338 – 352 HV. The level of temporary resistance to rupture of the metal in thermal influence zone is 618 – 627 MPa. Depending on the test temperature, values of the impact strength of the metal in thermal influence zone vary from 62 to 86 J/cm². MAGSTRONG W700 steel has good resistance to the formation of hot cracks during welding ($UCS = 20,3$), however, it has an increased tendency to form cold cracks ($C_E = 0,48$). Analysis of the data obtained showed that destruction of welded joints of the studied steel occurs due to its unsatisfactory weldability. Such weldability is due to a complex chemical composition, as well as a whole set of factors (such as the formation of unfavorable structures in the metal of welded joints under the influence of thermal welding cycles, a complex picture of welding stresses, the level of which exceeds the temporary resistance to metal rupture). Also, the structure of the weld metal has a large-crystalline structure, which significantly weakens the connection.

Keywords: high-strength steel, welded joint, thermal influence zone, weldability, cold cracks, hot cracks, metal structure, mechanical properties

Funding: The work was supported by a grant of the President of the Russian Federation (No. MK-3849.2021.4).

For citation: Shekshееv M.A., Shiryayeva E.N., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B., Emelyushin A.N. Structure and mechanical properties of welded joints of high-strength low-alloy steel for arctic purposes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 113–119. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-113-119>

ВВЕДЕНИЕ

Заказчиками и потребителями машиностроительной продукции предъявляются все более высокие требования к сварным соединениям металлоконструкций [1 – 5]. Это обуславливает необходимость применения для производства металлоконструкций проката из сталей, которые обладают повышенными механическими и специальными свойствами [6 – 9].

Потребность рынка в высококачественных материалах обусловила необходимость разработки новых сталей, которые могут обеспечить комплекс высоких эксплуатационных свойств. В частности, был разработан широкий спектр сталей типа MAGSTRONG [10, 11].

Для изготовления ответственных сварных конструкций, работающих в условиях крайнего севера и Арктики, предназначена сталь типа MAGSTRONG W700 [12 – 15]. Эта сталь относится к группе низколегированных высокопрочных сталей с дополнительным микролегированием карбидо- и нитридообразующими элементами.

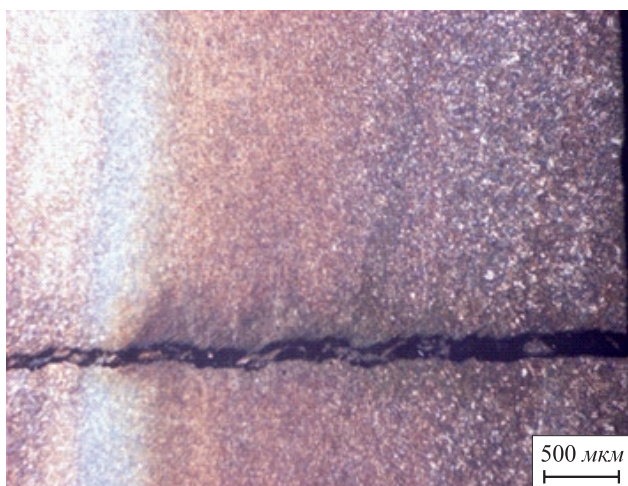


Рис. 1. Поперечная трещина, направленная прямолинейно в глубь металла

При изготовлении элементов кузова карьерного самосвала, выполненного из стали MAGSTRONG W700, происходит неоднократное растрескивание сварных соединений в течение первых суток после проведения сварочных работ. Поперечные (рис. 1) и продольные трещины образуются в зоне термического влияния (ЗТВ) на границах основного металла и металла шва.

Учитывая вышеизложенное, целью настоящей работы является установление причин образования трещин в сварных соединениях стали типа MAGSTRONG W700 на основе изучения структуры и механических свойств металла шва и ЗТВ, и аналитической оценки склонности стали к образованию трещин при сварке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнялись на фрагментах проката из стали MAGSTRONG W700 толщиной 15 мм. Исследуемая сталь содержит, % (по массе): 0,08 C; 0,30 Si; 0,65 Mn; 0,005 S; 0,012 P; 0,45 Cr; 1,65 Ni; 0,40 Cu; 0,30 Mo; 0,001 Ti; 0,02 Nb; 0,005 V; 0,007 N; 0,02 Al.

Механические свойства исследуемой стали MAGSTRONG W700 (по данным изготовителя): временное сопротивление (σ_B) 750 – 950 МПа; предел текучести (σ_T) 700 МПа; ударная вязкость KCV_{-70} 50 Дж/см²; относительное удлинение δ_5 14 %.

В состоянии поставки сталь имеет структуру бейнита (рис. 2) с твердостью по Виккерсу 330 – 336 HV.

Образцы проката размерами 330×100×15 мм с V-образной разделкой сваривали между собой дуговыми способами. Корень шва выполнялся покрытыми электродами марки АНО-25 диам. 3,0 мм на токе 80 – 100 А обратной полярности в нижнем положении. Заполнение разделки шва и его облицовка выполнялась сварочной проволокой Св-10ГН диам. 1,2 мм на токе 150 – 200 А обратной полярности, в среде защитного газа (18 % Ar + 82 % CO₂), в нижнем положении.

Микроструктурный анализ выполняли на поперечных травленых шлифах сварных соединений, на световом микроскопе Olympus GX 71.

Fig. 1. Transverse crack, directed in a straight line deep into the metal

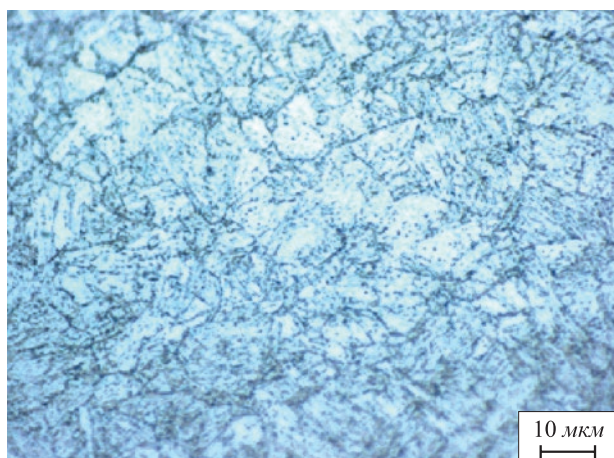


Рис. 2. Микроструктура стали MAGSTRONG W700 в состоянии поставки

Fig. 2. Microstructure of MAGSTRONG W700 steel in the delivery state

Испытания на статическое растяжение металла сварных соединений проводили согласно ГОСТ 6996 – 66. Испытания проводили на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z 250.

Ударную вязкость металла шва и ЗТВ определяли на образцах Шарпи с V-образным надрезом. Образцы вырезали согласно схемам, представленным в ГОСТ 6996 – 66. Дно надреза располагалось в металле участка перегрева ЗТВ и металле шва. Испытания проводили на маятниковом копре фирмы Zwick/Roell RK 450 при температуре образцов –20, –40 и –70 °С. Охлаждение образцов выполняли в жидкостном термостате, в среде этилового спирта.

Твердость измеряли по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999 – 75 с помощью универсального прибора Zwick/Roell ZHU 3000 top.

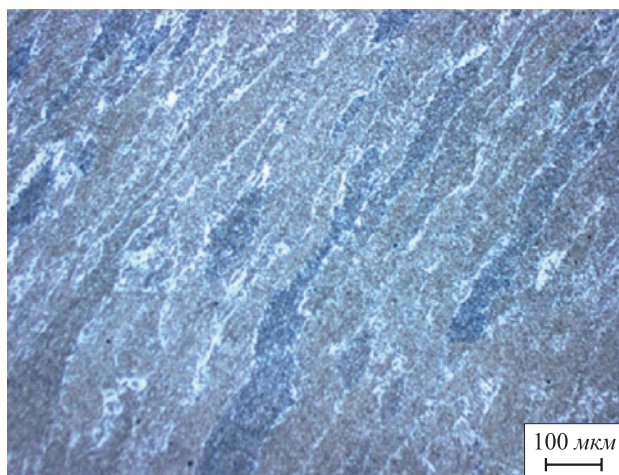


Рис. 3. Структура металла шва (столбчатые кристаллы) стали MAGSTRONG W700

Fig. 3. Structure of the weld metal (columnar crystals) of MAGSTRONG W700 steel

Склонность стали исследуемого состава к образованию горячих и холодных трещин оценивали на основе решения ряда параметрических уравнений. Склонность к образованию горячих трещин оценивали на основе определения параметра UCS в соответствии с европейским стандартом «EN 1011–2: 2001»:

$$UCS = 230C + 190S + 75P + 45Nb + 12,3Si - 5,4 Mn - 1, \quad (1)$$

где C, S, P, Nb, Si, Mn – массовые доли в стали углерода, серы, фосфора, ниобия, кремния, марганца, %.

Склонность стали к образованию холодных трещин при воздействии сварочного нагрева оценивали на основе расчета параметров углеродного эквивалента $C_{\text{ЭКВ}}$:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}; \quad (2)$$

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + \Sigma(V + Ti + Nb)}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} + 15B. \quad (3)$$

где C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu, Ti, Nb, B – массовые доли в стали углерода, марганца, хрома, молибдена, ванадия, никеля, меди, титана, ниобия, бора, %.

Формула (2) рекомендована «Международным институтом сварки», а формула (3) предназначена для низкоуглеродистых сталей с дополнительным микролегированием [16, 17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Металлографический анализ показал, что металл шва характеризуется наличием столбчатых кристаллов с твердостью 312 – 323 HV, ориентированных перпендикулярно к плоскости теплоотвода (рис. 3). Соединение имеет достаточно четкую границу между основным и наплавленным металлом (рис. 4), зона сплавления представлена частично оплавившимися зернами основного металла, переходящими к дендроидной структуре металла шва. Участок перегрева ЗТВ характеризуется укрупненным первичным зерном, а также наличием характерных пакетных образований структур бейнита и бейнито-мартенсита с твердостью 338 – 352 HV (рис. 4, 5). Считается, что именно на этом участке сварных соединений низкоуглеродистых, низколегированных сталей наблюдается наиболее низкий уровень механических свойств [18, 19].

Сравнительные механические испытания показали, что прочностные свойства металла ЗТВ сварных соединений значительно уступают свойствам основного металла. Так, временное сопротивление разрыву металла ЗТВ находится в диапазоне 618 – 627 МПа, при этом временное сопротивление разрыву основно-

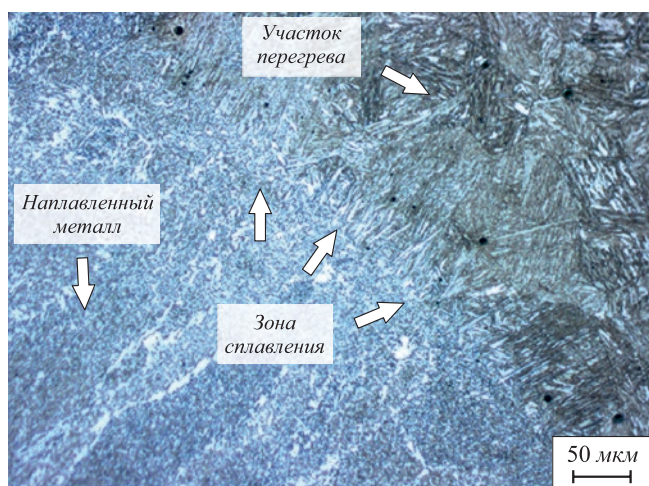


Рис. 4. Структура сварного соединения стали MAGSTRONG W700 (наплавленный металл – зона сплавления – участок перегрева ЗТВ)

Fig. 4. Structure of the welded joint of MAGSTRONG W700 steel (weld metal – fusion zone – superheat section of thermal influence zone)

го металла находится на уровне 842 – 868 МПа. Значения предела текучести металла ЗТВ также на порядок ниже (507 – 521 МПа), чем у основного металла (814 – 828 МПа). Результаты сравнительных испытаний на статическое растяжение основного металла и сварного соединения (разрыв по ЗТВ) стали MAGSTRONG W700 (временное сопротивление σ_b , предел текучести σ_T , относительное удлинение δ_5) приведены ниже:

Образец	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , мм
Основной металл	842 – 868	814 – 828	16,0
Сварное соединение	618 – 627	507 – 521	12,8

Ударная вязкость основного металла снижается при понижении температуры испытания образца (рис. 6) от 194 Дж/см² при –20 °С до 42 Дж/см² при –70 °С. При-

мерно на одном уровне с основным металлом находятся значения KCV металла шва (рис. 6).

Металл ЗТВ имеет более низкое значение ударной вязкости, чем основной металл, однако при понижении температуры испытания ударная вязкость остается практически неизменной ($KCV_{-20} = 62 \div 76$ Дж/см²; $KCV_{-40} = 62 \div 73$ Дж/см²) и даже несколько повышается ($KCV_{-70} = 71 \div 86$ Дж/см²) (рис. 6). Следует отметить, что уровень KCV при температуре испытания –70 °С оказался выше, чем у основного металла. Возможно, это связано с морфологическими особенностями структур, сформировавшихся в ЗТВ, несмотря на рост первичного зерна аустенита продукты его распада имеют дисперсную структуру и обеспечивают достаточно высокий уровень KCV при пониженных температурах испытания.

Аналитическая оценка склонности стали к трещинообразованию показала, что исследуемая сталь по параметру UCS (1) не является склонной к образованию горячих трещин при сварке. Расчетное значение параметра трещиностойкости ($UCS = 20,3$) не превышает критического ($UCS < 30$ – сталь не склонна к горячим трещинам). При этом расчет углеродного эквивалента по формулам (2) и (3) ($C_{эв} = 0,48$ и $C_{эв} = 0,49$) показал, что данная сталь обладает повышенной склонностью к образованию холодных трещин ($C_{эв} \geq 0,45$ – сталь склонна к холодным трещинам [20]).

Анализ данных, полученных на промышленных образцах, и результатов проведенных исследований позволяет заключить следующее: разрушение сварных соединений стали MAGSTRONG W700 происходит по причине неудовлетворительной свариваемости данной стали, обусловленной высокими значениями углеродного эквивалента, а также совокупностью факторов (таких как формирование неблагоприятных структур в металле сварных соединений при воздействии термических циклов сварки, сложная картина сварочных



Рис. 5. Структура металла участка перегрева ЗТВ (бейнит – мартенсит) стали MAGSTRONG W700

Fig. 5. Structure of the metal of thermal influence zone superheat section (bainite-martensite) of MAGSTRONG W700 steel

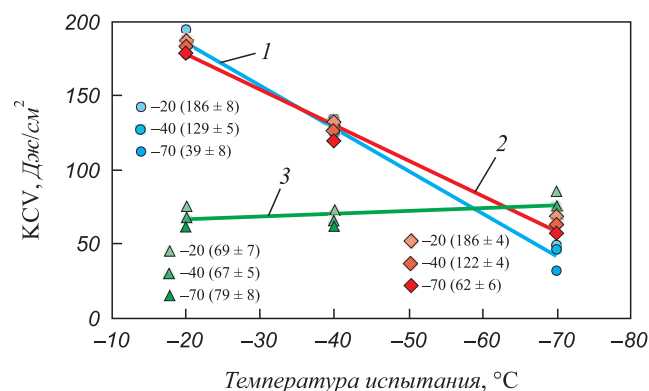


Рис. 6. Ударная вязкость основного металла (1, ●), металла шва (2, ◆) и металла ЗТВ (3, ▲) стали MAGSTRONG W700 при различных температурах испытания

Fig. 6. Impact strength of the base metal (1, ●), of the weld metal (2, ◆) and metal of thermal influence zone (3, ▲) of MAGSTRONG W700 steel at various test temperatures

напряжений, уровень которых превышает временное сопротивление металла).

Выводы

Структура металла шва сварных соединений стали MAGSTRONG W700 характеризуется наличием столбчатых кристаллов с твердостью 312 – 323 HV. Структура металла участка перегрева ЗТВ характеризуется укрупненным первичным зерном, а также наличием пакетных образований бейнита и бейнито-мартенсита с твердостью 338 – 352 HV. Уровень временного со-

противления разрыву металла ЗТВ (618 – 627 МПа) на 200 МПа меньше временного сопротивления основного металла (842 – 868 МПа). Металл ЗТВ имеет более низкую ударную вязкость чем основной, однако при понижении температуры испытания ударная вязкость остается практически неизменной и даже несколько повышается ($KCV_{-20} = 62 \div 76$ Дж/см²; $KCV_{-40} = 62 \div 73$ Дж/см²; $KCV_{-70} = 71 \div 86$ Дж/см²). Сталь MAGSTRONG W700 обладает хорошей сопротивляемостью к образованию горячих трещин при сварке ($UCS = 20,3$), однако имеет повышенную склонность к образованию холодных трещин ($C_{\text{ЭКБ}} \geq 0,48$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Якушин Б.Ф., Килев В.С., Тихонов В.П., Потапов С.В. О системном подходе к решению проблемы свариваемости хладостойких мостовых сталей // Тяжелое машиностроение. 2018. № 7-8. С. 32–39.
2. Ерофеев В.В., Шарафиев Р.Г., Альмухаметов А.А., Макаров Л.В., Киреев И.Р., Якупов В.М., Игнатьев А.Г., Ерофеев С.В. Оценка долговечности сварных соединений металлоконструкций объектов нефтегазодобывающего комплекса на основе ускоренных испытаний // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2019. № 1 (109). С. 19–22. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2019-1\(109\)-19-22](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2019-1(109)-19-22)
3. Ma Q. Microstructure design and properties of X100 gas line pipe // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 585. No. 1. Article 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/585/1/012025>
4. Kaçar R., Emre H.E., İşineri A.Ü., Najafiharehtapeh A. Effects of welding methods on the mechanical properties of joining dissimilar steel couple // Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 2018. Vol. 33. No. 1. P. 255–265. (In Turk.) <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406797>
5. Староконь И.В., Калашников П.К. Оценка эффективности технологии ремонта сварного соединения «К»-типа морских стационарных платформ с учетом накопленных повреждений // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 4 (328). С. 56–60. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-4\(328\)-56-60](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-4(328)-56-60)
6. Perec A., Musial W., Prazmo J., Sobczak R., Radomska-Zalas A., Bieda A., Nagnajewicz S., Pude F. Multi-criteria optimization of the abrasive waterjet cutting process for the high-strength and wear-resistant steel Hardox 500 // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. P. 145–154. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53491-2_16
7. Dzioba I., Pala R. Strength and fracture toughness of Hardox-400 steel // Metals. 2019. Vol. 9. No. 5. Article 508. <https://doi.org/10.3390/met9050508>
8. Dzioba I.R., Pała R. Influence of the local stresses and strains at the crack tip on the mechanism of fracture of Hardox-400 steel // Materials Science. 2019. Vol. 55. No. 1-2. P. 345–351. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00308-w>
9. Górka J., Czupryński A., Zuk M., Adamiak M., Kopyś A. Properties and structure of deposited nanocrystalline coatings in relation to selected construction materials resistant to abrasive wear // Materials. 2018. Vol. 11. No. 7. Article 1184. <https://doi.org/10.3390/ma11071184>
10. Полецков П.П., Гушина М.С., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г. Исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства высокопрочного листового проката // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 4. С. 88–92.
11. Gulikov Y.V., Turyshcheva A.V., Vinogradova I.V. Producing steels with special properties using a jet heat treatment system // Key En-
1. Yakushin B.F., Kilev V.S., Tikhonov V.P., Potapov S.V. On system approach to the problem of weldability of cold-resistant bridge steels. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2018, vol. 7-8, pp. 32–39. (In Russ.).
2. Erofeev V.V., Sharafiev R.G., Al'mukhametov A.A., Makarov L.V., Kireev I.R., Yakupov V.M., Ignat'ev A.G., Erofeev S.V. Evaluation of metallic structures' welded joints durability at the objects of oil and gas producing complex based on accelerated testing. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*. 2019, no. 1 (109), pp. 19–22. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2019-1\(109\)-19-22](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2019-1(109)-19-22)
3. Ma Q. Microstructure design and properties of X100 gas line pipe. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 585, no. 1, article 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/585/1/012025>
4. Kaçar R., Emre H.E., İşineri A.Ü., Najafiharehtapeh A. Effects of welding methods on the mechanical properties of joining dissimilar steel couple. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2018, vol. 33, no. 1, pp. 255–265. (In Turk.) <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406797>
5. Starokon' I.V., Kalashnikov P.K. Efficiency estimation of the technology of “K”-type welded joint repair of marine stationary platforms with account of accumulated damages. *Stroitel'stvo nef'tyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2020, no. 4 (328), pp. 56–60. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-4\(328\)-56-60](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-4(328)-56-60)
6. Perec A., Musial W., Prazmo J., Sobczak R., Radomska-Zalas A., Bieda A., Nagnajewicz S., Pude F. Multi-criteria optimization of the abrasive waterjet cutting process for the high-strength and wear-resistant steel Hardox 500. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021, pp. 145–154. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53491-2_16
7. Dzioba I., Pala R. Strength and fracture toughness of Hardox-400 steel. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 5, article 508. <https://doi.org/10.3390/met9050508>
8. Dzioba I.R., Pała R. Influence of the local stresses and strains at the crack tip on the mechanism of fracture of Hardox-400 steel. *Materials Science*. 2019, vol. 55, no. 1-2, pp. 345–351. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00308-w>
9. Górka J., Czupryński A., Zuk M., Adamiak M., Kopyś A. Properties and structure of deposited nanocrystalline coatings in relation to selected construction materials resistant to abrasive wear. *Materials*. 2018, vol. 11, no. 7, article 1184. <https://doi.org/10.3390/ma11071184>
10. Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu., Nabatchikov D.G. Effect of heat treatment conditions on mechanical properties of high-strength rolled steel sheet. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2015, no. 4, pp. 88–92. (In Russ.).
11. Gulikov Y.V., Turyshcheva A.V., Vinogradova I.V. Producing steels with special properties using a jet heat treatment system. *Key Engi-*

- gineering Materials. 2020. Vol. 854. P. 30–36.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.854.30>
12. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. Development of heat treatment modes for novel structural sparingly alloyed high-strength steel for arctic and far north applications // *Metal Science and Heat Treatment*. 2021. Vol. 63. No. 3–4. P. 171–177. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00666-w>
13. Poleckov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S. Effects of heat treatment on microstructure parameters, mechanical properties and cold resistance of sparingly alloyed high-strength steel // *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. P. 197–202.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.197>
14. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Salganik V.M. The study of transformation kinetics for overcooled austenite of the new high-strength steel with increased cold resistance // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. P. 56–59.
<https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.01.11>
15. Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A., Alekseev D.Yu. The study of influence of heat treatment procedures on structure and properties of the new high-strength steel with increased cold resistance // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 20. P. 50–54.
<https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.11>
16. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М. Особенности подхода к оценке свариваемости низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей // *Сварочное производство*. 2010. № 5. С. 5–11.
17. Емельюшин А.Н., Сычков А.Б., Шекшеев М.А. Исследование свариваемости высокопрочной трубной стали класса прочности K56 // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2012. № 3 (39). С. 26–30.
18. Yemelyushin A.N., Sychkov A.B., Manin V.P., Shekshyev M.A. Investigation of the structure and mechanical properties of welded joints in steels of the K56 strength grade in different welding conditions // *Welding International*. 2014. Vol. 28. No. 1. P. 70–74.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2013.796658>
19. Konat L. Structural aspects of execution and thermal treatment of welded joints of Hardox extreme steel // *Metals*. 2019. Vol. 9. No. 9. Article 915. <https://doi.org/10.3390/met9090915>
20. Сычков А.Б., Емельюшин А.Н., Михайлицын С.В., Шекшеев М.А. Структура и свойства зоны термического влияния сварных соединений трубного листового проката класса прочности K56, K60 // *Сталь*. 2014. № 4. С. 87–89.
- neering Materials. 2020, vol. 854, pp. 30–36.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.854.30>
12. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. Development of heat treatment modes for novel structural sparingly alloyed high-strength steel for arctic and far north applications. *Metal Science and Heat Treatment*. 2021, vol. 63, no. 3–4, pp. 171–177. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00666-w>
13. Poleckov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S. Effects of heat treatment on microstructure parameters, mechanical properties and cold resistance of sparingly alloyed high-strength steel. *Defect and Diffusion Forum*. 2021, vol. 410, pp. 197–202.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.197>
14. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Salganik V.M. The study of transformation kinetics for overcooled austenite of the new high-strength steel with increased cold resistance. *CIS Iron and Steel Review*. 2020, vol. 19, pp. 56–59.
<https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.01.11>
15. Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A., Alekseev D.Yu. The study of influence of heat treatment procedures on structure and properties of the new high-strength steel with increased cold resistance. *CIS Iron and Steel Review*. 2020, vol. 20, pp. 50–54.
<https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.11>
16. Efimenko L.A., Elagina O.Yu., Vyshemirskii E.M. Estimation of weldability of low-carbon high-strength pipe steels. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2010, no. 5, pp. 5–11. (In Russ.).
17. Emelyushin A.N., Sychkov A.B., Shekshyev M.A. Weldability of high-strength pipe steel of K56 strength grade. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2012, no. 3 (39), pp. 26–30. (In Russ.).
18. Yemelyushin A.N., Sychkov A.B., Manin V.P., Shekshyev M.A. Investigation of the structure and mechanical properties of welded joints in steels of the K56 strength grade in different welding conditions. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 1, pp. 70–74.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2013.796658>
19. Konat L. Structural aspects of execution and thermal treatment of welded joints of Hardox extreme steel. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 9, article 915. <https://doi.org/10.3390/met9090915>
20. Sychkov A.B., Emelyushin A.N., Mikhailitsyn S.V., Shekshyev M.A. Structure and properties of thermal influence zone of welded joints of pipe sheet of K56, K60 strength grade. *Stal'*. 2014, no. 4, pp. 87–89. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Максим Александрович Шекшеев, к.т.н., доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроение», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0003-4790-2821

E-mail: shekshyev@yandex.ru

Елена Николаевна Ширяева, аспирант кафедры «Технологии обработки материалов», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: e.shyryaeva@mail.ru

Сергей Васильевич Михайлицын, к.т.н., доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроение», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: svmikhaylitsyn@mail.ru

Александр Борисович Сычков, д.т.н., профессор кафедры литейного производства и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0002-0886-1601

E-mail: absychkov@mail.ru

Maksim A. Shekshyev, Cand. Sci. (Eng), Assist. Prof. of the Chair “Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering”, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0003-4790-2821

E-mail: shekshyev@yandex.ru

Elena N. Shiryayeva, Postgraduate of the Chair “Materials Processing Technologies”, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: e.shyryaeva@mail.ru

Sergei V. Mikhailitsyn, Cand. Sci. (Eng), Assist. Prof. of the the Chair “Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering”, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: svmikhaylitsyn@mail.ru

Aleksandr B. Sychkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Foundry and Material Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-0886-1601

E-mail: absychkov@mail.ru

Алексей Николаевич Емелюшин, д.т.н., профессор кафедры литейного производства и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
E-mail: emelushin@magtu.ru

Aleksei N. Emelyushin, Prof. of the Chair of Foundry and Material Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University
E-mail: emelushin@magtu.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

М. А. Шекшеев – формирование концепции статьи, определение цели и задачи исследования, подготовка текста, обработка графического материала.

Е. Н. Ширяева – проведение исследований, анализ результатов исследований, подготовка текста, подготовка библиографического списка.

С. В. Михайлицын – проведение расчетов и анализ их результатов.

А. Б. Сычков – научное руководство, анализ результатов исследований.

А. Н. Емелюшин – научное руководство, формирование концепции статьи, анализ результатов исследований.

M. A. Sheksheev – formation of the article concept, setting the research goals and objectives, writing the text, processing of graphic material.

E. N. Shiryaeva – conducting research, analysis of the research results, writing the text, preparation of references.

S. V. Mikhailitsyn – carrying out calculations and analyzing their results.

A. B. Sychkov – scientific guidance, analysis of the research results.

A. N. Emelyushin – scientific guidance, formation of the article concept, analysis of the research results.

Поступила в редакцию 01.02.2021
После доработки 12.12.2021
Принята к публикации 17.12.2021

Received 01.02.2021
Revised 12.12.2021
Accepted 17.12.2021