

# Влияние условий эксплуатации на формирование нано- и ультрадисперсных зернограничных дефектов в сварных соединениях

УДК 669.1.017



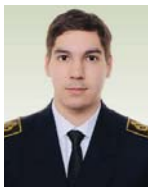
**Б. С. Ермаков,**  
заведующий лабораторией<sup>1</sup>, докт. техн. наук,  
профессор



**С. Б. Ермаков,**  
директор научно-образовательного центра<sup>1</sup>



**С. А. Воложанина,**  
профессор кафедры материаловедения  
и технологии художественных изделий<sup>2</sup>,  
докт. техн. наук, доцент,  
эл. почта: svet\_spb@mail.ru



**Р. М. Хузнахметов,**  
аспирант<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

## Введение

Хромоникелевые аустенитные стали широко применяют в условиях низких температур, включая системы ожигения, транспортирования и хранения сжиженных газов, поэтому проблема работоспособности и надежности изготавливаемого из них оборудования является весьма актуальной [1–3]. В условиях воздействия агрессивных сред на материал и сварные соединения оборудования газопереработки одним из наиболее часто встречающихся дефектов, приводящих к разрушению установок, являются коррозионные трещины, развивающиеся по механизмам коррозионного растрескивания (КР) под напряжением в агрессивной среде и межкристаллитной коррозии (МКК) [4–6].

Известно, что в энергетических объектах, особенно в зоне сварных соединений, на долю различных видов коррозионных дефектов приходится до 40 % всех повреждений и разрушений [7–10]. Не меньшие поте-

Развитие добычи, переработки, хранения и транспортирования сжиженного природного газа требует надежной эксплуатации оборудования. По этой причине крайне важным является грамотный выбор материала для изготовления деталей низкотемпературного оборудования. Следует учитывать, что такое оборудование работает в широком температурном диапазоне, подвергается воздействию различного вида нагрузок — статических, динамических, циклических, а также влиянию как внешних, так и рабочих агрессивных сред. По этой причине для изготовления ответственных деталей, узлов, сосудов и трубопроводов чаще всего применяют хромоникелевые аустенитные стали, в частности сталь 12Х18Н(10–12)Т. Известно, что в условиях низких температур, вплоть до температур жидкого гелия, составляющих  $-253^{\circ}\text{C}$ , такие стали работают достаточно надежно. Однако нагревы до высоких температур, достигающих  $1400^{\circ}\text{C}$  в ходе сварочных или ремонтных работ и неоднократные технологические разогревы, связанные с высокотемпературной продувкой неразъемных, фильтрующих рабочую среду систем, приводят к перераспределению в границы зерен примесных элементов. Формирование нано- и ультрадисперсных зернограничных дефектов приводит к возникновению коррозионных трещин, которые развиваются по механизмам коррозионного растрескивания и межкристаллитной коррозии.

Рассмотрено влияние длительной эксплуатации и высокотемпературных нагревов на работоспособность оборудования, изготовленного из стали 12Х18Н12Т. Показано, что именно зоны сварных соединений являются потенциально опасными относительно выхода из строя отдельных участков низкотемпературного оборудования. Таким образом, при продлении ресурса оборудования, отработавшего расчетный срок службы, и проведении операций технической диагностики особое внимание следует уделять участкам зон термического влияния.

**Ключевые слова:** нано- и ультрадисперсные дефекты, аустенитная сталь 12Х18Н12Т, низкотемпературное оборудование, зоны термического влияния, коррозионное растрескивание, межкристаллитная коррозия.

**DOI:** 10.17580/tsm.2023.08.13

ри несут ядерная, химическая, нефтехимическая и газоперерабатывающая отрасли промышленности, так как они объединены родственными производственными процессами — переработкой и сжиганием газообразного сырья или топлива, и в них широко применяют низкотемпературные технологии [5–10].

Проблема зарождения и развития коррозионных трещин и пути повышения надежности оборудования из хромоникелевых сталей является одной из наиболее значимых в низкотемпературном оборудовании [11–14]. Развитие коррозионных дефектов при низких температурах предполагается невозможным или крайне замедленным, однако необходимо учитывать особенности

эксплуатации низкотемпературных систем, а именно: технологические разогревы криогенного оборудования, связанные с высокотемпературной продувкой (прожигом и восстановлением) неразъемных фильтрующих рабочую среду систем [15–18]. Такие продувки применяют, например, в системах сжижения гелия, изготовленных из аустенитных хромоникелевых сталей [4, 17, 19].

В настоящее время основной группой хромоникелевых сталей, используемых в промышленности, являются стали типа (08-12)X18H(10-12)Т [20–23]. Ресурс значительного числа трубопроводов, аппаратов и сосудов, изготовленных из этих сталей в 1980–1990 гг., приблизился к предельно допустимому или уже превышает его [24–26]. Замена всего эксплуатируемого оборудования невозможна по экономическим и техническим причинам, поэтому в ходе технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности таких объектов, проводимых с целью уточнения их остаточного (за пределами расчетного) срока безопасной эксплуатации, необходим тщательный контроль зон, в которых вероятно появление коррозионных повреждений [27–29].

#### Материал и методика исследования

Исследовали образцы, вырезанные из различных сварных соединений участков низкотемпературного оборудования, отработавшего либо приблизившегося к исчерпанию ресурса, изготовленного из хромоникелевой аустенитной стали марки 12Х18Н12Т. Влияние напряженного состояния на электрохимические характеристики стали 12Х18Н12Т исследовали при непрерывной деформации образца со скоростью 1 мм/мин. Кинетику анодного процесса изучали в растворе сульфата натрия с концентрацией 1 моль/л раствора при электрохимическом потенциале 0,6 В, что соответствует пассивному, т. е. не склонному к КР состоянию стали. Для изучения влияния остаточных напряжений вырезанные из трубопровода образцы искусственно подвергли дополнительному деформированию — прокатке на величину от 1 до 20 %. Концентрацию примесных элементов в зернограничном твердом растворе в слое толщиной 100 нм определяли методом Оже-спектро-

скопии [29] с использованием ESCA/AES-спектрометра PHJ-548 (обеспечивающего чувствительность  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  %, точность анализа 5–10 %, с разрешением по глубине в пределах 3–30 нм). Достоинством метода является возможность получения результатов распределения элементов в монослойном слое поверхности разрушения, а с учетом послойного ионного травления — получения концентрационных срезов по глубине от поверхности разрушения. Для оценки влияния локальных пластических деформаций образцы различных зон термического влияния подвергали холодной дробной прокатке при комнатной температуре с шагом пластического деформирования 2 %.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Анализ значительного числа повреждений на различных объектах позволяет утверждать, что наиболее часто коррозионные дефекты встречаются в зонах монтажных и ремонтных сварных соединений (рис. 1) [4].

Это может быть связано с измененным состоянием структуры стали в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных соединений — возникновением «карбидных гряд» в границах сплавления, увеличением размеров зерен в областях перегрева (от границы сплавления до 1100 °С), протеканием процессов предвыделения промежуточных фаз и возникновением ультрадисперсных зернограничных карбидных включений в области 600–700 °С [8].

Такие участки ЗТВ являются потенциально опасными в отношении потери стойкости против КР, МКК и других видов коррозии [30–33]. Также монтажные и ремонтные сварные соединения являются зонами пониженной точности выполнения сварочных работ, что приводит к возникновению повышенного уровня сварочных деформаций и напряжений; возникновению пор, неметаллических и газовых раковин, подрезов, зон повышенной дефектности макроструктуры металла, перераспределению примесных атомов в границы зерен, с формированием зернограничных сегрегаций толщиной до 100 нм [34–36].

Влияние величины остаточных сварочных растягивающих напряжений и остаточных деформаций в сварном соединении стали 12Х18Н12Т на скорость анодного

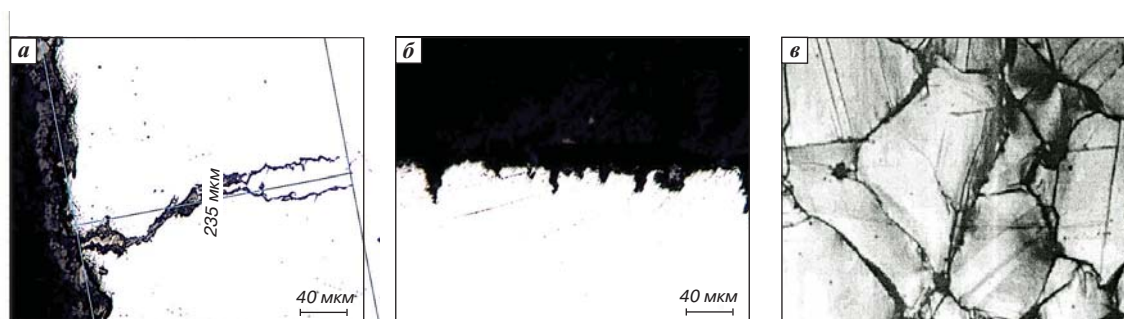


Рис. 1. Вид трещин КР в сварных соединениях системы транспортирования сжиженного газа:

*a* — трещина КР в среде, насыщенной  $H_2S$ ; *b* — трещины КР в среде, насыщенной  $CO_2$ ; *v* — трещины МКК в среде, насыщенной  $SO_3$  [4]

процесса — одного из основных показателей склонности стали к возникновению дефектов КР [9], приведены в **табл. 1** и **2**. Для сравнения приведены данные о скорости анодного процесса основного металла.

Скорость анодного процесса у образцов из основного металла в области упругих напряжений практически не изменяется, т. е. вероятность возникновения склонности к КР у основного металла крайне мала. Появление пластических течений при превышении предела текучести (270 МПа) в образце I группы приводит к ускорению анодного процесса и, как следствие, появлению опасности повреждений по механизму КР. Зона термического влияния сварного соединения (образцы II группы) в еще меньшей степени защищена от КР, что следует связывать со структурными изменениями

в этой зоне, приводящими к появлению в границах зерен стали наночастиц карбидных включений типа  $Me_{23}C_6$  и сегрегаций примесных атомов (в первую очередь фосфора и группы цветных металлов).

Дополнительное деформирование вырезанных образцов позволило установить, что склонность к КР образцов основного металла возникает только после деформирования на 15 %, в ЗТВ сварного шва — при деформировании ~5 % (см. табл. 2). Влияние сварочных нагревов различной интенсивности на коррозионную стойкость сварных соединений стали 12Х18Н12Т против МКК приведено на **рис. 2**.

Минимальное время до образования коррозионного дефекта  $\tau_{крит\ min}$  получено при испытании образцов, температура в которых в ходе сварочного нагрева составила 1400–1200 °С, что, вероятно, связано с резким ростом зерна в участке перегрева ЗТВ в процессе сварки и сопутствующим перераспределением примесных элементов [4, 36–38].

В **табл. 3** приведены данные об изменении концентрации углерода и фосфора в границах зерен различных участков ЗТВ.

Как следует из приведенных в табл. 3 данных, в ЗТВ сварных швов в слое толщиной до 100 нм приграничной области четко прослеживается повышение концентрации

Таблица 1  
Скорость анодного процесса в образцах основного металла (I) и образцах ЗТВ монтажного шва (II) для стали 12Х18Н12Т

Растягивающие напряжения, МПа		0	100	150	200	250	270	300	350
Скорость анодного процесса, мкА/см <sup>2</sup>	I	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,3	-0,1	+0,2	+0,4
	II	-1,3	-1,2	-0,7	+0,2	+0,4	-	-	-

Примечание. Образец вырезан из трубопровода после эксплуатации 108 тыс. ч.

Таблица 2  
Влияние степени пластической деформации на скорость анодного процесса в основном металле (I) и ЗТВ монтажного сварного шва (II) из стали 12Х18Н12Т

Степень пластической деформации, %		0	1	5	10	12	15	20
Скорость анодного процесса, мкА/см <sup>2</sup>	I	-1,4	-1,4	-1,2	-0,8	-0,3	+0,2	+0,3
	II	-1,3	-0,9	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	-

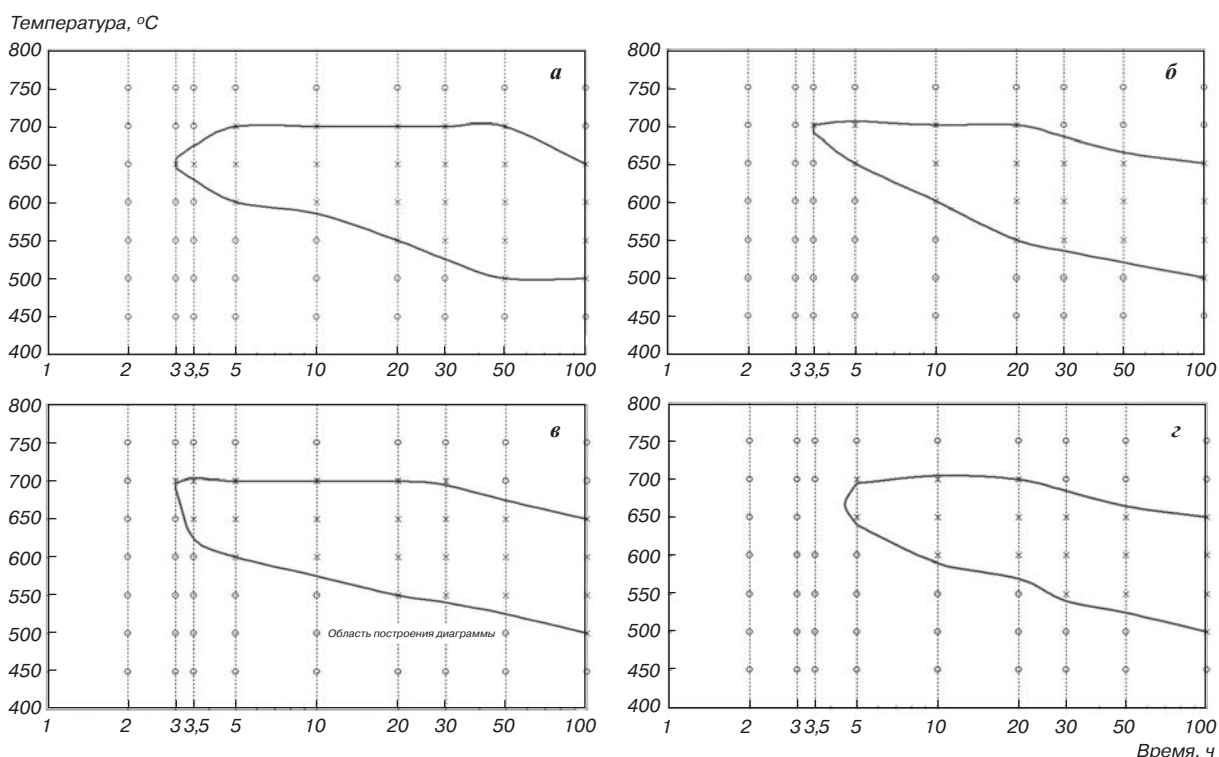


Рис. 2. Зоны потери стойкости стали против МКК в зависимости от температуры нагрева металла в ЗТВ сварного соединения, °С: а — 1400; б — 1000; в — 700; г — 400

Таблица 3

Содержание углерода и фосфора в слое толщиной 100 нм участков ЗТВ по данным Оже-спектроскопии

Образец	Элемент	Участок ЗТВ, нагретый до температуры, °С									
		1400	1200	1000	800	700	600	500	400	200	0 <sup>1</sup>
После сварки	С	420 <sup>2</sup>	380	310	240	215	190	165	115	110	110 <sup>3</sup>
	Р	1680 <sup>2</sup>	1515	1410	1095	1005	915	740	235	175	130 <sup>3</sup>
После сварки и нагрева в течение 10 ч <sup>4</sup>	С	615	495	400	380	370	365	340	310	290	275
	Р	1710	1740	1620	1510	1480	1445	1390	1210	1110	970
После сварки и нагрева в течение 100 ч <sup>4</sup>	С	795	790	780	690	680	680	645	610	615	600
	Р	1780	1770	1640	1520	1510	1480	1390	1260	1140	1010

1 — основной металл; 2 — в процентах среднего содержания в стали; 3 — превышение содержания элементов в границах зерен связано с предыдущими термическими воздействиями на сталь; 4 — длительность нагрева, провоцирующего склонность к МКК; температура провоцирующего нагрева соответствовала времени  $\tau_{\text{крит}}$  для данных условий эксперимента (см. рис. 2)

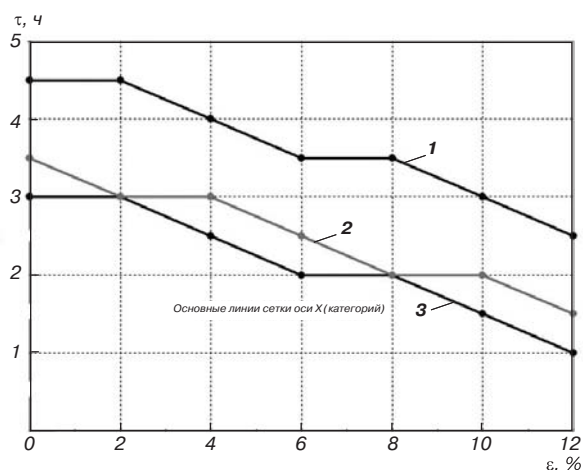


Рис. 3. Изменение времени до наступления склонности к МКК ( $\tau_{\text{крит}}$ ) в зависимости от величины сварочных деформаций в ЗТВ сварного шва, °С: 1 — 400; 2 — 700; 3 — 1400

примесных элементов, причем чем выше разогрев металла при сварке, тем выше концентрация в приграничном слое фосфора и углерода. При температуре нагрева металла в ЗТВ при сварке 1400 °С среднее содержание фосфора в границах зерен превысило его среднюю концентрацию в стали в 16,8 раза (увеличение от 0,023 % в среднем до 0,386 %), а в зоне нагрева до 700 °С — в 10,05 раза до 0,233 %, при этом содержание фосфора в границах зерен стали за пределами ЗТВ сварного шва практически не отличалось от его среднего содержания 0,024 %.

Большой интерес представляют данные, полученные при анализе влияния локальной пластической деформации, которая может возникнуть в оборудовании в ходе его монтажа, ремонтов и длительной эксплуатации. Локальные пластические деформации относятся к факторам риска [12–14], которые могут приводить к значительному снижению запасов надежности и долговечности оборудования, и поэтому анализ их влияния имеет важное значение при определении работоспособности ЗТВ в условиях коррозионного воздействия среды. Установлено, что пластическая

деформация ЗТВ оказывает отрицательное влияние на стойкость стали 12Х18Н12Т к МКК, сдвигая температурно-временные зависимости коррозионной стойкости стали влево, т. е. в сторону меньшей длительности выдержки при температурах, провоцирующих нагрев (рис. 3).

В результате выполненных испытаний установлено, что с повышением степени пластического деформирования длительность минимальной устойчивости ЗТВ монтажных швов стали 12Х18Н12Т монотонно снижается, составляя при степени деформации  $\varepsilon = 12\%$  около 1 ч у образцов, нагретых до температур, максимально приближенных к зоне сплавления сварного соединения (1400 °С), 1,5 ч — у образцов, имитирующих область, в которой в ходе сварочных нагревов вероятно образование карбидных включений (700 °С) и 2,5 ч — у образцов, нагретых до температуры 400 °С.

### Заключение

В ходе проведенных исследований установлено, что остаточные сварочные напряжения и локальные пластические деформации, возникающие в ЗТВ монтажного сварного соединения, резко снижают сопротивляемость ЗТВ сварного соединения межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию вследствие формирования ультрадисперсных частиц карбидов и наноразмерных сегрегаций примесных атомов, которые могут стать причиной ускоренного разрушения оборудования. Это необходимо учитывать как при разработке программы контроля оборудования, отработавшего расчетный срок службы, на предмет продления его дальнейшей эксплуатации, так и при проведении операций технического диагностирования. Наиболее опасными участками ЗТВ являются зоны, вплотную примыкающие к сварному шву и зоне сплавления сварного соединения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок



*Tsvetnye Metally*. 2023. No. 8. pp. 80–85  
DOI: 10.17580/ism.2023.08.13

## RELATIONSHIP BETWEEN OPERATING CONDITIONS AND THE EMERGENCE OF NANO- AND ULTRADISPERSED GRAIN BOUNDARY DEFECTS IN WELD JOINTS

### Information about authors

B. S. Ermakov, Head of Laboratory<sup>1</sup>, Doctor of Technical Science, Professor  
S. B. Ermakov, Director of the Research and Education Centre<sup>1</sup>  
S. A. Vologzhanina, Professor at the Department of Materials Science and Technology of Art Products<sup>2</sup>, Doctor of Technical Science, Associate Professor, e-mail: svet\_spb@mail.ru  
R. M. Khuznakhmetov, Postgraduate Student<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

<sup>2</sup>Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

### Abstract

Reliable operation of equipment is essential for further progress in the field of extraction, processing, storage and transportation of liquefied natural gas. This highlights the importance of properly selecting the material for manufacturing low-temperature equipment components. It should be taken into account that such components operate in a wide range of temperatures and are subjected to loads of different type – static, dynamic, cyclic, as well as to corrosive external and working environments. That is the reason why chromium-nickel austenitic steels (in particular, steel 12Kh18N(10–12)T) are most commonly used for critical parts, assemblies, vessels and pipelines. One knows that such steels are quite reliable when operated at low temperatures, as low as the temperatures of liquid helium (i. e. –253 °C). However, when the heat applied reaches high temperatures (as high as 1400 °C) during welding or maintenance operations and when the part goes through multiple heating cycles for process reasons (e. g. high-temperature purging of one-piece filtering systems), this can lead to redistribution of impurities within the grain boundaries. Emerging nano- and ultradispersed grain boundary defects can cause corrosion cracks, which can eventually lead to corrosion cracking and intercrystalline corrosion.

This paper considers the effect of extended operation periods and high-temperature heating cycles on the reliability of equipment made of steel 12Kh18N12T. It is shown that they are weld joint areas that may potentially lead to failures in terms of low-temperature equipment. Therefore, special attention should be given to heat-affected zones when extending the life of equipment that has done its expected service life and when doing the equipment testing.

**Key words:** Nano- and ultradispersed defects, austenitic steel 12Kh18N12T, low-temperature equipment, heat-affected zones, corrosion cracking, intercrystalline corrosion.

### References

- Davydenko M. I., Baranov A. Y. Analysis of the possibility of improving the energy efficiency of the LNG shipment system from large-capacity storage facilities by upgrading the design of the submersible pump. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2022. Vol. 988, Iss. 3. 032056.
- Ivanov L. V. et al. Change of exploitation parameters of a vessel after the switch to the usage of LNG as the main fuel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1111, Iss. 1. 012021.
- Ivanov L. V. et al. A procedure for selecting cryogenic tanks for small vessel revamping projects. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No. 1. pp. 40–45.
- Kantyukov R. R., Zapevalov D. N., Vagapov R. K. Analysis of the application and impact of carbon dioxide media on the corrosion state of oil and gas facilities. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. P. 578–586. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.11.
- Litvinova T. E., Kashurin R., Lutskiy D. Complex formation of rare-earth elements in carbonate–alkaline media. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3140. DOI: 10.3390/ma16083140.
- Vologzhanina S. A. et al. Effect of the deformation degree in low temperature conditions on the transformations and properties of metastable austenitic steels. *Obrabotka Metallov. Metal Working and Material Science*. 2022. Vol. 24, No. 1. pp. 73–86.
- Baake E., Shpenst V. A. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 660–668.
- Marinin M. A., Khokhlov S. V., Isheyskiy V. A. Explosion welding of flat sheet articles: Process simulation. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 237. pp. 275–280.
- Pryakhin E. I., Sharonov N. I. Key provisions and issues of the electron-beam technology in application to the fabrication of aluminium–magnesium alloy structures. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 229. pp. 84–91.

- Sharapova D. M., Sharapov M. G., Sharonov N. I. Structure formation of butt joints made of aluminum alloys to ensure the quality of mechanical engineering products. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1022. pp. 119–126.
- Ajide O. O. et al. Effect of post-weld heat-treatment on corrosion and microstructure properties of electric arc welded mild steels. *Portugaliae Electrochimica Acta*. 2023. Vol. 41, Iss. 1. pp. 47–56.
- Kim Y. et al. Novel cryogenic carbon dioxide capture and storage process using LNG cold energy in a natural gas combined cycle power plant. *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 456. 140980. DOI:10.1016/j.ccej.2022.140980.
- Su T., Huang Y., Xuan F. Z. Stress corrosion cracking growth rate prediction model for nuclear power turbine rotor steel in a simulated environment. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 23. pp. 830–844. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.01.049.
- Chuaiphon W., Srijaroenpramong L. Microstructure, mechanical properties and pitting corrosion of TIG weld joints alternative low-cost austenitic stainless steel grade 216. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2020. Vol. 2. 100027. DOI: 10.1016/j.jajp.2020.100027.
- Margolin B. et al. Fracture mechanisms and properties for irradiated austenitic chromium-nickel steel over elevated temperature range and formulation of intergranular fracture criterion. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023. Vol. 281. 109087. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2023.109087.
- Dak G., Pandey C. A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 58, Iss. 4. pp. 377–406. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.019.
- Pryakhin E. I., Sharapova D. M. Understanding the structure and properties of the heat affected zone in welds and model specimens of high-strength low-alloy steels after simulated heat cycles. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. pp. 60–65.
- Cheng L. et al. Mechanical properties and degradation mechanism of LNG containment concrete material under cryogenic conditions. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 347. 128557. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128557.
- Shakhnazarov K. Y., Pryakhin E. I., Mikhailov A. V. 630 °C ± 30 °C nodal (critical) temperature of iron and carbon steel. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 191–199.
- Zhang J. et al. Microstructure and performances of dissimilar joints between 12Cr2Mo1R steel and 06Cr18Ni11Ti austenitic stainless steel joined by AA-TIG welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 60. pp. 96–106. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.048.
- Dak G., Pandey C. Microstructure anomaly during welding and its influence on the mechanical properties of dissimilar weldments of P92 martensitic steel and AISI 304L austenitic stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 80. pp. 829–851. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.06.048.
- Shakhnazarov K. Y. Property anomalies of unalloyed pre-eutectoid steel melts at ~ 0.5% C as a consequence of the intermediate Fe42C phase. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, Iss. 4. pp. 261–265. DOI: 10.3103/S0967091220040087.
- Zhao X. et al. Investigation on the microstructure and mechanical properties analysis of 304L stainless steel multi-pass filler welding joint for pipeline. *Materials Today Communications*. 2022. Vol. 33. 104770. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104770.
- Wang Q., Jiao W., Zhang Y. M. Deep learning-empowered digital twin for visualized weld joint growth monitoring and penetration control. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 57. pp. 429–439. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.10.002.
- Vinogradova A., Gogolinskii K., Umanskiy A., Alekhovich V., Tarasova A., Melnikova A. Method of the mechanical properties evaluation of polyethylene gas pipelines with portable hardness testers. *Inventions*. 2022. No. 7. P. 125. DOI: 10.3390/inventions7040125.
- Bazhin V. Y., Aryshenskii E., Hirsch J., Kawalla R. et al. Impact of Zener-Hollomon parameter on substructure and texture evolution during thermomechanical treatment of iron-containing wrought aluminium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29, Iss. 5. P. 893–906. DOI: 10.1016/S1003-6326(19)64999-X.
- Alamri A. H. Application of machine learning to stress corrosion cracking risk assessment. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2022. Vol. 31, Iss. 4. pp. 11–21. DOI: 10.1016/j.ejpe.2022.09.001.
- Slobodov A. A., Syrkov A. G. et al. Effect of temperature on solid-state hydride metal synthesis according to thermodynamic modeling. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239, Iss. 5. pp. 550–555.
- Ulianov P. G., Rybkin A. G. Photoelectron and Auger electron spectroscopy for surface studies. Physical Surface Study Techniques Resource Centre. 2012. p. 12. Available at: <https://surface.spbu.ru/images/data/PESandAuger.pdf>
- Smirnov A. N. et al. Effect of deformation on the structure and phase composition of the heat-affected zone of a 12Kh18N10T steel weld. *Basic Problems of Material Science*. 2019. Vol. 16, No. 1. pp. 9–15.

31. Matyunin V. M. et al. Control of mechanical properties of dissimilar welded joints of different structure class steels. *Electron-Beam Welding and Related Technology: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference*. 2020. pp. 530–537.
32. Syrkov A. G., Kushchenko A. N., Sillivanov M. O., Taraban V. V. Nanostructured regulation of the surface properties and hydrophobicity of nickel and iron by solid-state reduction and modifying methods. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 5. pp. 54–59.
33. Murataev F. I., Zagidullin A. D. Ensuring resistance of austenitic steel weld joints to intercrystalline corrosion. *Vestnik of Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev*. 2019. Vol. 75, No. 2. pp. 45–50.
34. Smirnov A. N. et al. Impact of extended temperature-force actions on the structural and phase state of the weld joint in steel 12Kh18N10T. *Basic Problems of Material Science*. 2018. Vol. 15, No. 3. pp. 434–441.
35. Smirnov A. N. et al. The structure of 12Kh18N10T steel weld joints and its features depending on the way heat is introduced during fusion welding. *Svarka i Diagnostika*. 2020. No. 5. pp. 24–29.
36. Timofeev A. V. et al. Operational analysis and medium-term forecasting of the greenhouse gas generation intensity in the cryolithozone. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, Iss. 11. 1466.
37. Dzhabbarov S. N., Pryakhin E. I. Development of heat treatment mode with quenching in different quenching environments for the casing pipe in order to obtain the required mechanical properties. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 836. pp. 41–45.
38. Bazhin V. Yu. et al. A contemporary view on the anomalies in the groups of metals of the Mendeleev Periodic Table. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2019. Vol. 239. pp. 520–527. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.520.

## Исследование структуры и свойств серебряного рубля 1823 года

УДК 336.746.13



**В. Ю. Бажин,**  
заведующий кафедрой металлургии,  
докт. техн. наук, профессор



**А. П. Суслов,**  
проректор по эксплуатации и развитию  
имущественного комплекса



**О. А. Горшкова,**  
студентка 4-го курса факультета переработки  
минерального сырья

Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

### Введение

Развитие монетного дела тесно связано с обеспечением сырьем, в частности с проблемами обеднения минерально-сырьевой базы, в том числе по запасам благородных металлов. В связи с этим, наряду с современными подходами, необходимо учитывать исторические традиции в области освоения и подготовки сырья к переработке [1–4].

В связи с научно-практическим интересом и опытом предыдущих исследований [5–9] представляется актуальным изучение структуры и свойств серебряных изделий на наноразмерном уровне при помощи современного оборудования [10–12].

В России производство изделий из серебра определяется наличием рудных запасов, которые в настоящее время неуклонно снижаются [13–15]. Серебряные

Проведено исследование структуры и свойств серебряного рубля, изготовленного на Санкт-Петербургском Монетном дворе в 1823 г. под руководством выпускника Горного кадетского корпуса (Горного университета) минцмейстера Павла Данилова. Исследование выполнено на высокотехнологичном оборудовании научных центров Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Впервые структуру серебряных монет изучали рентгеноструктурным методом анализа на наноразмерном уровне с применением сканирующего электронного микроскопа. Получены новые данные по структурным особенностям и распределению примесей, позволяющие объяснить технологические особенности серебряного передела при изготовлении монет того периода времени. Изменение твердости на некоторых участках поверхности серебряной монеты указывает на отклонение химического состава между ее реверсом и аверсом. Также исследовали образцы рудных материалов Нерчинского рудника и серебряные изделия минцкабинета Горного музея. Данная работа выполнена в рамках научного направления «Историко-культурного наследия России и развитие научного познания».

**Ключевые слова:** наноразмерные структуры, серебряный рубль, монетное дело, Горный институт, Горный музей, наноструктура, проба, рентгенофазовый анализ, спектроскопия, электронный микроскоп, примеси, сканирующая микроскопия.

**DOI:** 10.17580/tsm.2023.08.14

руды Нерчинского месторождения (Алтайский край), которые были основным сырьем для производства императорских монет и изделий, практически исчерпали себя [16]. Уже в конце XIX в. предпринимали попытки чеканки императорских монет на Монетных дворах Варшавы, Брюсселя и Парижа после переплава талеров и перечеканки других серебряных монет [17–19].

В данной работе с применением современных средств измерения и анализа выполнено исследование серебряной монеты 1823 г. Выбор материала для исследований связан с 250-летним юбилеем Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

© Бажин В. Ю., Суслов А. П., Горшкова О. А., 2023