

УДК: 621.774:620.1:669

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.46.877

ЛАБОРАТОРНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ ТРУБ ІЗ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА НОВІТНІМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

ДЕРГАЧ Т. О. ^{1*}, *докт. техн. наук, провід. наук. співроб.*,

СУХОМЛИН Г. Д. ², *докт. техн. наук, проф.*,

ДЕЙНЕКО Л. М. ³, *докт. техн. наук, проф.*,

БАЛЕВ А. Є. ⁴,

КРАСЮК А. В. ⁵

^{1*} Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. + 38 (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID 0000-0003-0235-5342

² Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

³ Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

⁴ ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН», пр. Трубників, 56, 53201, Нікополь, Україна, тел. +38 (063) 442-03-84, e-mail: abalev@centravis.com.ua

⁵ ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН», пр. Трубників, 56, 53201, Нікополь, Україна, тел. +38 (063) 442-03-84

Анотація. Мета роботи: оцінення якості та довговічності труб із високолегованих аустенітних і феритно-аустенітних сталей, які виготовлені на ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» за новітніми технологіями, шляхом проведення їх комплексних лабораторних досліджень і тривалих експлуатаційних випробувань на підприємствах хімічної промисловості. **Матеріали і методи:** матеріалами досліджень були експериментальні труби з високолегованих аустенітних і феритно-аустенітних хромонікельмолібденових сталей нового покоління, виготовлені за новітніми технологіями. Мікроструктуру труб досліджували методами металографії та електронної мікроскопії із застосуванням розроблених і вдосконалених методик. Корозійні дослідження в лабораторних умовах включали випробування на стійкість проти локальних видів корозії, притаманних високолегованим сталям: міжкристалітної (МКК), пітингової (ПК), корозійного розтріскування (КР) і сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН). Механічні властивості труб визначали шляхом випробувань на розтягання і на ударний вигин. Тривалі експлуатаційні випробування труб проводили в умовах промислового виробництва на підприємствах хімічної промисловості в апаратах із виробництва карбаміду і каустичної соди. **Результати досліджень.** Установлено високий вміст спеціальних низькоенергетичних границь зерен у теорії решіток співпадаючих вузлів (СГ РСВ) у структурі труб, виготовлених за новітніми технологіями ($\geq 75\%$); високу стійкість труб проти різних видів найбільш небезпечної локальної корозії порівняно з існуючими аналогами, високий рівень механічних властивостей, а також високу корозійну стійкість за тривалих експлуатаційних випробувань підприємствах хімічної промисловості. Впровадження отриманих результатів сприятиме підвищенню ефективності виробництва й експлуатації затребуваних на світовому ринку труб із високолегованих сталей та посиленню конкурентоспроможності труб вітчизняного виробництва на Європейському і світовому ринках.

Ключові слова: високолеговані сталі; труби; мікроструктура; спеціальні границі зерен РСВ; зернограничне конструювання; корозійна стійкість; механічні властивості

LABORATORY AND OPERATING TESTING OF HIGH-ALLOY STEEL PIPES MADE BY THE LATEST TECHNOLOGIES

DERHACH T.O. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Head Res.*,

SUKHOMLYN H.D. ², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

DEINEKO L.M. ³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

BALEV A.Ye. ⁴,

KRASIUK A.V. ⁵

^{1*} Experimental Research Laboratory, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0235-5342

² Experimental Research Laboratory, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

³ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technology, 4, Haharina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

⁴ "CENTRAVIS PRODUCTION UKRAINE" PJSC, 56, Trubnykiv Ave., Nikopol, 53201, Ukraine, tel.+38 (063) 442-03-84, e-mail: abalev@centravis.com.ua

⁵"CENTRAVIS PRODUCTION UKRAINE" PJSC, 56, Trubnykiv Ave., Nikopol, 53201, Ukraine, tel.+38 (063) 442-03-84

Abstract. The purpose of the research: evaluation of the quality and durability for pipes made of high-alloyed austenitic and ferritic-austenitic steels, which are manufactured at PJSC "CENTRAVIS PRODUCTION UKRAINE" using the latest technologies, by conducting complex laboratory studies and long-term operational tests at chemical industry enterprises. **Materials and methods:** the research materials were experimental pipes made of high-alloyed austenitic and ferritic-austenitic chromium-nickel-molybdenum steels of the new generation, manufactured using the latest technologies. The microstructure of the pipes was investigated by metallography and electron microscopy using developed and improved methods. Corrosive researches in laboratory terms included a test on firmness against the local types of corrosion inherent in high-alloy steels: intergranular corrosion (IGC), pitting corrosion (PC), corrosion cracking (CC) and sulfide stress corrosion cracking (SSCC). The mechanical properties of the pipes were determined by tensile and impact bending tests. Long-term operational tests of pipes were carried out in conditions of industrial production at chemical industry enterprises in apparatus for the urea and caustic soda production. **Research results:** A high content of special low-energy grain boundaries in the theory of coincident nodes' lattices (SG CSL) was established in the structure of pipes manufactured according to the latest technologies ($\geq 75\%$); high resistance of pipes against various types of the most dangerous local corrosion compared to existing analogues, a high level of mechanical properties, as well as high corrosion resistance during long-term operational tests in environments at chemical industry enterprises. The implementation of the obtained results will contribute to increasing the efficiency of production and operation for highly alloyed steel pipes in demand on the world market and increasing the competitiveness of domestically produced pipes on the European and world markets.

Keywords: *high-alloyed steels; pipes; microstructure; special CSL grain boundaries; grain boundary engineering; corrosion resistance; mechanical properties*

Вступ.

Серед найважливіших завдань післявоєнного відновлення економіки України зазначено необхідність розвитку металургійної, машинобудівної, нафтогазовидобувної, хімічної та будівельної галузей промисловості.

Труби з високолегованих сталей являють собою високотехнологічну продукцію металургійного виробництва, яка належить до четвертої металургійної переробки. Вони застосовуються у найбільш агресивних корозивних середовищах у пріоритетних галузях промисловості та визначають науково-технічний прогрес у їх розвитку [1–6].

Багаторічна співпраця вчених-матеріалознавців із фахівцями провідного підприємства України з виробництва труб із високолегованих сталей і сплавів ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» (м. Нікополь) сприяла вдосконаленню

технологій виробництва і підвищенню якісних характеристик таких труб до рівня світових стандартів [7; 8]. Розроблено новітні технології виробництва труб підвищеної корозійної стійкості з Cr–Ni й Cr–Ni–Mo сталей аустенітного класу (03X18H11, 03X17H14M3, 02X25H22AM2 та їх зарубіжних аналогів TP304L, TP316L і TP310MoLN / KES U 2), призначених для експлуатації в особливо агресивних сильно окиснювальних середовищах, і з феритно-аустенітних економно легованих нікелем сталей нового покоління (02X22H5AM3, 02X25H7AM4 та їх зарубіжних аналогів UNS S 31803, SAF 2507) [9–17].

Технології включають дотримання вимог до експериментально визначених і науково обґрунтованих гранично допустимих умістів домішкових поверхнево активних хімічних елементів (вуглецю, бору, азоту) в металі трубних заготовок [18–21] і цілеспрямоване керування під час виготовлення труб

деформаційними й температурними параметрами за принципом зернограничного конструювання (ЗГК) полікристалічних матеріалів [9; 12–15]. При цьому забезпечується оптимальна найбільш упорядкована структура сталей з підвищеним умістом спеціальних границь (СГ) зерен у теорії решіток співпадаючих вузлів (РСВ), які характеризуються пониженою питомою поверхневою енергією і підвищеною корозійною стійкістю та сприяють підвищенню корозійної стійкості матеріалу в цілому.

Цей напрямок підвищення корозійної стійкості прокату з високолегованих аустенітних сталей останнім часом стрімко розвивається у зарубіжних країнах, але поки ще на експериментальному рівні [22–25].

Для комплексної оцінки якісних характеристик новітньої продукції розроблено нові й вдосконалені методики досліджень і випробувань, які раніше не застосовувалися у виробництві труб та іншої металопродукції з високолегованих сталей [26–30] та дотепер не включені в технічні умови на них.

Виробничим досвідом доведено, що під час розроблення або при вдосконаленні технологій виробництва металопродукції

відповідального призначення доцільно проводити також її тривалі експлуатаційні випробування, які дозволяють отримати найбільш достовірну і об'єктивну й інформацію про їх корозійну стійкість і довговічність у реальних умовах експлуатації порівняно з відносно короткочасними прискореними стандартними здавально-приймальними випробуваннями.

Мета роботи: оцінення якості та довговічності експериментальних труб із високолегованих аустенітних і феритно-аустенітних сталей, які виготовлені на ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» за новітніми технологіями, шляхом проведення їх комплексних лабораторних і тривалих експлуатаційних випробувань на підприємствах хімічної промисловості

Матеріали і методи досліджень.

Матеріалами досліджень служили експериментальні холоднодеформовані труби $\varnothing 25 \times 2,0$ мм із високолегованих хромонікельмолібденових сталей: аустенітної 02X25H22AM2 (TP310MoLN / KES U 2) і феритно-аустенітної нового покоління 02X22H5AM3 (UNS S 31803) (табл. 1), які були виготовлені за новітніми технологіями.

Таблиця 1

Дані про хімічний склад труб із хромонікельмолібденових аустенітної і феритно-аустенітної сталей

Марка сталі	C	Cr	Ni	Mo	Mn	P	S	Si	N
02X25H22AM2	0,022	24,5	24,9	2,2	1,7	0,012	0,004	0,32	0,19
02X22H5AM3	0,022	22,3	5,3	3,1	1,6	0,022	0,001	0,48	0,22

Лабораторні дослідження труб включали: оцінювання мікроструктури за розробленими методиками [26–28]; комплексні корозійні випробування на стійкість проти міжкристалітної корозії (МКК) за ГОСТ 6032 і ASTM A-262, проти пітингової корозії (ПК) за ASTM G-48, проти корозійного розтріскування (КР) у хлорид вмісному середовищі за ASTM G-36 [29; 30], проти сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН) у сірководневмісному середовищі за методикою NACE TM 0177, а також випробування механічних властивостей на

розтяг і на ударний вигин.

Експлуатаційні випробування труб з аустенітної сталі 02X25H22AM2 проводили в апараті з виробництва мінерального добрива карбаміду, а труб із дуплексної сталі 02X22H5AM3 – в апараті для виробництва каустичної соди.

Результати досліджень та їх обговорення.

Дослідження мікроструктури труб з аустенітної та дуплексної сталей

Труби зі сталі 02X25H22AM3 характеризувалися чисто аустенітною дрібнозернистою структурою (№ зерна 8–9

за ГОСТ 5639), із підвищеним умістом (> 75 %) спеціальних низькоенергетичних, переважно двійникових, границь $\Sigma 3$ РСВ та без виділень карбідів хрому і молібдену на границях зерен (рис. 1). На рисунку 1, б СГ $\Sigma 3$ показані стрілками, а множинні стики, у які входять СГ з більш високою питомою поверхневою енергією, ніж СГ $\Sigma 3$, обведено колами з № 2.

Труби зі сталі 02X22H5AM3 також мали дрібнозернисту феритно-аустенітну структуру з витягнутими вздовж напрямку деформації феритними й аустенітними зернами (рис. 2, а), з умістом 53 % фериту і 47 % аустеніту, без виділень шкідливих інтерметалідних фаз у фериті й на міжфазних границях α - γ (рис. 2, б) та з умістом ≈ 73 % СГ $\Sigma 3$ РСВ у γ -фазі (рис. 2, в, г) і ≈ 36 % СГ у α -фазі.

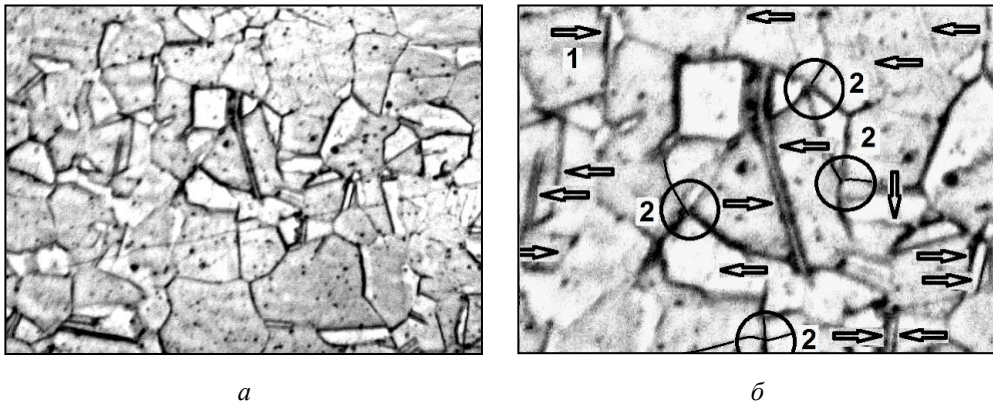


Рис. 1. Мікроструктура труб зі сталі 02X25H22AM2 з відміченими СГ РСВ: стрілками показані когерентні двійникові СГ $\Sigma 3$; стрілкою з № 1 – фасетки на СГ $\Sigma 3$; колами з № 2 обведено множинні стики; а – $\times 300$; б – $\times 500$

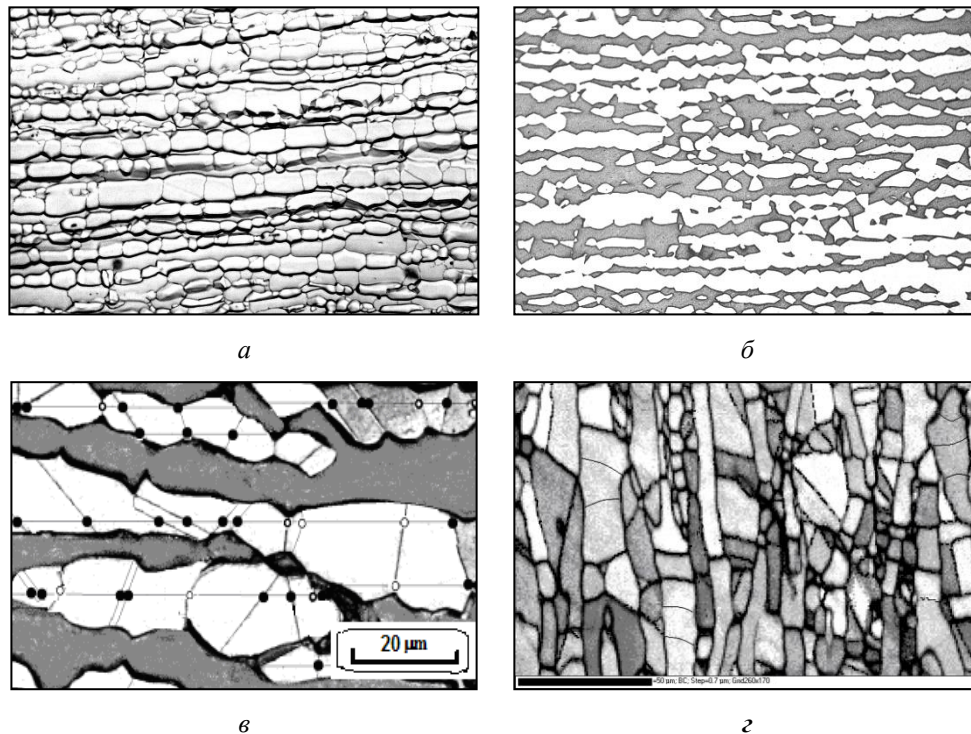


Рис. 2. Мікроструктура труб зі сталі 02X22H5AM3 у дослідженні під оптичним мікроскопом (а–в) та під електронним мікроскопом методом дифракції зворотньо розсіяних електронів (г): а – зернна структура, $\times 500$; б – фазовий склад і відсутність σ -фази; в ($\times 500$) та г – зерногранична структура з підвищеним умістом СГ $\Sigma 3$ в аустенітній фазі

Комплексні корозійні випробування труб з аустенітної сталі 02X25H22AM2. Результати лабораторних випробувань

Згідно з вимогами технічних умов (ТУ) та інших нормативних документів, труби та інша металопродукція зі сталі 02X25H22AM2, має витримувати випробування на стійкість проти міжкристалітної корозії в особливо агресивному сильно окиснювальному середовищі – киплячій 65 % HNO₃ методом ДУ, ГОСТ 6032 (відповідає методу С за ASTM A-262); при цьому швидкість корозії зразків має бути нижчою, ніж регламентована ГОСТ 6032 ($\leq 0,5$ мм/рік), а саме, $\leq 0,3$ мм/рік.

Згідно з існуючими стандартами, випробування на стійкість проти МКК металопродукції з хромонікелевих аустенітних сталей проводять на зразках після провокуючого нагріву за 650 або 700 °С протягом 1 години, який сприяє виділенню високохромистих карбідів на границях зерен, утворенню збіднених хромом приграничних ділянок твердого розчину і виникненню схильності до МКК.

Вважається, що провокуючий нагрів за своєю дією на структуру і корозійну стійкість границь зерен імітує умови зварювання сталі. Хромонікелеві сталі, додатково леговані молібденом, перед стандартними випробуваннями на стійкість

проти міжкристалітної корозії у сильно окиснювальних середовищах (зокрема, в киплячій 65 % HNO₃) не піддають провокуючому нагріву, оскільки утворювані при цьому на границях зерен карбіди молібдену або хромомолібденові карбіди в таких середовищах є нестійкими та їх розчинення сприяє надмірному зростанню швидкості корозії [21].

Тому в лабораторних умовах випробування труб зі сталі 02X25H22AM2 на стійкість проти МКК проводили на зразках у стані постачання, без провокуючого відпуску. Додатково такі випробування проводили також у більш жорстких умовах – на зразках після відпусків за температур 650, 700, 750 і 800 °С із витримкою 1 годину, а також на зразках, зварених за допомогою дротяного електрода зі сталі ЗІ-35 (03X21Н21М4ГБ).

Аналіз результатів випробувань показав (табл. 2), що швидкість корозії зразків труб у стані постачання в середньому не перевищувала 0,15 мм/рік, тобто була вдвічі нижчою верхньої межі, яка допускається технічними умовами. Провокуючий нагрів за температур 650...800 °С не вплинув негативно на стійкість труб проти МКК, підвищення швидкості корозії зразків після нього здебільшого не спостерігали (табл. 2). Зразки зі зварними швами поведилися аналогічно.

Таблиця 2

Вплив провокуючого нагріву на швидкість корозії зразків сталі 02X25H22AM2 під час випробування в киплячій 65 % HNO₃

Режим термообробки зразків	Швидкість корозії, мм/рік, за цикл випробувань					
	I	II	III	IV	V	Середня
без відпуску	0,12	0,13	0,15	0,14	0,11	0,15
відпуск за 650, 700, 750, 800 °С, витримка 1 год.	0,16-0,22	0,14-0,21	0,13-0,15	0,12-0,16	0,11-0,15	0,13-0,18 сер. 0,15
вимоги ТУ	$\leq 0,3$ мм/рік на зразках без провокуючого відпуску					

Таблиця 3

Результати корозійних, корозійно-механічних і механічних випробувань труб зі сталі 02X25H22AM2

Корозійні й корозійно-механічні властивості			Механічні властивості		
Швидкість ПК за ASTM G-48, г/см ²	Час до КР за ASTM G-36, $\sigma = \sigma_{0,2}$, год.	Час до КР у 10 % FeCl ₃ , $\sigma = \sigma_{0,2}$, год.	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %
0,00002–0,00003	≥ 500	$\geq 1\ 000$	370-385	690-720	42-45
Вимоги ТУ					
Дотепер не визначено			350	670	40

У процесі розроблення новітньої технології виробництва холоднокатаних труб підвищеної корозійної стійкості зі сталі 02X25H22AM2 та з низки інших аустенітних Cr–Ni й Cr–Ni–Mo сталей було також експериментально встановлено гранично допустимі вмісти поверхнево активних хімічних елементів вуглецю, бору, азоту, які не погіршують їх стійкість проти МКК у слабо- і сильноокиснювальних середовищах [10; 21].

Додаткові комплексні випробування труб зі сталі 02X25H22AM2 у хлоридумісних середовищах, зокрема, на стійкість проти пітингової корозії за ASTM G-48 і корозійного розтріскування за ASTM G-36, які дотепер відсутні в ТУ на труби та іншу металопродукцію з високолегованих сталей, також показали надзвичайно високу їх стійкість проти зазначених видів корозії (табл. 3).

Рівень механічних властивостей експериментальних труб перевищував вимоги ТУ: труби характеризувалися високою міцністю та пластичністю (табл. 3).

Результати експлуатаційних випробувань

Експериментальні труби зі сталі 02X25H22AM2 піддавали тривалим експлуатаційним випробуванням протягом 4 000 годин ($\approx 5,5$ місяця) у промислових умовах на підприємстві з виробництва мінеральних добрив в апараті, призначеному для підігріву плаву карбаміду і розкладання карбамату амонію на аміак і двоокис вуглецю. Апарат входить до складу технологічної лінії отримання карбаміду продуктивністю 450 тис. тонн на рік. Для випробувань застосовували зразки, зварені в

середовищі аргону зварювальним дротом зі сталі 3I-35 (03X21H21M4ГБ). Поруч із трубами зі сталі 02X25H22AM2 як зразки-свідки випробували труби з досить поширеної аустенітної хромонікель-молібденової сталі 03X17H14M3 (316 L), які наразі застосовують у технологічному процесі виробництва карбаміду.

У процесі експлуатації внутрішня поверхня труб піддавалася впливу середовища складу: плав карбаміду – до 35 %; CO₂ – до 15 %; NH₃ – 35 %, за робочої температури 150–185 °C і тиску 9 МПа. Зовнішня поверхня труб контактувала з водяною парою і конденсатом із температурою 215 °C під тиском 2,9 МПа.

Результати випробувань показали (табл. 4), що зварні зразки труб зі сталі 02X25H22AM2 мають високу корозійну стійкість у промислових умовах.

Дослідженнями їх поверхні після випробувань установлено, що зварні з'єднання поведуться в корозійно агресивному середовищі так само, як основний однорідний метал. Глибина міжкристалітної корозії була практично однаковою в усіх зонах зварного з'єднання і за 4 000 годин експлуатації не перевищила 10 мкм.

Швидкість корозії у промислових умовах виробництва карбаміду зварних зразків сталі 03X17H14M3 була вчетверо вищою, ніж зразків сталі 02X25H22AM2 (0,06 мм/рік і 0,015 мм/рік, відповідно), а глибина міжкристалітної корозії основного металу і зварного шва – у 2,5 і 5 разів, відповідно, більшою (табл. 4).

Таблиця 4

Швидкість корозії зварних зразків зі сталі 02X25H22AM2 і 03X17H14M3 під час випробування в промислових умовах виробництва карбаміду

Сталь/№ зразка	Результати випробувань	
	Швидкість загальної корозії, мм/рік	Глибина МКК, мкм
02X25H22AM2 / 1, 2	0,015; 0,015	основний метал – до 10
02X25H22AM2 / 3, 4	0,015; 0,016	зварний шов – до 10
03X17H14M3 / 5, 6	0,062; 0,063	основний метал – до 25
03X17H14M3 / 7, 8	0,060; 0,062	зварний шов – до 50

На основі отриманих результатів комплексних досліджень зроблено висновок, що експериментальні труби зі сталі 02X25H22AM2, виготовлені за новітньою технологією, мають високу корозійну стійкість проти локальних видів корозії в хлоридумісних і в сильноокиснювальних середовищах, у тому

числі в середовищах виробництва карбаміду, та нечутливі до сенсibiliзації при провокуючих відпусках і зварюванні.

Отже, вони можуть бути рекомендовані для широкого застосування у зварному обладнанні, як в апаратах із виробництва карбаміду, так і в іншому обладнанні хімічних виробництв.

Таблиця 5

Результати випробувань труб зі сталі 02X22H5AM3 на стійкість проти ПК за ASTM G-48, проти КР за ASTM G-36 і проти СКРН за NACE TM 0177

Технологія	Питома втрата маси зразків, г/см ² , за температури випробувань, °С		Час до КР при $\sigma = 0,5\sigma_{0,2}$, год.	СКРН, σ_p , МПа
	30	40		
Новітня	0–0,000012	0,000019–0,000032	> 300	$\sigma_p = \sigma_{0,2} = 450$
Вимоги ASTM	Швидкість корозії $\leq 0,0001$		Дотепер не регламентується	

Таблиця 6

Результати випробувань механічних властивостей труб зі сталі 02X22H5AM3

Технологія	Механічні властивості			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCV ⁺²⁰ , Дж/см ²
Новітня	780–785	560–565	39–42	150–175
Вимоги ASTM	≥ 650	≥ 450	≥ 30	≥ 70

Комплексні корозійні випробування труб із феритно-аустенітної сталі 02X22H5AM3. Результати лабораторних випробувань.

Труби з феритно-аустенітної сталі 02X22H5AM3 характеризувалися високою стійкістю проти міжкристалітної корозії під час випробування у слабоокиснювальному середовищі – киплячому розчині сірчаної кислоти з додаванням мідного купоросу (методом АМУ, ГОСТ 6032 або методом В, ISO 3651), проти пітингової корозії, корозійного розтріскування і сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН), таблиця 5, та високим рівнем механічних властивостей, зокрема, високою міцністю, притаманною феритно-аустенітним (дулексним) сталям (табл. 6).

Результати експлуатаційних випробувань.

Експериментальні труби зі сталі 02X22H5AM3 розмірами $\varnothing 25 \times 2,0 \times 1000$ мм піддавали експлуатаційним випробуванням у теплообміннику апарата з виробництва каустичної соди. Корозивне середовище у

теплообміннику являло собою концентровану пароводяну суміш лугу і натрію хлориду (до 30 %), з наявністю абразивних частинок, за температури до 150 °С і тиску ~ 2 МПа. Поруч із трубами зі сталі 02X22H5AM3 як зразки-свідки випробували труби зі сталі 08X18H10T, які наразі експлуатують в апаратах для виробництва каустичної соди. Після випробувань зовнішню й внутрішню поверхні труб піддавали візуальному огляду та обстеженню під оптичним мікроскопом; труби зважували на електронних вагах із точністю до 1 г та оцінювали втрати їх маси у процесі випробувань; здійснювали розрахунок середньої швидкості корозії (мм/рік) згідно з ГОСТ 6032-89 і ГОСТ 9.908-85 за формулою (1):

$$V_{\text{кор}} = 87\,600 \Delta m / \rho S \Delta t, \quad (1)$$

де Δm – втрата маси зразка за час випробувань, г; S – сумарна площа поверхні труби, яка контактувала з агресивним середовищем, см²; τ – час випробувань, год.; ρ – щільність сталі (7,9 г/см³).

Результати візуального огляду поверхонь труб зі сталі 02X22H5AM3 показали, що корозійні ураження на їх зовнішній поверхні займали не більше 5 % а їх глибина не перевищувала 200 мкм (рис. 3, *а*). Внутрішня поверхня труб під час візуального огляду була більш однорідною, без помітних корозійних уражень. Під оптичним мікроскопом вона мала вигляд протравленої двофазної структури з глибиною рельєфу ≤ 7 мкм (рис. 4, *а*).

На зовнішній поверхні труби-свідка зі сталі 08X18H10T спостерігали більш значні корозійні ураження – розтрави і виразки глибиною > 500 мкм (рис. 3, *б*). На внутрішній поверхні труби також були виразки глибиною до 50 мкм (рис. 4, *б*).

Оцінка корозійної стійкості труб гравіметричним методом показала, що втрата маси однієї експериментальної труби

зі сталі 02X22H5AM3 у процесі випробувань склала в середньому 45 г, а труби зі сталі 08X18H10T – 125 г. Розрахована за формулою (1) середня швидкість корозії за час експлуатаційних випробувань в апараті з виробництва каустичної соди склала: для труб зі сталі 08X18H10T – 0,155 мм/рік, а для експериментальних труб зі сталі 02X22H5AM3 – 0,055 мм/рік, тобто була втричі нижчою.

Розрахований згідно з «Методикою визначення економічної ефективності НДР у чорній металургії» орієнтовний очікуваний економічний ефект від використання труб підвищеної корозійної стійкості з економно легованої нікелем феритно-аустенітної сталі 02X22H5AM3, виготовлених за новітньою технологією, склав $\approx 1,1$ млн грн.

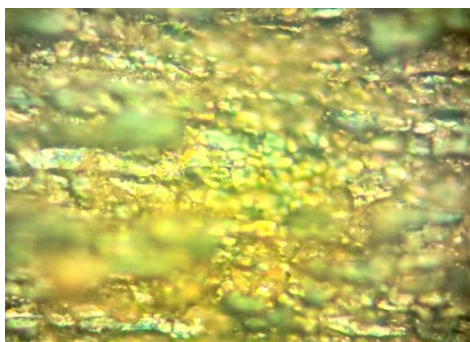


а

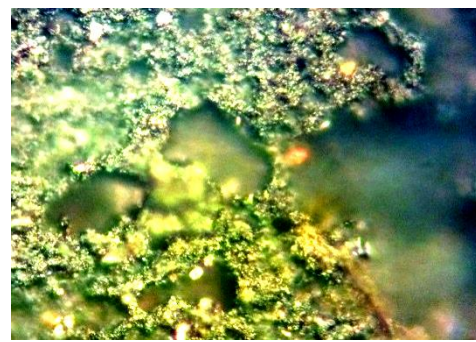


б

Рис. 3. Вигляд зовнішньої поверхні труби із сталі 02X22H5AM3 у місці локального корозійного ураження (*а*) і труби із сталі 08X18H10T з ураженнями у вигляді виразок (*б*)



а



б

Рис. 4. Рельєф внутрішньої поверхні труб зі сталі 02X22H5AM3 (*а*) і 08X18H10T (*б*) після експлуатаційних випробувань, $\times 300$

Результати комплексних досліджень показують доцільність та економічну ефективність застосування труб підвищеної корозійної стійкості з економно легованих нікелем дуплексних сталей нового

покоління, виготовлених за новітньою технологією, в агресивних середовищах у хімічній, енергетичній, нафтогазовидобувній галузях; у будівництві та архітектурі, зокрема, у будівництві мостів та інших

споруд, а також в інших пріоритетних галузях промисловості [6; 31].

Висновки.

1. Експериментальні труби з високолегованих хромонікельмолібденових сталей аустенітної (02X25H22AM2) і феритно-аустенітної (02X22H5AM3), виготовлені на ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» за новітніми технологіями, характеризуються оптимальною мікроструктурою з підвищеним вмістом спеціальних низькоенергетичних границь зерен $\Sigma 3$ РСВ, підвищеною стійкістю проти найбільш небезпечних локальних видів корозії (МКК, ПК, КР і СКРН) та високим рівнем механічних властивостей.

2. Установлено гранично допустимий вміст поверхнево активних хімічних елементів вуглецю, бору, азоту в аустенітних сталях різного хімічного складу, з урахуванням синергетичного ефекту, який забезпечує їх високу стійкість

проти МКК у агресивних сильно- і слабоокиснювальних середовищах.

3. Тривалі експлуатаційні випробування зварних зразків експериментальних труб із сталі 02X25H22AM2 в обладнанні з виробництва карбаміду показали їх високу корозійну стійкість та довговічність і нечутливість до сенсibiliзації.

4. Тривалі експлуатаційні випробування експериментальних труб із сталі 02X22H5AM3 у теплообміннику апарату для виробництва каустичної соди показали їх приблизно втричі вищу корозійну стійкість порівняно із застосовуваними у цей час трубами зі сталі 08X18H10T та значний очікуваний економічний ефект за їх застосування.

5. Поширення отриманих результатів на промислові партії труб із високолегованих сталей сприятиме підвищенню ефективності виробництва і експлуатації, а також конкурентоспроможності труб вітчизняного виробництва на Європейському ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беспшовные трубы «Дальмине» из нержавеющей стали для теплообменников на установках синтеза карбамида. 1977. 117 с.
2. Нержавеющие трубы для химической и нефтехимической промышленности. *Материалы симпозиума по бесшовным трубам из нержавеющей стали*. «Кобэ Стил ЛТД», Япония, 1985. С. 19–28.
3. Stainless Steel Pipe and Tubing. *Mannesmannröhren – worke*. 1987. 143 с.
4. Пумпянский Д. А. Состояние и перспективы развития трубного производства в России. Достижения в теории и практике трубного производства. *Трубы России-2004 : сб. науч. тр. конф.* Под научной редакцией А. А. Богатова. Екатеринбург, 2004. С. 15–19.
5. Walden B., Nicholls J. M. The Sandvik duplex family of stainless steels. Summary of data. *Proc. of the VI Korrosyon Sempozumu Bildiriler Kitabi (4–7 Kasim 1998, Izmir, Turkey)*. 1998. Pp. 100–122.
6. Большаков В. И., Дергач Т. О., Сухомлин Д. А. Гладкі та нарізні труби нафтогазового сортаменту підвищеної корозійної стійкості. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 3. С. 7–18.
7. Дергач Т. А., Дейнеко Л. Н. Влияние технологических факторов на структуру и стойкость против МКК труб из низкоуглеродистой аустенитной стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 6. С. 57–61.
8. Дергач Т. А., Сухомлин Г. Д., Дейнеко Л. Н. Исследование процессов структурообразования при термической обработке труб из аустенитных коррозионностойких сталей с целью повышения стойкости против межкристаллитной коррозии. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2003. № 2. С. 99–109.
9. Watanabe T. Grain boundary engineering: historical perspective and future prospects. *J. Mat. Sci.* 2011. № 12. Pp. 4095–4115.
10. Дергач Т. О. Теоретичні та технологічні основи підвищення корозійної стійкості труб з низьколегованих і високолегованих сталей : автореф. дис. докт. техн. наук. Дніпро, 2018. 36 с.
11. Большаков В. И., Панченко С. А., Дергач Т. А. Научные и технологические методы повышения коррозионной стойкости труб из дуплексных сталей : монография. Дніпро : Литограф, 2016. 135 с.
12. Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д. Теоретичні та технологічні основи розробки інноваційних технологій виробництва труб з високолегованих сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів*. Спец. вип. № 12. Львів, 2018. С. 153–158.
13. Сухомлин Г. Д., Дергач Т. А. Применение зернограничного конструирования стали для получения труб с высоким комплексом свойств. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 6. С. 50–53.

14. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Дергач Т. А. Применение зернограничного конструирования для создания высокого комплекса свойств в трубах из коррозионностойких аустенитных сталей. *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. IX Междунар. науч.-техн. конгресса термистов и металлосведов.* Под общ. ред. И. М. Неклюдова, В. М. Шулаева. Харьков, 2008. С. 165–170.
15. Большаков В. И., Дергач Т. А., Сухомлин Г. Д., Панченко С. А. Применение зернограничного конструирования для повышения коррозионной стойкости труб из ферритно-аустенитных сталей. *Коррозия : материалы, защита.* Москва : Изд-во ООО «Наука и технологии», 2014. № 7. С. 20–26.
16. Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д., Северина Л. С. та ін. Патент № 36004. Україна. МПК C21D 9/08. Спосіб виготовлення труб з аустенітних корозійностійких сталей і сплавів. Опубл. 10.10.2008. Бюл. № 19.
17. Дергач Т. О., Северина Л. С., Сухомлин Г. Д та ін. Патент № 68801. Україна. МПК7C 21D 9 9/08. Спосіб термічного оброблення труб з корозійностійких феритно-аустенітних сталей. № у 2011 11595; заявл. 30.09.2011; опубл. 10.04.2012. Бюл. № 5.
18. Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д., Дейнеко Л. М. Вплив бору на структуроутворення та опір міжкристалітній корозії аустенітної сталі. *Металознавство та обробка металів.* Київ, 2004. № 2. С. 54–61.
19. Дергач Т. А. Влияние бора на микроструктуру и свойства труб из низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали. *Вопросы атомной науки и техники. Серия : Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.* Харьков, 2005. № 5 (88). С. 80–86.
20. Дергач Т. А. Обеспечение высокой стойкости к межкристаллитной коррозии холоднокатаных труб из стали 02X18H11 (304L). *Металознавство та термічна обробка металів.* 2016. № 4 (75). С. 29–38.
21. Дергач Т. А., Панченко С. А. Влияние поверхностно активных элементов и температурно-деформационных параметров на стойкость к межкристаллитной коррозии труб из аустенитных Cr–Ni и Cr–Ni–Mo сталей. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия : Стародубовские чтения-17.* 2017. Вып. 82. С. 65–71.
22. Shimada M., Kokawa H., Wang Z. J., Sato Y. S., Karibe I. Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twininduced grain boundary engineering. *Acta Materialia.* 2002. № 50. Pp. 2331–2341.
23. Jin W., Yang S., Kokawa H., Wang Z. J., and Sato Y. S. Improvement of intergranular stress corrosion crack susceptibility of austenite stainless steel through grain boundary engineering. *J. Mater. Sci. Technol.* 2007. № 6. Pp. 785–789.
24. Tokita S., Kadoi K., Kanno Y., Inoue H. Microstructural Evolution and Solidification Cracking Susceptibility of Grain Boundary Engineered Fully Austenitic Stainless Steel. *Weld World.* 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00865-8>.
25. Jibo Tan, Xinqiang Wu, Shuang Xia. Effect of grain boundary engineering on corrosion fatigue behavior of 316LN stainless steel in borated and lithiated high-temperature water. *Corrosion Science.* 2019. № 152. Pp. 190–201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.036>.
26. Сухомлин Г. Д. Специальные границы в феррите низкоуглеродистых сталей. *Металлофизика и новейшие технологии.* Киев, 2013. № 9. С. 1237–1249.
27. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Дергач Т. О. Методичні основи дослідження зернограничної структури в сталях з γ , α і $\alpha+\gamma$ фазовим станом. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* 2017. № 3 (229–230). С. 10–21.
28. Панченко С. А., Балева А. Є., Терещенко А. А., Большаков В. И., Дергач Т. О. Патент № 92496. Україна. МПК G01N 25/02, 27/72, 33/20. Спосіб кількісної оцінки фазового складу виробів з феритно-аустенітних сталей, зокрема, труб. № у 2014 00030; заявл. 08.01.2014; опубл. 26.08.2014. Бюл. № 16.
29. Большаков В. И., Дергач Т. А., Панченко С. А. Разработка методики испытаний коррозионностойких сталей и сплавов на стойкость против коррозионного растрескивания. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2012. № 4. С. 63–68.
30. Большаков В. И., Дергач Т. А., Панченко С. А. Разработка методики испытаний коррозионностойких сталей и сплавов на стойкость к питтинговой коррозии. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2013. № 1. С. 69–72.
31. Dergach T. A., Sukhomlyn G. D., Panchenko S. A., Kalinina N. E., Balev A. E., Krasiuk A. V., Kalinin V. T. Prospects of application of tubes made of duplex steels of a new generation in the heat exchanging equipment of nuclear power plants. *Problems of atomic science and technology. Series “Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science”.* Kharkiv : National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, 2019. № 5 (123). Pp. 124–129.

REFERENCES

1. *Besshovnye truby “Dal'mine” iz nerzhaveyushchej stali dlya teploobmennikov na ustanovkah sinteza karbamida* [Seamless pipes “Dalmine” made of stainless steel for heat exchangers at urea synthesis plants]. 1977, 117 p. (in Russian).
2. *Nerzhaveyushchie truby dlya himicheskoy i neftekhimicheskoy* [Stainless pipes for the chemical and petrochemical

industries. Proceedings of the symposium on seamless stainless steel pipes]. *Promyshlennosti Materialy simpoziuma po besshovnym trubam iz nerzhaveyushchej stali* [Proceedings of the Symposium on Seamless Stainless Steel Pipes]. "Kobe Stil LTD", Japan, 1985, pp. 19–28. (in Russian).

3. Stainless Steel Pipe and Tubing. Mannesmannröhren – worke. 1987, 143 p.

4. Pumpyanskiy D.A. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya trubnogo proizvodstva v Rossii. Dostizheniya v teorii i praktike trubnogo proizvodstva* [Status and prospects for the development of pipe production in Russia. Achievements in the theory and practice of pipe production]. *Truby Rossii-2004 : sb. nauch. tr. konf.* [Pipes of Russia-2004 : coll. scient. Papers of the conf.]. Under the scientific editorship of A.A. Bogatov. Ekaterinburg, 2004, pp. 15–19. (in Russian).

5. Walden B. and Nicholls J.M. The Sandvik duplex family of stainless steels. Summary of data. Proc. of the VI Korrosyon Sempozyumu Bildiriler Kitabi (4–7 Kasim 1998, Izmir, Turkey). 1998, pp. 100–122.

6. Bol'shakov V.I., Dergach T.O. and Sukhomlin D.A. *Gladki ta narizni trubi naftogazovogo sortamentu pidvishchenoi korozijnoi stijkosti* [Smooth and threaded pipes of the oil and gas assortment with increased corrosion resistance]. *Metalliznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2021, no. 3, pp. 7–18. (in Ukrainian).

7. Dergach T.A. and Dejneko L.N. *Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na strukturu i stojkost' protiv MKK trub iz nizkouglerodistoj austenitnoj stali* [Influence of technological factors on the structure and resistance to ICC of pipes made of low-carbon austenitic steel]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2003, no. 6, pp. 57–61. (in Russian).

8. Dergach T.A., Suhomlin G.D. and Dejneko L.N. *Issledovanie processov strukturoobrazovaniya pri termicheskoy obrabotke trub iz austenitnykh korrozionnostojkikh stalej s cel'yu povysheniya stojkosti protiv mezhkristallitnoj korrozii* [Study of structure formation processes during heat treatment of pipes made of austenitic corrosion-resistant steels in order to increase resistance to intergranular corrosion]. *Metalliznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2003, no. 2, pp. 99–109. (in Russian).

9. Watanabe T. Grain boundary engineering: historical perspective and future prospects. *J. Mat. Sci.* 2011, no. 12, pp. 4095–4115.

10. Dergach T.O. *Teoretichni ta tekhnologichni osnovi pidvishchennya korozijnoi stijkosti trub z niz'kolegovanih i visokolegovanih stalej : avtoreferat dis. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological bases of increasing the corrosion resistance of pipes made of low-alloy and high-alloy steels : abstract of the dissertation. Dr. Tech. of Sc.]. Dnipro, 2018, 36 p. (in Ukrainian).

11. Bol'shakov V.I., Panchenko S.A. and Dergach T.A. *Nauchnye i tekhnologicheskie metody povysheniya korrozionnoj stojkosti trub iz dupleksnykh stalej : monografiya* [Scientific and technological methods for improving the corrosion resistance of pipes made of duplex steels : a monograph]. Dnipro : Litograf Publ., 2016, 135 p. (in Russian).

12. Dergach T.O. and Suhomlin G.D. *Teoretichni ta tekhnologichni osnovi rozrobki innovacijnih tekhnologij virobництва trub z visokolegovanih stalej* [Theoretical and technological foundations of the development of innovative technologies for the production of pipes from high-alloy steels]. *Fiziko-himichna mekhanika materialiv. Problemi korozii ta protikorozijnogo zahistu materialiv.* [Physico-Chemical Mechanics of Materials. Problems of Corrosion and Anti-corrosion Protection of Materials]. Special iss. no. 12, L'viv, 2018, pp. 153–158. (in Ukrainian).

13. Suhomlin G.D. and Dergach T.A. *Primenenie zernogranichnogo konstruirovaniya stali dlya polucheniya trub s vysokim kompleksom svojstv* [The use of grain boundary design of steel to produce pipes with a high range of properties]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2008, no. 6, pp. 50–53. (in Russian).

14. Bol'shakov V.I., Suhomlin G.D. and Dergach T.A. *Primenenie zernogranichnogo konstruirovaniya dlya sozdaniya vysokogo kompleksa svojstv v trubah iz korrozionnostojkikh austenitnykh stalej* [Application of grain boundary design to create a high complex of properties in pipes made of corrosion-resistant austenitic steels]. *Oborudovanie i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov : sbornik dokladov IX Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa termistov i metallovedov* [Equipment and technologies for heat treatment of metals and alloys: a collection of reports of the IX International Scientific and Technical Congress of Thermists and Metallurgists]. Society ed. bu I.M. Neklyudova and V.M. Shulaeva. Har'kov, 2008, pp. 165–170. (in Russian).

15. Bol'shakov V.I., Dergach T.A., Sukhomlin G.D. and Panchenko S.A. *Primeneniye zernogranichnogo konstruirovaniya dlya povysheniya korrozionnoy stojkosti trub iz ferritno-austenitnykh stalej* [Application of grain boundary design to improve the corrosion resistance of pipes made of ferritic-austenitic steels]. *Koroziya : materialy, zashchita* [Corrosion: Materials, Protection]. Moscow : LLC Nauka i Tekhnologii Publ., 2014, no. 7, pp. 20–26. (in Russian).

16. Dergach T.O., Sukhomlyn G.D., Severina L.S. and oth. *Patent № 36004. Ukrayina. MPK C21D 9/08. Sposib vyhotovlennya trub z austenitnykh korozijnostoykikh stalej i splaviv* [Patent no. 36004. Ukraine. IPC C21D 9/08. The method of manufacturing pipes from austenitic corrosion-resistant steels and alloys]. Publ. 10.10.2008, no. 19. (in Ukrainian).

17. Dergach T.O., Severina L.S., Sukhomlyn G.D. and oth. *Patent № 68801. Ukrayina. MPK7C 21D 9 9/08. Sposib termichnoho obroblynnya trub z korozijnostoykikh ferritno-austenitnykh stalej* [Patent no. 68801. Ukraine. MPK7C

21D 9 9/08. The method of heat treatment of pipes made of corrosion-resistant ferritic-austenitic steels]. No. u 2011 11595; statement 30.09. 2011; published 10.04. 2012, no. 5. (in Ukrainian).

18. Dergach T.O., Suhomlin G.D. and Dejneko L.M. *Vpliv boru na strukturoutvorenniya ta opir mizhkristalinitnij korozii austenitnoi stali* [Effect of boron on structure formation and resistance to intergranular corrosion of austenitic steel]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. Kyiv, 2004, no. 2, pp. 54–61. (in Ukrainian).

19. Dergach T.A. *Vliyanie bora na mikrostrukturu i svojstv trub iz nizkouglerodistoj austenitnoj hromonikelevoj stali* [Influence of boron on the microstructure and properties of pipes made of low-carbon austenitic chromium-nickel steel]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya : Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie* [Questions of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science]. Har'kov, 2005, no. 5 (88), pp. 80–86. (in Russian).

20. Dergach T.A. *Obespechenie vysokoj stojkosti k mezhkristalinitnoj korrozii holodnokatanyh trub iz stali 02H18N11 (304L)* [Ensuring high resistance to intergranular corrosion of cold-rolled pipes made of steel 02X18H11 (304L)]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 4 (75), pp. 29–38. (in Russian).

21. Dergach T.A. and Panchenko S.A. *Vliyanie poverhnostno aktivnyh elementov i temperaturno-deformacionnyh parametrov na stojkost' k mezhkristalinitnoj korrozii trub iz austenitnyh Cr–Ni i Cr–Ni–Mo staley* [Influence of surface-active elements and temperature-deformation parameters on the resistance to intergranular corrosion of pipes made of austenitic Cr–Ni and Cr–Ni–Mo steels]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Ser.: Starodubovskie chteniya-17* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering. Series : Starodubovskie Readings-17]. 2017, no. 82, pp. 65–71. (in Russian).

22. Shimada M., Kokawa H., Wang Z.J., Sato Y.S. and Karibe I. Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twininduced grain boundary engineering. *Acta Materialia*. 2002, no. 50, pp. 2331–2341.

23. Jin W., Yang S., Kokawa H., Wang Z.J. and Sato Y.S. Improvement of intergranular stress corrosion crack susceptibility of austenite stainless steel through grain boundary engineering. *J. Mater. Sci. Technol.* 2007, no. 6, pp. 785–789.

24. Tokita S., Kadoi K., Kanno Y. and Inoue N. Microstructural Evolution and Solidification Cracking Susceptibility of Grain Boundary Engineered Fully Austenitic Stainless Steel. *Weld World*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00865-8>.

25. Jibo Tan, Xinqiang Wu and Shuang Xia. Effect of grain boundary engineering on corrosion fatigue behavior of 316LN stainless steel in borated and lithiated high-temperature water. *Corrosion Science*. 2019, vol. 152, pp. 190–201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.036>.

26. Suhomlin G.D. *Special'nye granicy v ferrite nizkouglerodistykh staley* [Special borders in ferrite low carbon steels]. *Metallofizika i novejshe tekhnologii* [Metal Physics and Latest Technologies]. 2013, no. 9, pp. 1237–1249. (in Russian).

27. Bol'shakov V.I., Suhomlin G.D. and Dergach T.O. *Metodichni osnovi doslidzhennya zernogranichnoi strukturi v stalyah z γ , α i $\alpha + \gamma$ fazovim stanom* [Methodological basis of studying the grain boundary structure in steels with γ , α and $\alpha + \gamma$ phase state]. *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 3 (229-230), pp. 10–21. (in Ukrainian).

28. Panchenko S.A., Balev A.E., Tereshchenko A.A., Bolshakov V.I. and Dergach T.O. *Patent № 92496. Ukrayina. MPK G01N 25/02, 27/72, 33/20. Sposib kil'kisnoyi otsinky fazovoho skladu vyrobiv z ferytno-austenitnykh staley, zokrema, trub. № u 2014 00030; zayavl. 08.01.2014; opubl. 26.08. 2014* [Patent no. 92496. Ukraine. IPC G01N 25/02, 27/72, 33/20. Method of quantitative assessment of the phase composition of ferritic-austenitic steel products, in particular, pipes. No. u 2014 00030; statement 08.01.2014; published 26.08. 2014. no. 16]. (in Ukrainian).

29. Bol'shakov V.I., Dergach T.A. and Panchenko S.A. *Razrabotka metodiki ispytaniy korrozionnostojkikh staley i splavov na stojkost' protiv korrozionnogo rastreskivaniya* [Development of methods for testing corrosion-resistant steels and alloys for resistance to corrosion cracking]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2012, no. 4, pp. 63–68. (in Russian).

30. Bol'shakov V.I., Dergach T.A. and Panchenko S.A. *Razrabotka metodiki ispytaniy korrozionnostojkikh staley i splavov na stojkost' k pittingovoj korrozii* [Development of methods for testing corrosion-resistant steels and alloys for resistance to pitting corrosion]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2013, no.1, pp. 69–72. (in Russian).

31. Dergach T.A., Sukhomlyn G.D., Panchenko S.A., Kalinina N.E., Balev A.E., Krasiuk A.V. and Kalinin V.T. Prospects of application of tubes made of duplex steels of a new generation in the heat exchanging equipment of nuclear power plants. *Problems of atomic science and technology. Series : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. Kharkiv : National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”*, 2019, no. 5 (123), pp. 124–129.

Надійшла до редакції: 21.07.2022.