

НОВІТНЯ ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБ ПІДВИЩЕНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ З ДУПЛЕКСНИХ І СУПЕРДУПЛЕКСНИХ СТАЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Дергач Т. О.¹, Балєв А. Є.², Сухомлин В. І.³

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²ПрАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн»

³Дніпровський державний технічний університет

Анотація. Мета роботи – розроблення нових наукових і технологічних заходів з підвищення корозійної стійкості й експлуатаційної надійності труб з дуплексних і супердуплексних сталей нового покоління для забезпечення сучасних вимог споживачів. Результати. Розроблено новітню технологію виготовлення труб підвищеної корозійної стійкості, засновану на інформації про особливості структури та властивостей двофазних високолегованих сталей та на принципі зернограничного конструювання матеріалів. Оригінальність. Застосовано принцип зернограничного конструювання полікристалічних матеріалів. Визначена ключова функція спеціальних границь зерен ГСВ у γ - і α -фазах у підвищенні стійкості сталей проти локальних видів корозії. Практична цінність. Буде збільшено постачання української високотехнологічної продукції на європейський ринок.

Ключові слова: дуплексні та супердуплексні сталі, труби, зернограничне конструювання матеріалів, мікроструктура, спеціальні границі зерен ГСВ, корозійна стійкість, механічні властивості.

Вступ

Останнім часом у різних галузях промисловості збільшується рівень застосування продукції з корозійностійких економно легованих нікелем хромонікельмолібденових феритно-аустенітних (дуплексних і супердуплексних) сталей нового покоління [1–4]. Ці сталі були розроблені як конструкційні матеріали підвищеної корозійної стійкості для менш корозійностійких високолегованих аустенітних сталей типу 03X17H14M3 (316L) [1–4].

В Україні труби з дуплексних і супердуплексних сталей виготовляє ПрАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн» («СПЮ») (м. Нікополь).

Дотепер основними методами здавально-приймальних корозійних випробувань таких труб є випробування на стійкість проти міжкристалітної корозії (МКК) у слабо окисному середовищі за стандартами ASTM A-262 та ISO 3651.

Але з розширенням галузей застосування та підвищенням жорсткості умов експлуатації труб з дуплексних і супердуплексних сталей до їхньої корозійної стійкості були висунуті нові вимоги. Зокрема щодо стійкості проти пітингової корозії (ПК) під час випробувань за підвищених температур і проти корозійного розтріскування (КР) у хлоридвмісних середовищах.

Проведені на ПрАТ «СПЮ» попередні випробування труб поточного виробництва з дуплексних і супердуплексних сталей на стійкість проти ПК і КР довели, що вони не відповідають новим підвищеним вимогам.

Для досягнення необхідних для промисловості результатів потрібно проведення комплексних теоретичних, експериментальних і технологічних досліджень.

Аналіз публікацій

Середній хімічний склад найбільш поширеної дуплексної сталі 02X22H5AM3 (UNS S 31803 / EN 1.4462) є таким (%): С < 0,03; Cr 22; Ni 6; Mo 3; N 0,17), а супердуплексні сталі мають більш високий вміст легувальних елементів Cr, Mo, Ni, N [1].

Структура дуплексних сталей складається з феритної (α -) і аустенітної (γ -) фаз з оптимальним їх співвідношенням 50 %:50 % і допустимим 40 %–60% кожної. Завдяки дрібнозернистій двофазній структурі, наявності міжфазних границь і легуванню азотом міцність дуплексних сталей майже вдвічі вища за еквівалентні їм аустенітні [1–3].

Дуплексні та супердуплексні сталі за підвищених температур піддаються алотропічним фазовим перетворенням, що розширює можливості керування їхньою структурою та властивостями.

Основним недоліком зазначених сталей є виділення в їхній структурі під час нагрівання, зварювання або повільного охолодження в певному діапазоні температур (600–1000 °C) шкідливих інтерметалідних високохромистих фаз, зокрема σ -фази (Fe-Cr-Mo), що призводить до окрихчування, зниження технологічної пластичності та корозійної стійкості металопродукції [4, 5]. Усунути σ -фазу можна високотемпературним гартуванням сталей [6–8].

Технологія виробництва гарячедеформованих труб з корозійностійких феритно-аустенітних сталей складається з гарячої деформації пресуванням суцільних трубних заготовок за температур 1100–1180 °C з наступним термічним обробленням, тобто гартуванням від температур 1050–1100°C, залежно від хімічного складу сталі. Холоднодеформовані труби виготовляють з гарячепресованої заготовки способом багаторазової холодної деформації з проміжними й остаточним термічним обробленням.

Інформація про нові технології виготовлення труб з дуплексних і супердуплексних сталей, а також про методи підвищення їхньої корозійної стійкості технологічними методами в літературі відсутня [7–10]. У деяких роботах розглянуто підвищення якісних характеристик таких сталей в процесі їх виплавлення [10].

Останнім часом у деяких країнах (переважно в Японії, Китаї) розвиваються технології, спрямовані на підвищення стійкості металопродукції з аустенітних корозійностійких сталей проти міжкристалітної корозії та корозійного розтріскування, основою яких є принцип зернограничного конструювання (ЗГК) полікристалічних матеріалів [7, 11–16]. Вони спрямовані на утворення структури сталей з підвищеним вмістом спеціальних границь (СГ) зерен $\Sigma 3$ у теорії ґраток вузлів (ГСВ), що співпадають, які мають знижену поверхневу енергію та підвищену корозійну стійкість.

Але запропоновані в них режими оброблень (критичні деформації + відпали за температур 1200–1300 К протягом до 72 годин) є неприйнятними для застосування в промисловому виробництві через значну тривалість і отримання різнозернистої структури сталі, неприпустимої для продукції цього призначення. Крім того, для корозійних випробувань автори часто застосовують короточасні дослідницькі методи [5, 6] та їхні результати не відповідають результатам стандартних

корозійних випробувань і вимогам промислового виробництва.

У закордонних публікаціях відсутні дослідження спеціальних границь зерен у сталях з об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) кристалічною ґраткою і міжфазних границь зі зниженою поверхневою енергією у двофазних сталях.

Крім того, українськими вченими протягом багатьох років здійснюються наукові й експериментальні дослідження з підвищення стійкості проти МКК, ПК і КР труб з високолегованих аустенітних і феритно-аустенітних сталей, які безпосередньо використовують у промисловому виробництві [7, 8]. Для якісного та кількісного аналізу СГ ГСВ розроблено металографічні та електронномікроскопічні методики дослідження зернограничної структури сталей з різними типами кристалічних ґраток [17–20], що збільшило рівень можливості застосування до них принципу зернограничного конструювання.

Мета роботи – розроблення нових наукових і технологічних заходів з підвищення корозійної стійкості й експлуатаційної надійності труб з дуплексних і супердуплексних сталей нового покоління для забезпечення сучасних вимог споживачів.

Матеріали та методи досліджень

Матеріалами досліджень були гарячепресовані та холоднокатані труби з феритно-аустенітних дуплексних і супердуплексних сталей виробництва ПрАТ «СПЮ».

Зразки гарячепресованих труб піддавали гартуванню у воді від температур 1050–1200°C та подвійному гартуванню у воді від 1150–1200 °C + 1050–1100 °C, а холоднокатані труби піддавали попереднім деформаціям зі ступенем від 40 до 80 % і гартуванню за тими самими режимами.

Зернограничну структуру сталей досліджували згідно з методиками, наведеними в [17, 20], а також із застосуванням електронної мікроскопії з дифракцією зворотнорозсіяних електронів (ДЗРЕ).

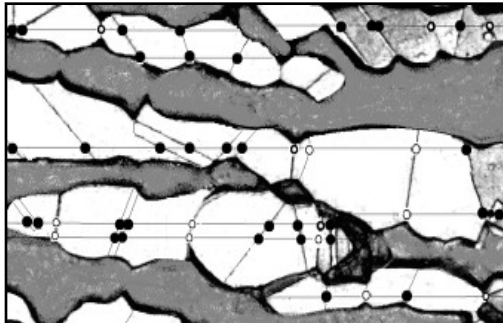
Корозійні дослідження зразків склалися з таких випробувань: на стійкість проти МКК у киплячих розчинах (1) 35 % H_2SO_4 з додаванням CuSO_4 і металеві міді – за методом Е, ASTM A-262 [21] та 2) 50 % H_2SO_4 з додаванням $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – Практика А, ASTM G-28; на стійкість проти ПК: – у 6 % розчині FeCl_3 за підвищених температур (35, 40 і 45 °C) за ASTM G-48; на стійкість проти КР: у кипля-

чому за 155 °С 44% розчині MgCl_2 за ASTM G-48.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження процесів структуроутворення під час термічних оброблень

Визначено, що в разі підвищення температури гартування зразків гарячепресованих труб відбувається розчинення шкідливих інтерметалідних фаз, зокрема σ -фази (за умови їх наявності в сталі), помірне збільшення аустенітних і феритних зерен (у середньому з 9 до 17 мкм) і збільшення кількості спеціальних низькоенергетичних границь зерен $\Sigma 3$ ГСВ в аустенітній фазі (з 55 % до > 70 %). Водночас завдяки високотемпературному поліморфному $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворенню збільшується до 63–66 % вміст α -фази в структурі сталі, що перевищує гранично допустиму згідно з вимогами нормативних документів величину (60 %). Наступне гартування за знижених температур 1000–1100 °С (залежно від хімічного складу сталі) сприяє відновленню необхідного балансу α - і γ -фаз ($\approx$ по 50 % кожної) та додатковому збільшенню (до > 75%) кількості СГ $\Sigma 3$ у γ -фазі сталі (рис. 1).

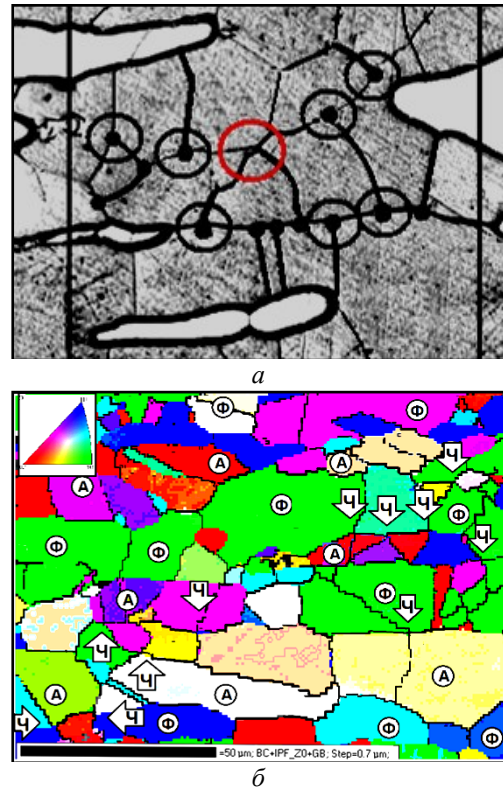


● – СГ $\Sigma 3$; ○ – границі загального типу

Рис. 1. Мікроструктура зразка гарячепресованої труби з дуплексної сталі S31803 (02X22H5AM3) після подвійного гартування (1150 + 1050) °С, $\times 2000$

Крім того, металографічним методом вперше встановлено наявність спеціальних низькоенергетичних границь зерен α - α у феритній складовій високолегованих дуплексних сталей (рис. 2, а). СГ α - α було визначено за їхніми ознаками згідно з методикою [17]: приблизно до 180° протилежними їм кутами в потрійних стиках зерен (позначені жирними лініями) і наявністю множинних (четверних) стиків (один з них обведений колом червоного кольору на рис. 2, а).

Міжфазні границі α/γ з пониженим поверхневим натягненням перебувають у четверних стиках (позначені літерою «Ч» на рис 2, б). Їх наявність і підвищена кількість впливає на процеси фазових перетворень, рекристалізації, а також на корозійні та механічні властивості дуплексних і супердуплексних сталей. З підвищенням температури гартування та в процесі подвійного гартування кількість міжфазних четверних стиків збільшується.



а – СГ у α -фазі, $\times 2000$; б – міжфазні границі α/γ з пониженою поверхневою енергією

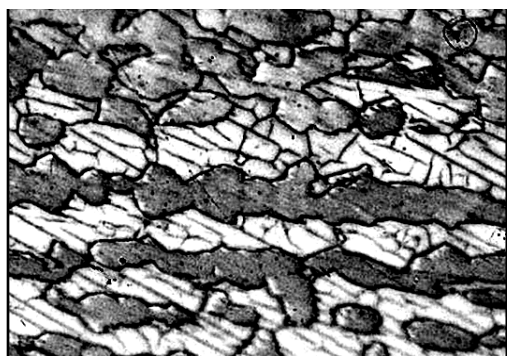
Рис. 2. Мікроструктура зразків гарячепресованої труби з дуплексної сталі після подвійного гартування (метод ДЗРЕ)

Таким чином, зернограничне конструювання в гарячепресованих трубах з дуплексних і супердуплексних сталей реалізується внаслідок високотемпературної деформації трубної заготовки з високим ступенем деформації (до 95 %) і наступного подвійного гартування за розробленим режимом – від температур 1150–1200 °С + 1050–1100 °С. Температура гартування вибирається залежно від ступеня легування сталі, а для супердуплексних сталей вона має бути на 20–30 °С вища за температуру гартування дуплексних.

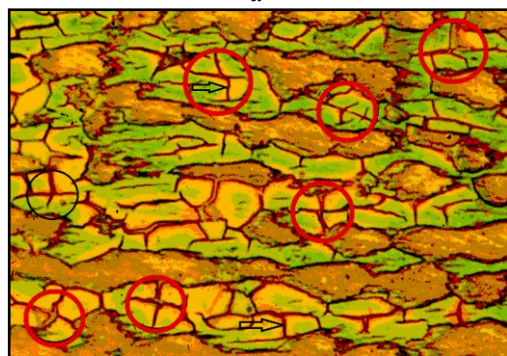
Під час експериментів з холоднокатаними трубами визначено, що збільшення сту-

пеня холодної деформації в процесі прокатки з 40 % до 75 % після подвійного гартування сприяло збільшенню кількості СГ $\Sigma 3$ ГСВ в γ -і α -фазах структури сталі (рис. 3).

Когерентні та некогерентні СГ $\Sigma 3$ ГСВ в аустенітній фазі (білого кольору) є прямолінійними паралельними відрізками та зигзагоподібними фасетками (рис. 3, а); СГ у феритній фазі (жовтого кольору на рис. 3, б) мають множинні (четверні) стики (обведені колами) і розташовані в потрібних стиках границь під кутом, що дорівнює приблизно 180° (дві з них у верхній і нижній частинах знімка позначені стрілками). Кількість СГ в γ -і α -фазах становить 85 % і 45 %.



а



б

а – СГ $\Sigma 3$ в γ -фазі (білого кольору);
б – СГ у α -фазі (жовтого кольору)

Рис. 3. Мікроструктура зразка холоднокатаної труби з дуплексної сталі з підвищеним вмістом спеціальних границь:

Крім того, завдяки технологічним можливостям ПрАТ «СПЮ» термічне оброблення холоднокатаних труб здійснюють у прохідній печі фірми «LOI» (Німеччина) з атмосферою особливо чистого водню (99,9999 % H_2). Це дозволяє унеможливити операцію кислотного хіміко-технологічного оброблення труб готового розміру та значно поліпшити якість їхньої поверхні.

Результати комплексних корозійних досліджень труб

Застосування розробленої технології сприяло підвищенню корозійних властивостей труб з дуплексних і супердуплексних сталей.

Значно підвищилася стійкість до пітингової корозії під час випробування за ASTM G-48. Швидкість ПК зразків гарячепресованих труб з дуплексних сталей знизилася більше ніж у 300 разів (наприклад, під час випробування за $45^\circ C$ з 0,48 до 0,0015 мг/см²), а швидкість деяких зразків дорівнювала 0 мг/см² [7, 8]. Крім того, найбільш чутлива до ПК характеристика – температурна границя пітингостійкості (температура, за якої швидкість корозії зразків не перевищувала 0,1 мг/см²) – підвищилася з $30^\circ C$ до $45^\circ C$. Цей результат перевершує результати закордонних аналогів, де максимальна температура пітингостійкості для труб з дуплексних сталей становить $30^\circ C$ [4, 5].

Також підвищилася стійкість труб до КР; під час випробування напружених до $\sigma_p = 0,4\sigma_{02}$ сталі (180 МПа) С-подібних кільцевих зразків холоднокатаних труб у киплячому розчині $MgCl_2$ за ASTM G-36 час до появи першої тріщини збільшився зі 127 до 270 годин, тобто більше ніж у 2 рази.

Результати незалежних випробувань дослідних труб фірмою TUV NORD

З метою розширення ринків у країнах Західної Європи зразки холоднокатаних труб розмірами $\varnothing 33 \times 3,4$ мм і $\varnothing 89 \times 5,5$ мм з дуплексної та супердуплексної сталей, виготовлених за розробленою технологією, керівництвом ПрАТ «СПЮ» були передані фірмі TUV NORD (Німеччина) для незалежного тестування.

На рис. 4 і в табл. 1–3 наведено попередні результати дослідження їхньої структури, випробувань механічних властивостей (табл. 1) і корозійної стійкості (табл. 2 і 3).

Згідно з результатами досліджень, мікроструктура дослідних труб була аналогічна отриманій на ПрАТ «СПЮ» (рис. 4).

Під час випробування на ударну в'язкість було визначено, що труби з дуплексної та супердуплексної сталей майже не залежать від криогенних температур (табл. 1). За температури $-60^\circ C$ ударна в'язкість дослідних труб була високою та відрізнялася від цієї характеристики за кімнатної температури лише на 3 % і 11 %, відповідно (табл. 1).

Висока ударна в'язкість труб з дуплексних і супердуплексних сталей за криогенних температур дозволяє розширювати сфери їх застосування, зокрема їх можна використовувати для будівництва нафтогазовидобувних

платформ на шельфах морів у північних регіонах та в інших галузях промисловості.

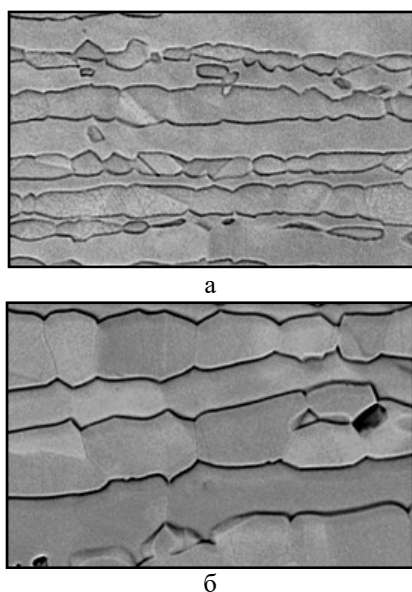


Рис. 4. Мікроструктура холоднокатаної труби з дуплексної (а) і супердуплексної (б) сталей

Таблиця 1 – Результати випробувань дослідних труб на ударну в'язкість за кімнатної і криогенної температур

Матеріал	№ зразка	KCV (J)	t, °C	KCV (J) сер.
Дуплексна сталь (1.4462)	6-4-1	160	+ 24	157
	6-4-2	160		
	6-4-3	152		
	6-4-4	144	– 60	152
	6-4-5	160		
	6-4-6	152		
Супердуплексна сталь (1.4410)	5-4-1	212	+ 24	211
	5-4-2	212		
	5-4-3	208		
	5-4-4	190	– 60	187
	5-4-5	164		
	5-4-6	208		

Таблиця 2 – Результати випробувань зразків холоднокатаних труб на стійкість проти МКК за ASTM G28

Матеріал	№ зразка	Швидкість корозії, мм/рік
Дуплексна сталь (1.4462)	6-4-4	0,47
	6-4-5	0,49
	6-4-6	0,48
Середня по 3-х зразках		0,48
Супердуплексна сталь (1.4410)	5-4-4	0,25
	5-4-5	0,27
	5-4-6	0,28
Середня по 3-х зразках		0,27
Вимоги ASTM G28 ≤		0,93

Результати корозійних випробувань ком-

панією TUV NORD дослідних труб доводять таке:

під час випробування зразків на стійкість проти МКК за методом А ASTM G28 у киплячому корозійно-агресивному розчині (50 % $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) визначено, що швидкість корозії зразків з дуплексної сталі була майже в 2 рази, а із супердуплексної сталі – у 3,5 рази нижче за гранично-допустиму згідно зі стандартом (табл. 2).

Раніше такий метод випробувань на МКК до труб та іншої продукції з дуплексних сталей не застосовувався, і наведені результати були отримані вперше.

Крім того, за результатами компанії-дослідника TUV NORD швидкості корозії зазначених труб були нижчими за швидкості корозії труб з кошовних високонікелевих і нікель-молібденових сплавів (зокрема сплавів 625; C-276; 825) за тих самих умов випробувань.

Отже, заміна в деяких випадках труб з кошовних високолегованих сплавів на економні леговані нікелем і молібденом труби з дуплексних і супердуплексних сталей сприятиме підвищенню рівня рентабельності й ефективності промислового виробництва.

Дослідні холоднокатані труби також мають високу стійкість проти ПК (табл. 3). Швидкості пітингової корозії зразків труб з дуплексної і супердуплексної сталей під час випробування за ASTM G48 за температур 35 °C і 55 °C були стабільно низькими та не перевищували 0,01 мм/рік і 0,02 мм/рік, відповідно (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати випробувань зразків труб на стійкість проти ПК за ASTM G-48

Матеріал	№ зразка	t, ° C	V _{кор.} (мм/рік)
Дуплексна сталь (1.4462)	6-4-1	35	0,01
	6-4-2		0,01
	6-4-3		0,01
	6-4-4		0,01
Супердуп- лексна (1.4410)	5-4-1	55	0,02
	5-4-2		0,02
	5-4-3		0,02
	5-4-4		0,02
Вимоги стандарту			≤0,1 мм/рік

Компанія TUV NORD продовжує здійснювати комплексні випробування виготовлених в Україні за новою технологією дослідних труб з дуплексної та супердуплексної сталей. Одночасно продовжуються роботи з подальшого вдосконалення технології їх виробництва щодо застосування індивідуаль-

ного підходу до продукції, залежно від її хімічного складу та сортаменту (діаметра й товщини стінки).

Висновки

1. Розроблено новітню технологію виготовлення труб підвищеної корозійної стійкості з високолегованих феритно-аустенітних дуплексних і супердуплексних сталей, засновану на теорії ґраток співпадаючих вузлів і принципі зернограничного конструювання полікристалічних матеріалів.

2. Труби, виготовлені за розробленою технологією, визначаються поліпшеною структурою з підвищеним вмістом низькоенергетичних СГ $\Sigma 3$ ГСВ в γ - і α -фазах (до 85 % і 45 %, відповідно), високими ударною в'язкістю за криогенних температур (-60°C), а також стійкістю до найбільш небезпечних локальних видів корозії: МКК, ПК і КР.

3. Незалежні випробування компанією TUV NORD (Німеччина) довели високу якість труб, виготовлених в Україні.

4. Наведені розробки сприятимуть розширенню сфер застосування труб з дуплексних і супердуплексних сталей та впровадженню високотехнологічної трубної продукції ПрАТ «СПЮ» з високою доданою вартістю на європейському ринку.

Література

- Peultier J., Baudu V., P. Boillot P. Jean-Christophe Gagnepain. News Trends in Selection of Metallic Material for Desalination Industry. R&D Stainless Steels and Clad Plates Manager – Industeel, Arcelormittal R&D – France; TK Nirosta. NIROSTA® 4462 (UNS S 31803/UNS S 32205) Ferritic-austenitic duplex steel with high strength and corrosion resistance. 2019.
- Materials Technology. Duplex Stainless Steels – a Review after DSS '07 held in Grado Jacques Charles. First published: 13 December 2016 <https://doi.org/10.1002/srin.200806153>
- Дуплекс проти супердуплексної нержавіючої сталі / anghe-metal.com/uk/blog/duplex-vs-super-duplex-stainless-steel/ 05.06.2025.
- Sandvik, Corrosion Resistance Sandvik SAF 2205, <http://www.sandvik.com>
- Dr. J. Charles. Past, present and future of the duplex stainless steels. Arcelor mittal stainless. E-mail address: jacques.charles@arcelor.com 2008
- Duplex stainless steel welding. Best practices. www. stainless-steel-world. 2019. 46 p.
- Дергач Т. О. Теоретичні та технологічні основи підвищення корозійної стійкості труб з високолегованих і високолегованих сталей: автореф. дис. ...д.т.н. Дніпро: НМетАУ, 2018. 36 с.
- 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*. Львів, 2018. № 12. С. 153–158.
- Лабораторні та експлуатаційні випробування труб з високолегованих сталей, виготовлених за новітніми технологіями / Т. О. Дергач та ін. *Укр. жур. будівництва та архітектури*. 2022. № 4. С. 46–57. DOI:<https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.46.877>
- Pitting corrosion behavior in sodium chloride solution of intermetallic centreline stringers in super duplex stainless steels / P. Erasmus-Vignal et al. *Corrosion Science*. 2023. V. 223. 111482.
- Shimada M., Optimization of grain boundary character distribution for Intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin induced grain boundary engineering / M. Shimada et al. *Acta Materialia*. 2022. 50. P. 2331–2341.
- Effect of thermomechanical processing via rotary swaging on grain boundary character distribution and intergranular corrosion in 304 austenitic stainless steel / W. Feng et al. *J. Mater. Res. Technol.* 19 (2022). Pp. 2470–2482.
- Pradhan S. K., Bhuyan P., Mandal S. Individual and synergistic influences of microstructural features on intergranular corrosion behavior in extra-low carbon type 304L austenitic stainless steel. *Corrosion Science*. 2018. 139. P. 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.05.014>
- Grain Boundary Engineering and Its Effect on Intergranular Corrosion Resistance of a Ni-Cr-Mo Based C276 Superalloy / Chi Zhang et al. *Mater. Science Crystals*. 2022. 12 (11). 1625. <https://doi.org/10.3390/cryst12111625>
- Effect of Grain Boundary Engineering on Corrosion Fatigue Behavior of 316LN Stainless Steel in Borated and Lithiated High-Temperature Water / J. Gao et al. *Corros. Sci.* 2019. 152. 190–201. doi:10.1016/j.corsci.2019.01.036.
- Effects of Grain Boundary Engineering on the Microstructure and Corrosion Fatigue Properties of 316L Austenitic Stainless Steel / M. Zhang et al. *Front. Mater.* 2022. 9:931848. doi: 10.3389/fmats.2022.931848.
- Большаков В. І., Сухомлин Г. Д., Дергач Т. О. Методичні основи дослідження зернограничної структури в сталях з γ -, α - і $\alpha+\gamma$ -фазовим станом. *Вісн. Придніпр. держ. акад. буд. та архітект.* 2017. № 3. (229–230). С. 10–21.
- Scientific and experimental justification for the industrial application of accelerated electrochemical methods for testing resistance to intergranular corrosion / T. O. Derhach et al. *Voprosy khimii i khimich. Tekhnologii*. 2025. No. 2. Pp. 123–133. doi:<http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-123-133>

19. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Сухомлин В. И. Кристаллографічні зв'язки цементит-аустеніт-ферит при дифузійному розпаді аустеніту. *Вісн. Придніпр. держ. акад. буд. та архітект.* 2016. № 5 (218). С. 79–87
20. Дергач Т. О., Глушкова Д. Б., Балев А. Є. Новітні технології зернограничного конструювання матеріалів для підвищення корозійної стійкості труб з високолегованих сталей. *Вісник ХНАДУ*. 2024. № 107, С. 31–36. DOI: [tps://doi.org/10.30977/bul.22195548.2024.107.0.31](https://doi.org/10.30977/bul.22195548.2024.107.0.31)
21. ASTM A262-15 (2021) Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels, 2021, 47.

References

1. Peultier, J., Baudu, V., Boillot, P. (2019). Jean-Christophe Gagnepain. News Trends in Selection of Metallic Material for Desalination Industry. R&D Stainless Steels and Clad Plates Manager – Industeel, Arcelormittal R&D – France; TK Nirosta. NIROSTA® 4462 (UNS S 31803/UNS S 32205) Ferritic-austenitic duplex steel with high strength and corrosion resistance. 2019.
2. Materials Technology. Duplex Stainless Steels – a Review after DSS '07 held in Grado Jacques Charles. First published: 13 December 2016 <https://doi.org/10.1002/srin.200806153>
3. Duplex proti superduplex stainless-steel / anghe-metal.com/uk/blog/duplex-vs-super-duplex-stainless-steel/ 05.06.2025.
4. Sandvik, Corrosion Resistance Sandvik SAF 2205, <http://www.sandvik.com>.
5. Dr. J. Charles. Past, present and future of the duplex stainless steels. Arcelor mittal stainless. *E-mail address: iacques.charles@arcelor.com* 2008.
6. Duplex stainless steel welding. Best practices. www.stainless-steel-world.com. 2019. 46 p.
7. Derhach, T. O. (2018). Teoretychni ta tekhnolohichni osnovy pidvyshchennia koroziinoi stiiikosti trub z nyzkolehovanykh i vysokolehovanykh stalei. *Av-toreferat dys. d.t.n. Dnipro: NMetAU*. 36 s.
8. Derhach, T. O., Sukhomlyn, H. D. (2018). Teoretychni ta tekhnolohichni osnovy rozrobky innovatsiinykh tekhnolohii vyrobnytstva trub z vysoko lehovanykh stalei. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv. Problemy korozii ta protykoroziinoho zakhystu materialiv*. № 12. S. 153–158.
9. Derhach, T. O., Sukhomlyn, H. D., Deineko, L. M., Baliev, A. Ye., Krasiuk, A. V. (2022). Laboratorni ta ekspluatatsiini vyprovuvannia trub z vysokolehovanykh stalei, vyhotovlenykh za novitnymi tekhnolohiiamy. *Ukr. Zhur. budivnytstva ta arkhitektury*. № 4. S. 46–57.
10. Erasmus-Vignal, P., Vignal, V., Huguenin, P., Krajcarz, F. (2023). Pitting corrosion behaviour in sodium chloride solution of intermetallic centreline stringers in super duplex stainless steels. *Corrosion Science*, V. 223, 111482.
11. Shimada, M., Kokawa, H., Wang, Z. J., Sato, Y. S., Karibe, I. (2022). Optimization of grain boundary character distribution for Intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin induced grain boundary engineering. *Acta Materialia*, 50, P. 2331–2341.
12. Feng, W., Wang, Z., Sun, Q., He, Y., Sun, Y. (2022). Effect of thermomechanical processing via rotary swaging on grain boundary character distribution and intergranular corrosion in 304 austenitic stainless steel. *J. Mater. Res. Technol.*, 19, Pp. 2470–2482.
13. Pradhan, S. K., Bhuyan, P., Mandal, S. (2018). Individual and synergistic influences of microstructural features on intergranular corrosion behavior in extra-low carbon type 304L austenitic stainless steel. *Corrosion Science*, 139, P. 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.05.014>
14. Chi Zhang, Ling Lin, Renchao Chen, Liwen Zhang, Zhiwen Shao. (2022). Grain Boundary Engineering and Its Effect on Intergranular Corrosion Resistance of a Ni-Cr-Mo Based C276 Superalloy. *Mater. Science Crystals*, 12 (11), 1625; <https://doi.org/10.3390/cryst12111625>
15. Gao, J., Tan, J., Wu, X., and Xia, S. (2019). Effect of Grain Boundary Engineering on Corrosion Fatigue Behavior of 316LN Stainless Steel in Borated and Lithiated High-Temperature Water. *Corros. Sci.* 2019. 152, 190–201. doi:10.1016/j.corsci.2019.01.036
16. Zhang, M., Zhang, C., Wu, H and Yang, B. (2022). Effects of Grain Boundary Engineering on the Microstructure and Corrosion Fatigue Properties of 316L Austenitic Stainless Steel. *Front. Mater.* 9:931848. doi: 10.3389/fmats.2022.931848
17. Bol'shakov, V. I., Suhomlin, G. D., Dergach, T. O. (2017). Metodichni osnovi doslidzhennya zerno granichnoi strukturi v stalyah z γ , α i $\alpha+\gamma$ fazovim stanom. *Visn. Prydnipr. derzh. akad. bud. ta arhitekt.*, № 3 (229–230), S. 10–21.
18. Derhach, T. O., Sukhomlyn, D. A., Hlushkova, D. B., Baliev, A. Ye. (2025). Scientific and experimental justification for the industrial application of accelerated electrochemical methods for testing resistance to intergranular corrosion. *Voprosy khimii i khimich. tekhnologii*, No. 2, Pp. 123–133. [/http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-123-133](http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-123-133).
19. Bol'shakov, V. I., Suhomlin, G. D., Sukhomlin, V. I. (2016). Krystalohrafichni zvyazky tsementyt-austenit-feryt pry dyfuziinomu rozpadi austenitu. *Visn. Prydnipr. derzh. akad. bud. ta arkhitekt. Visn. Prydnipr. derzh. akad. bud. ta arkhitekt.* № 5 (218), С. 79–87.
20. Derhach, T. O., Hlushkova, D. B., Baliev, A. Ye. (2024). Novitni tekhnolohii zernohranychnoho konstruyuvannia materialiv dlia pidvyshchennia koroziinoi stiiikosti trub z vysokolehovanykh stalei. *Visnyk KhNADU*, №107, С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.30977/bul.22195548.2024.107.0.31>
21. ASTM A262-15 (2021) Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Stainless Steels, 2021, 47.

Дергач Тетяна Олександрівна¹, д.т.н., проф.
каф. технології металів та матеріалознавства,
ta_dergach@i.ua,
тел. +38 050-867-30-97,

Балєв Андрій Євгенович², нач. науково-
дослідного відділу ПрАТ «Сентравіс Продакшн
Юкрейн», abalev@centravis.com.ua,
тел. +38 063-442-03-84,

Сухомлин Володимир Іванович³, к.т.н., доцент,
доцент кафедри фізики твердого тіла,
v_syhomlyn@ukr.net,
тел. +38 050-453-87-89

¹Харківський національний автомобільно-
дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого,
25, м. Харків, 61002, Україна

²ПрАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн»,
пр. Трубників, 81, м. Нікополь,
Дніпропетровська обл, Україна

³Дніпровський державний технічний університет,
м. Кам'янське, Дніпропетр. Обл, Україна.

Latest technology for manufacturing pipes with increased operational reliability from new generation duplex and super duplex steels

Abstract. Problem. The application of corrosion-resistant, cost-effective, nickel-alloyed Cr-Ni-Mo ferritic-austenitic (duplex and super duplex) stainless steels of a new generation has expanded significantly across various industries. These steels were developed as structural materials immune to intergranular corrosion (IGC) and highly resistant to stress corrosion cracking (SCC) and pitting corrosion (PC). They are designed to replace less corrosion-resistant conventional austenitic Cr-Ni-Mo steels, such as the widely used 03X17H14M3 (AISI 316L). With the broadening scope of applications and increasingly demanding service conditions, higher requirements have been imposed on the corrosion resistance and reliability of duplex and super duplex steel pipes, necessitating comprehensive scientific and experimental research. **Goal.** The purpose of this work is to develop scientifically grounded technological approaches aimed at enhancing the corrosion resistance and operational reliability of pipes made from new-generation duplex and super duplex steels, in accordance with modern industry requirements. **Methodology.** To achieve this goal, state-of-the-art scientific findings and technologies for microstructural optimization and corrosion performance improvement of high-alloy steel products were analyzed. Experimental investigations employed modern techniques for structural characterization and complex corrosion testing, focusing on the steels' resistance to localized corrosion mechanisms commonly

encountered under service conditions. **Results.** Innovative, scientifically substantiated technology has been developed for manufacturing pipes with enhanced corrosion resistance and operational reliability from high-alloy ferritic-austenitic duplex and super duplex steels. The approach is based on the coincident site lattice (CSL) theory and the principles of grain boundary engineering (GBE) in polycrystalline materials. Hot-pressed and cold-rolled pipes produced using this technology demonstrated high impact toughness at cryogenic temperatures ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) and superior resistance to intergranular, pitting, and stress corrosion cracking, surpassing the performance of foreign analogues in these critical quality parameters. The results confirm the high operational reliability and expanded applicability of new-generation duplex and super duplex steel pipes. **Originality.** For the first time, special low-energy grain boundaries within the ferritic phase and low-energy interphase boundaries in highly alloyed ferritic-austenitic steels were identified. The decisive role of these boundaries in enhancing resistance to localized corrosion initiated at grain interfaces was demonstrated. **Practical value.** The developed technology will facilitate the wider adoption of high-value, corrosion-resistant pipe products manufactured by Centravis Production Ukraine JSC (CPU) in the European and global markets, contributing to improved material efficiency and service reliability in critical applications. **Keywords:** duplex and super duplex steels, pipes, grain boundary engineering, microstructure, coincident site lattice (CSL) boundaries, corrosion resistance, mechanical properties

Tetyana Oleksandrivna Derhach¹, Doctor of Technical Sciences, prof. Department of Metal Technology and Materials Science,
ta_dergach@i.ua,
tel. +38 050-867-30-97,

Andriy Evgenovich Balyev², Head of the research department of Centravis Production Ukraine PJSC,
abalev@centravis.com.ua,
tel. +38 063-442-03-84,

Volodymyr Ivnovich Sukhomlyn³, Candidate of technical sciences, docent of the Department of Condensed Matter Physics.
v_syhomlyn@ukr.net,
тел. +38 050-453-87-89

¹Kharkiv National Automobile and Road University, 61002, Ukraine, Kharkiv, str. Yaroslav the Wise, 25.

²PJSC Centravis Production Ukraine, 81 Trubnykov Ave., Nikopol, Dnipropetrovsk region.

³Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Dnipropetrovsk region, Ukraine.