

## КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

### STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

УДК 621.796.76/.79:669.14

- Валерій Міщенко д-р техн. наук, професор, професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: [mishchen4@gmail.com](mailto:mishchen4@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0992-478X
- Сергій Беліков д-р техн. наук, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: [belikov@zpu.edu.ua](mailto:belikov@zpu.edu.ua), ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Евеліна Бажміна д-р філософії, доцент, доцентка кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: [evelinabazhmina@gmail.com](mailto:evelinabazhmina@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4750-8170
- Володимир Корнієнко аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: [vkornienko268@gmail.com](mailto:vkornienko268@gmail.com), ORCID: 0009-0007-2193-3204
- Дмитро Міщенко аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: [dymis@ukr.net](mailto:dymis@ukr.net)
- Андрій Харченко аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: [harchenko21@gmail.com](mailto:harchenko21@gmail.com)

## ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ

**Мета роботи.** Оцінка можливостей електроконтактного зварювання листових корозійностійких сталей різного фазового складу та товщини.

**Методи дослідження.** З метою визначення особливостей електроконтактного зварювання листових корозійностійких сталей різних структурних класів проведено порівняльний аналіз режимів точкового та роликового зварювання аналізованих сталей з урахуванням їхньої товщини та комбінації марок у зварному з'єднанні, а також наявного зварювального обладнання. Тому в цих дослідженнях застосували експериментальні способи добірок параметрів режимів зварювання, основними з яких був зварювальний струм  $T_{зв}$ , зусилля стиснення електродів  $F_{зв}$  і тривалість імпульсу зварювального струму  $\tau_{зв}$ . Визначення міцності зварювальних швів визначали стандартними методами.

**Отримані результати.** Обґрунтовано вибір режимів зварювання корозійностійких сталей різного фазового складу з урахуванням їхньої товщини та комбінації марок. Досліджені сталі мартенситоферитного класу 06X18ч, 08X18ч та феритного класу 03X18ТБчГР, 05X18ТФч, 08X18Т1 придатні до електроконтактного зварювання без обмежень.

**Наукова новизна.** Встановлені режими електроконтактного зварювання та товщини листових корозійностійких сталей різного фазового складу на структуру та механічні властивості зварних швів однорідних і різнорідних марок сталей.

**Практична цінність.** Показано, що структура і механічні властивості зварних швів як однорідних, так і різнорідних хімічних складів спеціальних сталей відповідають вимогам їхнього застосування для різного функціонального призначення.

**Ключові слова:** зварні з'єднання, феритна структура, мартенситоферитна структура, технологічні та механічні властивості, корозійностійкі сталі.

## Вступ

Для поширеного застосування виконані порівняльні дослідження зварюваності методами електроконтактного зварювання спеціальних сталей. Дослідження зварюваності листових сталей 08X18H10T, 08X18T1, 06X18ч, 09Г2 і 05X18ТФч електроконтактним зварюванням проводили у зв'язку з передбачуваним їхнім застосуванням для виготовлення захисного кожуха цистерн, корпусів автомобілів, планерів літальних апаратів, деталей реакторів магністермічного відновлення титану тощо [1–4].

Сталь 06X18ч розроблена та призначена для виробництва деталей, які виготовляють методом глибокої витягування з подальшим поліруванням. Для ширшого її використання, наприклад, ободи колеса, велосипеда «Школяр», проведено оцінку її зварюваності електроконтактними методами.

## Аналіз досліджень та публікацій

Сучасний розвиток розробки та застосування нових корозійностійких сталей різного фазового складу і функціонального призначення в Україні та за кордоном висувають найвищі вимоги до їхніх механічних та технологічних властивостей. Основою технологічної властивості для виготовлення складних виробів (корпусів автомобілів, планерів літальних апаратів, деталей реакторів магністермічного відновлення титану тощо) є зварюваність [5-7].

Залежно від ступеня легування та умов використання економнолеговані корозійностійкі сталі поділяють на хромисті, хромонікелеві, хромомарганцево-нікелеві та хромомарганцеві [8-10]. Деякі із цих сталей є обмежено зварюваними або важко зварюваними, що потребує застосування додаткового використання обладнання та технологічних способів зварювання. Поширене застосування хромистих сталей в Україні пов'язане не тільки з економічними аспектами, а й із відсутністю запасів нікелю та обмеженими запасами хрому, молібдену [11, 12].

Увага зарубіжних дослідників спрямована на розробці нових економнолегованих корозійностійких сталей з підвищеними технологічними властивостями, основними з яких є зварюваність штампування (пластичність) [7, 13].

## Мета роботи

Метою роботи є дослідження та розробка режимів електроконтактного зварювання та їхнього впливу на структурний стан і механічні властивості зварних швів. Важливою характеристикою є також показники механічних властивостей зварних з'єднань при температурах від 20 °С до -60 °С. Розроблені режими електроконтактного зварювання дозволили отримати необхідний структурний стан двофазних мартенситоферитних сталей та задовільні показники механічних властивостей, як в однорідних, так і в різнорідних сталях за фазовим складом.

## Матеріал і методика досліджень

Для дослідження впливу режимів електроконтактного зварювання та механічних властивостей зварних з'єднань вибирали наступні сталі різного фазового складу (табл. 1).

Для визначення впливу режимів електроконтактного зварювання на якість зварних швів застосовували машини типу МТ-2510. При роликковому зварюванні висували вимоги до режимів переважно такі ж, як і при точковому.

## Результати досліджень

Наведені дані в табл. 1 показують, що розроблені листові сталі мають приблизно однакові і досить високі показники пластичності в стані поставки.

**Таблиця 1** – Механічні властивості досліджуваних марок сталей

№ п/п	Марка сталі	Товщина листа, мм	Механічні властивості		
			$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	Твердість, НВ
1	08X18ч	0,8; 1,0; 2,0	>550	>35	72–81
2	06X18ч	0,8; 1,0; 2,0	>550	>35	68–78
3	03X18ТБчГР	1,0; 1,5	>550	>35	–
4	05X18ТФч	0,8; 1,0	>530	>40	74–77
5	08X18T1	0,8; 1,0; 2,0	550	>30	–

Холоднокатаний прокат отримують згідно з ТУ 14-944-74 для сталі 08X18T1 і ТУ 14-1-3440-90 або ГОСТ 27702-88 для сталей 06X18ч і 08X18ч, де розглянута технологія їхнього металургійного переділу. Розмір зерна фериту значною мірою залежить від попередньої пластичної деформації. Якщо у листі, товщиною 1.0 мм - 8, 9 бал зерна існує при ступені деформації до  $\epsilon=70\%$ , то у листі товщиною 2,0 мм, величина зерна становить 5, 6 бал при  $\epsilon=50\%$ . Це позначається на відносному подовженні як основного металу, так і зварних з'єднань, виконаних роликковим зварюванням.

Режим точкового зварювання аналізованих сталей вибирався з урахуванням товщини і комбінації марок сталей у зварному з'єднанні, а також наявного зварювального обладнання. У літературі [14, 15] відсутні певні параметри точкового та роликкового зварювання для класу сталей, які рекомендуються. Тому в цих дослідженнях застосовували експериментальні способи добірок параметрів режиму зварювання, основними з яких є зварювальний струм  $T_{36}$ , зусилля стиснення електродів  $F_{36}$  і тривалість імпульсу зварювального струму  $\tau_{36}$ .

Крім зазначених параметрів, тепловиділення при зварюванні визначається величиною контактної опору  $R_k$ , який багато в чому залежить від стану поверхні матеріалу, що зварюється.

Підготовка поверхні зварюваних зразків полягала в їхній зачистці на абразивних колах з подальшим промиванням у воді для сталі 09Г2. Корозійностійкі сталі 06Х18ч, 03Х18ТБчГР, 05Х18ФТч, 08Х18Т1 і 12Х18Н10Т у зв'язку з незначним електроопором окисної пасивованої плівки мають контактний опір близький до зачищених зразків від забруднень.

Найбільший вплив на режим зварювання мають електропровідність, теплопровідність і жароміцність, які визначають здатність металу до пластичної деформації в нагрітому стані під дією зусилля стиснення електродів.

У таблиці 2 наведені отримані експериментальним шляхом на машині МТ 2510 режими точкового зварювання сталей, що розглядаються.

Зварювання зразків рівної товщини корозійнозривких марок сталей проходило без будь-яких видимих ускладнень. Однак, при зварюванні різнорідних матеріалів як однакової, так і особливо різної товщини, виникали деякі труднощі. Це пов'язано з тим, що при зварюванні металів різної товщини рекомендується використовувати інший тип машини, які пристосовані для цієї мети та обладнані рядом спеціальних пристроїв, наприклад, комплектуються синхронними переривниками ППШ, що допускають отримання імпульсів типу  $\tau_{36} \leq 0.01$  хв та іншими пристроями. Однак і на наявному устаткуванні вдалося досягти задовільних результатів за рахунок застосування з боку більш товстого зразка електродів (роликів) з плоскою (циліндричною) робочою поверхнею для запобігання утворенню вм'ятин або перегріву на поверхні з'єднання. З боку тонкого зразка кращі результати виходили при застосуванні електродів та роликів зі сферичною поверхнею, так як електроди з плоскою поверхнею давали глибокі вм'ятини на поверхні зразків. Радіус сфери електродів становив 35...40 мм, а роликів 40...45 мм при товщині тонкого листа 10 мм. Особливо великі ускладнення виникали при зварюванні різнорідних металів різної товщини (08Х18Т1+09Г2), що пов'язано з відмінністю їхнього хімічного складу та фізичних властивостей – електропровідністю, температурою плавлення, схильністю до утворення крихких загартованих структур.

Саме при зварюванні хромистих корозійнозривких сталей з низьколегованими та виникають найбільші ускладнення. У цьому випадку літа зона більшою мірою захоплює зразок з меншою теплоелектропровідністю, тобто в даному випадку (08Х18Т1+09Г2) проплавлення сталі 08Х18Т1 більше, ніж сталі 09Г2.

При точковому зварюванні зразків нерівної товщини з боку тонкого зразка (08Х18Т1) встановлювали електрод з дещо меншою робочою поверхнею, ніж у разі зварювання таких же зразків рівної товщини. Так при зварюванні сталей 05Х18ФТч, 08Х18Т1 при товщині зразків, відповідно, 1.0 мм і 0.8 мм використовували електроди з радіусом сфери  $R_{ел}=75$  мм. Зварювання зразків сталей 08Х18Т1 (1.0 мм) та 09Г2 (2.0 мм) виконували електродами з  $R_{ел}=50$  мм з боку сталі 08Х18Т1 та 100...120 мм з боку сталі 09Г2

(2.0 мм). При роликовому зварюванні вимоги до режимів переважно такі ж, як і при точковому.

**Таблиця 2** – Режимы точкового зварювання досліджуваних марок сталей

Марка сталі	Товщина зразка, мм	Зусилля стиснення електродів, $F_{зв}$ , Н	Зварювальний струм, $I_{зв}$ , кА	Тривалість протікання струму, $\tau_{зв}$	Діаметр електрода, мм	Опір зварної точки на зріз, Н
12Х18Н10Т + 08Х18Т1	2+2	8000	11.6	0.3	10	18000
08Х18Т1 + 08Х18Т1	2+2	8000	11.6	0.3	10	16390
08Х18Т1 + 09Г2	2+2	9000	12.8	0.24	10	15000
08Х18Т1 + 09Г2	1+2	8000	9.2	0.22	10	7500
08Х18Т1 + 08Х18Т1	1+1	7000	6.5	0.18	10	6300
05Х18ФТч + 05Х18ФТч	0.8+0.8	6000	6.8	0.18	7	3150
05Х18ФТч + 05Х18ФТч	1+1	7000	6.5	0.18	10	6800
03Х18ТБч + 03Х18ТБч	0.8+0.8	6000	5.8	0.18	7.5	4600

У зв'язку з резервом металу в зоні зварювання до більшої температури, ніж при точковому зварюванні, при роликовому зварюванні застосовувалися дещо менші  $\tau_{зв}$  і  $F_{зв}$ . Внаслідок шунтування струму в сусідній точці при роликовому зварюванні  $I_{зв}$  вийшов на 30...50% вище, ніж при точковому. Отримані оптимальні експериментальні режими роликового зварювання (табл. 3).

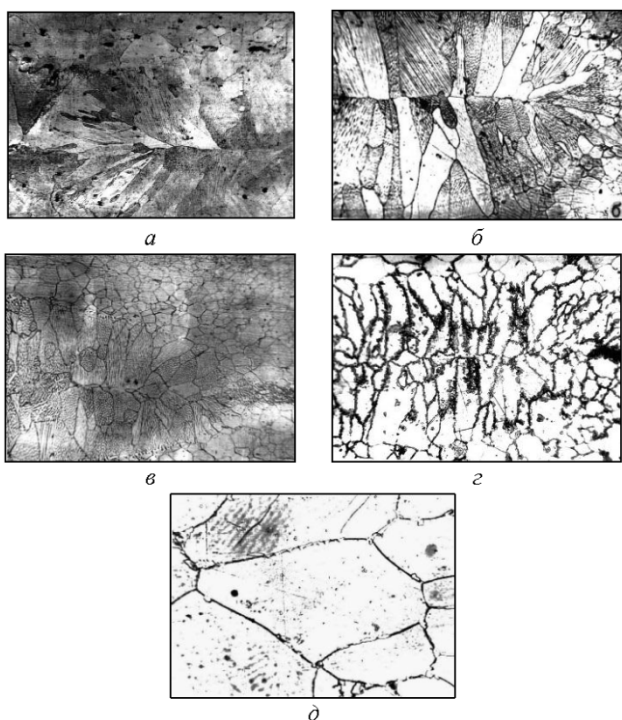
Дослідження структури зварних з'єднань показало, що рекомендовані режими зварювання забезпечують якісне проплавлення зварюваних зразків, симетричне розташування литої зони у разі однакової товщини листів і глибше її залягання у зразку більшої товщини при зварюванні сталевих різнотовщин.

Зварні з'єднання зразків сталей 08Х18Т1, 03Х18ТБч і 05Х18ФТч однакової товщини також мають задовільну мікроструктуру (рис. 1а, б, в). Найдрібніше зерно в ядрі має сталь 05Х18ФТч (рис. 1в).

Розмір зерна у зоні термічного впливу зберігається майже незмінним. До неї примикає зона ядра, а в центрі знаходяться порівняно дрібні рівноосні дендрити. У навколошовній зоні дещо збільшений розмір зерна та сліди мартенситу (рис. 1г, д). При збільшенні товщини зварюваних зразків до 2.0 мм осі дендритів більш грубі і легкощавлені, що пов'язано з більшою масою розплаву і у зв'язку з цим меншою інтенсивністю охолодження.

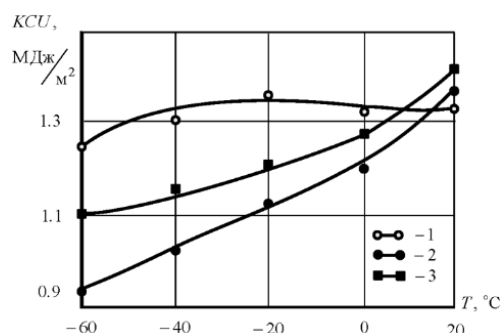
**Таблиця 3** – Оптимальні режими роликового зварювання досліджуваних марок корозійностійких сталей

№ п/п	Марка сталі	Товщина зразків, мм	Ширина робочої поверхні роликів, мм	Зварювальний струм, $I_{зв}$ , кА	Тривалість прогрівання струму, $t_{зв}$ , хв	Тривалість паузи, $t_{п}$ , хв	Зусилля стиснення роликів, $F_{зв}$ , Н	Швидкість зварювання, м/хв
1	12X18H10T + 08X18T1	2+2	8	13,6	0,14	0,14	7000	0,5
2	08X18T1 + 08X18T1	2+2	8	13,4	0,14	0,14	7000	0,5
3	08X18T1 + 08X18T1	1+1	5	10,5	0,10	0,16	4005	0,8
4	05X18ФТч + 05X18ФТч	1+1	5	10,5	0,10	0,16	4000	0,8
5	08X18T1 + 09Г2	2+2	8	11,2	0,14	0,16	6000	0,5
6	08X18T1 + 09Г2	1+2	$f_1=5$ $f_2=8$	10,8	0,10	0,10	4000	0,8
7	03X18ТБч + 03X18ТБч	1+1	5,5	11,0	0,10	0,10	3700	0,8
8	06X18ч + 06X18ч	1+1	5	10,8	0,10	0,10	4000	0,8



**Рисунок 1.** Мікроструктура зварних з'єднань хромистих корозійностійких сталей,  $\times 200$ :  
 а – сталь 08X18T1; б – сталь 03X18ТБч;  
 в – сталь 05X18ФТч; г – сталь 06X18ч;  
 д – навколошовна зона сталі 06X18ч

Дослідження холодостійкості проводили шляхом серійних випробувань на ударний згин зразків з надрізом, отриманих з листа сталей 09Г2, 05X18ФТч та 08X18T1 товщиною 2.0 мм при температурах від 20 °С до -60 °С. Випробовували також зварні зразки. З отриманих даних видно, що на сталі 05X18ФТч ударна в'язкість трохи вище, ніж сталі 08X18T1 і монотонно зменшується при зниженні температури випробування від 20 °С до -60 °С. Різкого переходу в крихкий стан не виявлено (рис. 2). Тому основний метал і його зварні з'єднання можуть використовуватися і при низьких температурах до -60° С, так як ударна в'язкість при цьому досягає 0.92 МДж/м<sup>2</sup>. Мікроструктура зварних точок 08X18T1 та 09Г2 дещо менш досконала. У центрі литого ядра навіть на оптимальних режимах зварювання є рихлоти у вигляді темних зигзагоподібних ліній, які при зварюванні сталей такого класу є допустимим явищем.



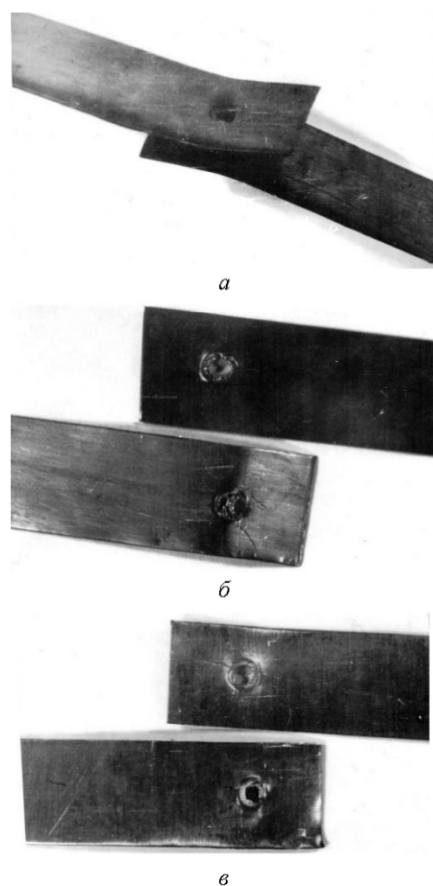
**Рисунок 2.** Залежність ударної в'язкості від температури випробувань ударних зразків досліджуваних сталей:  
 1 – 09Г2, 2 – 08X18T1, 3 – 05X18ФТч

Зварне з'єднання зразків сталі 06X18ч рівної товщини має гарну будову (рис. 1г). Однак стовпчасті зерна фериту в зоні литого ядра більші, ніж у сталі 05X18ФТч. За межами стовпчастих зерен спостерігали мартенситну складову до 5 %. Це пояснює більш крихкий характер руйнування зварної точки у сталі 06X18ч порівняно зі зразками сталі 05X18ФТ1 при випробуваннях на розрив (рис. 3).

З отриманих даних видно, що опір зварних точок на зріз, який проведено на розривних зразках за ГОСТ 6996-66, є досить високим. Водночас у з'єднаннях, отриманих на зразках більшої товщини, у зв'язку з великим прославленням опір зрізу більше, ніж у більш тонких зразках. Незважаючи на наявність до 5 % кількості мартенситної складової зварної точки, опір на зріз залишається досить високим (див. табл. 2).

Наведені у табл. 3 режими роликового зварювання розглянутих сталей забезпечують високу міцність і надійність зварних виробів. Встановлено, що при зварюванні сталі 08X18T1 з 09Г2 відбувається загартування ядра зварного з'єднання, що дещо знижує його міцність. У ряді випадків (при виготовленні труб) до зварних з'єднань висуваються високі вимоги щодо пластичності зварних з'єднань. З цією метою

були виготовлені розривні зразки за ГОСТ 6996-66, товщиною 0.8 мм, зі зварним швом, розташованим у напрямку застосування навантаження. При цьому досліджували також вплив зварювання на міцність та пластичність зварних швів зі сталей 08X18T1, 06X18ч, 05X18ФТч та 03X18ТБч (табл. 4).



**Рисунок 3.** Розривні зразки корозійностійких сталей після випробувань:  
 а, б – сталь 05X18ФТч; в – сталь 06X18ч

**Таблиця 4** – Порівняльні показники міцності та пластичності зварних з'єднань корозійностійких сталей

№ п/п	Марка сталі	Товщина заготовок, мм	Зусилля відриву, Р, Н	Відносне подовження, $\delta_s$ , %	Тип руйнації
1	08X18T1	1.0	17500	16	в'язко-крихка
2	08X18ч	1.0	16100	6.8	крихка
3	06X18ч	1.0	17500	12	крихка
4	05X18ФТч	1.0	18100	24	в'язка
5	03X18ТБч	1.0	17300	19	в'язка

Після шовного зварювання виявлено значну перевагу сталі 05X18ФТч перед рештою. Пластичність зварних з'єднань сталі, яка легована Ti, V, PЗМ у 1.5

рази більша, ніж сталі 08X18T1 та в 2 рази більша, ніж у сталі 06X18ч, структура якої містить значну кількість (до 5 %) мартенситної складової.

У цілому, проведеними дослідженнями показано, що зварні з'єднання із сталі 05X18ФТч перевищують за міцністю і пластичності аналогічні показники зварних з'єднань інших сталей. Незважаючи на це, всі досліджувані сталі можливо використовувати для виготовлення зварних конструкцій та виробів, крім сталей з дуплексною структурою 06X18ч та 08X18ч, яким, як правило, бажана термообробка зварних швів.

### Висновки

Зварні з'єднання за структурним станом та механічними властивостями як однорідних, так і різнорідних хімічних складів досліджуваних сталей відповідають вимогам, які висуваються до зварних з'єднань спеціальних сталей різного функціонального призначення.

### Список літератури

- Mishchenko V. Metallurgical aspects of the production of chromium-nickel steels with low carbon contents [Text] / V. Mishchenko // Foundry Journal of Polish Foundrymen's Technicsl Association. – 2003. – No 3. – P. 326–329.
- Desu R.K. Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel 304L and 316L at elevated temperatures [Text] / R.K. Desu, N.H. Krishnamuthy, A. Balu, A.K. Gupta, S.K. Singh // Materials Research and Technology. – 2016. – No S(1). – P. 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.04.001>
- Wärner H. Thermomechanical fatigue behaviour of aged heat resistant austenitic alloys [Text] / H. Wärner, M. Calmunger, G. Chai, S. Johansson, J. Moverare // Fatigue. – 2019. No 127. – P. 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.012>
- Drápala J. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of SUS 316L alloy (Conference Paper) [Text] / J. Drápala, G. Kostiuková, M. Losertoá // METAL 2018 – 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. – 2018. – P. 1527-1532.
- Fuwa A. Producing titanium by reducing TiCl<sub>2</sub> – MgCl<sub>2</sub> mixed salt with magnesium in the molten state [Текст] / Akio Fuwa, Satoru Takaya // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2005. – Vol. 57. – No 10. – P. 56–60. [doi.org/10.1007/s11837-005-0153-7](https://doi.org/10.1007/s11837-005-0153-7)
- Пат. 100650 Україна. МПК С 22 С 38/02. Жароміцна корозійностійка сталь / В. Г. Міщенко, Н. О. Євсєєва, О. П. Лютий [та ін.] – № 100650; заявл. 17.02.12; опубл. 10.01.13, Бюл. № 1. – 4 с.
- Stainless steel grades [Електронний ресурс] // Outokumpu products. – Режим доступу: <https://www.outokumpu.com/products>
- Нестеренко С. Корозійна тривкість нових аустенітно-феритних сталей в агресивних середовищах коксохімічних заводів [Text] / С. Нестеренко // XV

Міжнародна конференція «Проблеми корозії та проти-корозійного захисту конструкційних матеріалів». Львів. – 2020. – С. 337–341.

9. Шелягін В.Д. Розробка дистанційно керовано-го обладнання та технології лазерного зварювання для ремонту і відновлення працездатності парогенераторів АЕС [Text] / В.Д. Шелягін, А.В. Бернацький, О.В. Сіора, В.А. Курило, О.М. Сучек // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 12. – С. 30–36. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.04>

10. Isabela A. Ligabo. Microstructure and Corrosion Behavior of AISI 316 Steel Layers Deposited on AISI 347 Steel Substrate by Laser Metal Deposition [Text] / A. Ligabo Isabela, Braga Vagner, C. A. Ferreira Caroline, H. M. Siqueira Rafael, C. Lourenço Julio, J. Abdalla Antonio and S. F. Lima Milton // Metals. – 2022. – No 12(12). – 2161. <https://doi.org/10.3390/met12122161>

11. Mishchenko V. Determining the thermoplastic deformation mechanism of titanium reduction reactors and recommendations to increase the reactor service life [Text] / V. Mishchenko, S. Loskutov, A. Kripak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – No 5 (7-119). – P. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265577>

12. Міщенко В. Г. Створення спеціального кон-струкційного матеріалу методом прокатування асимет-

ричних пакетів для виробів подвійного призначення [Text] / В. Г. Міщенко, С. Б. Беліков, О. В. Клімов, А. О. Кріпак, Д. М. Тонконог, В. В. Корнієнко, А. О. Харченко // New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. – 2023. – № 2. – С. 32–37. DOI: 10.15588/1607-6885-2023-2-5

13. Dhivyasri G. Optimization of AISI 316 materials mechanical properties for CMT application [Text] / G. Dhivyasri, R. Sudha // Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – No 9(11). – P. 1269–1279.

14. Roussel M. Influence of solidification induced composition gradients on carbide precipitation in FeNiCr heat resistant steels [Text] / M. Roussel, X. Sauvage, M. Perez, D. Magné, A. Huet, A. Steckmeyer, M. Vermont, T. Chaise, M. Couvrat // Materialia. – 2018. – No 4, P. 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.10.010>

15. David A. Collins. A comprehensive study of the effects of long-term thermal aging on the fracture resistance of cast austenitic stainless steels [Text] / A. Collins David, L. Carter Emily, G. Lach Timothy, Sang Byun Thak // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – No 54, Is. 2. – P. 709–731. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.022>

Одержано 26.12.2024

## INVESTIGATION OF ELECTRIC RESISTANCE WELDING OF SPECIAL STEELS OF DIFFERENT THICKNESSES

Valeriy Mishchenko	Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Integrated Welding Technologies and Structural Modeling, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: mishchen4@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0003-0992-478X
Sergiy Byelikov	Dr. Sc., Professor of the Department of Transport Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: belikov@zp.edu.ua</i> , ORCID: 0000-0002-9510-8190
Evelina Bazhmina	Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Integrated Welding Technologies and Structural Modeling, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: evelinabazhmina@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0003-4750-8170
Volodymyr Kornienko	Postgraduate student, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: vkornienko268@gmail.com</i> , ORCID: 0009-0007-2193-3204
Dmytro Mishchenko	Postgraduate student, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: dvmis@ukr.net</i>
Andriy Kharchenko	Postgraduate student, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: harchenko21@gmail.com</i>

**Purpose.** To evaluate the feasibility of electric resistance welding for corrosion-resistant steels with different phase compositions and thicknesses.

**Research methods.** To investigate the characteristics of electric resistance welding for corrosion-resistant sheet steels with different structural classes, a comparative analysis of spot and roller welding methods was conducted. The analysis considered factors such as steel thickness, the combination of steel grades in the welded joint, and the available welding equipment. Experimental methods were employed to determine optimal welding parameters, including welding current ( $T_w$ ), electrode compression force ( $F_w$ ), and welding current pulse duration ( $\tau_w$ ). The strength of the welds was assessed using standard testing methods.

**Results.** The study substantiates the selection of welding parameters for corrosion-resistant steels with different phase compositions, considering steel thickness and grade combinations. The steels studied – martensitic-ferritic class (06X18Ч, 08X18Ч) and ferritic class (03X18ТБЧГР, 05X18ТФЧ, 08X18Т1) – are suitable for electric resistance welding without significant restrictions.

**Scientific novelty.** This study identifies the effects of welding parameters and the thicknesses of corrosion-resistant steel sheets with different phase compositions on the structure and mechanical properties of welds, both for homogeneous and dissimilar steel grades.

**Practical value.** The findings demonstrate that the structure and mechanical properties of welds made from both homogeneous and heterogeneous steel compositions meet the functional requirements for various applications.

**Key words:** welded joints, ferrite structure, martensitic-ferritic structure, technological and mechanical properties, corrosion-resistant steels.

## References

1. Mishchenko V. (2003). Metallurgical aspects of the production of chromium-nickel steels with low carbon contents. Foundry Journal of Polish Foundrymen's Technicl Association, 3, 326–329.
2. Desu R.K., Krishnamuthy N.H., Balu A., Gupta A.K., Singh S.K. (2016). Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel 304L and 316L at elevated temperatures. Materials Research and Technology, S(1), 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.04.001>
3. Wärner H., Calmunger M., Chai G., Johansson S., Moverare J. (2019). Thermomechanical fatigue behaviour of aged heat resistant austenitic alloys. Fatigue, 127, 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.012>
4. Drápala J., Kostiuková G., Losertoá M. (2018). Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of SUS 316L alloy (Conference Paper). METAL 2018 – 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings, 1527–1532.
5. Akio Fuwa, Satoru Takaya (2005). Producing titanium by reducing TiCl<sub>2</sub> – MgCl<sub>2</sub> mixed salt with magnesium in the molten state. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 57, 10, 56–60.
6. Patent 100650 Ukraine. MPK S 22 S 38/02. Zharomitsna koroziiostiika stal [Zharomitsynaya corrosion-resistant steel] / V.H. Mishchenko, N.O. Yevsieieva, O.P. Liutyi [et al.] – № 100650; zaiavl. 17.02.12; opubl. 10.01.13, 1, 4.
7. Stainless steel grades. – Available at: <https://www.outokumpu.com/products>
8. Nesterenko S. (2020). Koroziiina tryvkist novykh austenitno-ferynykh stalei v ahresyvykh seredovyshchakh koksokhimichnykh zavodiv. XV Mizhnarodna konferentsiia «Problemy korozii ta protykoroziiinoho zakhystu konstruktsiinykh materialiv». Lviv, 337–341.
9. Sheliakhin V.D., Bernatskyi A.V., Siora O.V., Kurylo V.A., Suchek O.M. (2020). Rozrobka dystantsiino kerovanoho obladnannia ta tekhnolo-hii lazernoho zvariuvannia dlia remontu i vidnovlennia pratsezdatnosti parohene-ratoriv AES. Avtomatychnе zvariuvannia, 12, 30–36. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.04>
10. Isabela A. Ligabo, Vagner Braga, Caroline C. A. Ferreira, Rafael H. M. Siqueira, Julio C. Lourenço, Antonio J. Abdalla and Milton S. F. Lima (2022). Microstructure and Corrosion Behavior of AISI 316 Steel Layers Deposited on AISI 347 Steel Substrate by Laser Metal Deposition. Metals, 12(12), 2161. <https://doi.org/10.3390/met12122161>
11. Mishchenko V., Loskutov S., Kripak A. (2022). Determining the thermoplastic deformation mechanism of titanium reduction reactors and recommendations to increase the reactor service life. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (7-119), 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265577>
12. Mishchenko V. G., Bielikov S. B., Klimov O. V., Kripak A. O., Tonko-noh D. M., Korniienko V. V., Kharchenko A. O. (2023). Stvorennia spetsialnogo konstruktsiinoho materialu meto-dom prokatuvannia asymetrychnykh paketiv dlia vyrobiv podviinoho pryznachennia. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 32–37. DOI: 10.15588/1607-6885-2023-2-5
13. Dhivyasri G., Sudha R. (2018). Optimization of AISI 316 materials mechanical properties for CMT application. Mechanical Engineering and Technology, 9(11), 1269–1279.
14. Roussel M., Sauvage X., Perez M., Magné D., Hauet A., Steckmeyer A., Vermont M., Chaise T., Couvrat M. (2018). Influence of solidification induced composition gradients on carbide precipitation in FeNiCr heat resistant steels. Materialia, 4, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.10.010>
15. David A. Collins., Emily L. Carter, Timothy G. Lach, Thak Sang Byun (2022). A comprehensive study of the effects of long-term thermal aging on the fracture resistance of cast austenitic stainless steels. Nuclear Engineering and Technology, 54(2), 709–731. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.022>