

## Машинобудування і зварювальне виробництво

composition of the ingot, wt. % Fe – 0.05%; C – 0.030%; Si – 0.06%; O – 0.031%; N – 0.058%; H – 0.0012%; Ti is the base. Compared to VT1-0 titanium (GOST 19807-91), the oxygen and nitrogen content in the electroslag ingot was 1.51 and 1.45 times higher, respectively. Samples were made from the obtained ingot for studies of macro-microstructure and mechanical properties ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$ , KCU) in the cast state and after hot forging with deformation coefficients  $\varepsilon = 40\%$  and  $\varepsilon = 90\%$ .

The macrostructure of ingots of secondary cast titanium is coarse-crystalline, dense, and homogeneous. The size of the cast grain corresponds to 9–10 points. The microstructure is typical for  $\alpha$ -titanium alloys and consists of  $\alpha$ -phase plates, which are assembled into bundles with a thickness of 15–20  $\mu\text{m}$  and a length of 300–500  $\mu\text{m}$ . With such structural components, the plasticity characteristics of cast secondary titanium turned out to be not very high ( $\delta = 11.5\%$ ;  $\Psi = 12.5\%$ ; KCU = 0.28  $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ ), and the increase in strength ( $\sigma_B = 560 \text{ MPa}$  and  $\sigma_T = 505 \text{ MPa}$ ) can be explained by the influence of oxygen and nitrogen.

During hot forging of experimental samples, it was established that secondary titanium is well amenable to pressure treatment, which also significantly grinds the structure. Thus, at deformation with a coefficient of  $\varepsilon = 40\%$ , a grain score of 5–6 was obtained, and with  $\varepsilon = 90\%$ , a score of 3–4 was obtained. The characteristics of plasticity are  $\delta = 20\%$ ;  $\psi = 31.5\%$ ; KCU = 0.45  $\text{kgf}\cdot\text{m}/(\text{cm})^2$  and  $\delta = 24.5\%$ ;  $\psi = 47.5\%$ ; KCU = 0.58  $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$  respectively. The strength of secondary hot-forged electroslag titanium is affected by the degree of deformation and the increased content of oxygen and nitrogen. At  $\varepsilon = 40\%$   $\sigma_B = 625 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_T = 540 \text{ MPa}$ , and at  $\varepsilon = 90\%$   $\sigma_B = 700 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_T = 580 \text{ MPa}$ .

**Keywords:** secondary titanium, electroslag technology, hot forging, microstructure, macrostructure, mechanical properties, grain size.

Стаття надійшла 06.10.2024р.

УДК 674.164.02-.621.791

doi.org/10.31498/2522-9990282024318363

Савонов Ю.М., Капустян О.Є., Паракневич Є.М., Єршов А.В.

### ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ СТАЛЕЙ

Великою проблемою залишається отримання зварних з'єднань з нержавіючих сталей, які експлуатуються в агресивних середовищах різноманітних виробництв, з високими характеристиками і тривалим терміном роботи. Вимоги до зварних з'єднань: корозійна стійкість і достатні механічні показники. Проблема полягає в тому, що експлуатація зварного обладнання в агресивних середовищах викликає, по-перше: вибіркоче руйнування наплавленого металу зварних швів, а по-друге: вибіркоче розчинення однієї з фаз в структурі металу, так зване, структурно-вибіркоче руйнування. Відомо, що властивості наплавленого металу зварних швів залежать від кількості легувальних елементів. Ця необхідна кількість визначає структурний стан та механічні характеристики наплавленого металу. Існує велика кількість електродних матеріалів для виготовлення зварного обладнання з нержавіючих сталей, наведені довідкові дані їх механічних властивостей, але дані про корозійну поведінку цих зварних з'єднань або недостатні, або зовсім відсутні. Метою цієї роботи було зробити порівняльну оцінку основних електродних матеріалів, які можуть бути використані при виготовленні зварного технологічного обладнання, яке експлуатується в лужних середовищах. Для цього досліджували вплив хімічного складу на структурний стан та корозійну стійкість наплавленого металу зварних з'єднань. На першому етапі визначали

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*вплив різних хімічних елементів, а також їх кількість у складі зварювальних матеріалів на корозійну поведінку і структурний стан наплавленого металу. Показано, що нікель, хром і ніобій підвищують корозійну стійкість. Вплив молібдену однозначно не виявлено. При своїй здатності зменшувати струм корозії він сприяє підвищенню швидкості корозії. Ці дослідження дозволили визначити вміст легувальних елементів для забезпечення високих показників опору корозії. Корозія хромонікелевого металу в лужних середовищах має структурно-виборчий характер по  $\delta$ -фериту. Ферит в нержавіючих сталях збагачений хромом, але містить невелику кількість нікелю. Тому ферит в електрохімічній парі аустеніт-ферит виступає в якості анода і підлягає переважному руйнуванню в лужних середовищах. Електрохімічні дослідження підтвердили зроблені висновки. Для надання високого опору корозійному руйнуванню наплавлений метал зварних з'єднань повинен містити певну кількість нікелю, хрому та ніобію (як ефективного утворювача карбідів і, тим самим, запобігання міжкристалітній корозії). Наведено рекомендації щодо використання марок електродів для обладнання з нержавіючих сталей при їх експлуатації, як в лужних середовищах невеликих концентрацій, так і в більш концентрованих.*

**Ключові слова:** лужне середовище, корозійна стійкість, зварне з'єднання, наплавлений метал.

**Постановка проблеми.** Широкого поширення набули нержавіючі хромонікелеві сталі, що застосовуються, в основному, при виготовленні об'єктів хімічного машинобудування, завдяки стійкості проти атмосферної, рідинної та газової корозії, жароміцності, а також високих та стабільних показників міцності та пластичних властивостей у широкому діапазоні температур. При виробництві конструкцій із жароміцних та кислотостійких аустенітних хромонікелевих сталей (08X18H10T, 10X18H10T, 12X18H10T тощо) основним видом зварювання є дугове зварювання плавленням. Устаткування глиноземного і гідролізного способу виробництва (трубопроводи, циклони, пропарювальні камери й ін.), що виготовляється зі сталі 12X18H10T, зазнає інтенсивних руйнувань по зварних швах. З аналізу характеру й причин руйнування устаткування випливає, що руйнування – наслідок корозійних процесів у лужних технологічних середовищах. Це може спричинити значне зниження працездатності зварних конструкцій. У зв'язку з цим виникла потреба зміни технології зварювання таких з'єднань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як відомо, при зварюванні трубних систем, які виготовлені з аустенітних сталей типу 12X18H10T, зазвичай застосовуються присадні матеріали, які забезпечують високонікелевий наплавлений аустенітний метал. Для зварювання аустенітних хромонікелевих сталей та їх сплавів покритими електродами застосовують такі вітчизняні [1] марки електродів: ЦЛ-11, ЦЛ-11Р, ЦТ-15, ЕА-395/9, ЭА-400/1, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ОЗЛ-40, ОЗЛ-41 і багато інших [2]. Вони мають переважно основний вид покриття, класифікаційний тип 04X20H9, 07X20H9, 02X21H10Г2, 06X22H9, 08X16H8M2, 08X17H8M2, 06X19H11Г2M2, 02X20H14Г2M2, 02X19H9Б, 08X19H10Г2Б, 08X20H9Г2Б, 08X19H10Г2МБ, 09X19H10Г2M2Б, 08X19H9Ф2С2, 08X19H9Ф2Г2СМ, 09X16H8Г3М3Ф, 07X19H11M3Г2Ф, 08X24H12Г3СТ, 10X25H13Г2, 12X24H14С2, 10X25H13Г2Б, 03X15H9АГ4, 10X20H9Г6С, 28X24H16Г6, 02X19H15Г4АМ3В2, 02X19H18Г5АМ3, 11X15H25M6АГ2, 09X15H25M6Г2Ф [3].

Також широко застосовують електроди зарубіжного виробництва [4,5]. Так, широку номенклатуру електродів для зварювання нержавіючих та жаростійких сталей випускають, наприклад, фірми ESAB (OK61.25, OK61.30, OK61.35, OK61.85, OK63.34 [6]), Böhler-Uddeholm (BOEHLER FOX EAS 2-A (AWS A5.4: E308L-17), BOEHLER Q E 308L-17 (AWS A5.4: E308L-17), BOEHLER FOX EAS 4M-A (AWS A5.4: E316L-17), BOEHLER AWS E316L-17 (AWS A5.4: E316L-17), Thermanit 19/15 H (AWS A5.4: E316LMn-15), BOEHLER FOX SAS 2-A (AWS

## Машинобудування і зварювальне виробництво

A5.4: E347-17), BOEHLER FOX SAS 4-A, Thermanit 25/22 H, BOEHLER FOX EASN 25M, BOEHLER FOX CN 20/25 M-A (AWS A5.4: E385-17), , BOEHLER FOX FFB (AWS A5.4: E310-15 (mod.)) [7].

Є відомості про механічні властивості наплавленого металу цими електродами; наведено структуру, хімічний склад, механічні та корозійні властивості зварних швів та з'єднань; існують способи зменшення та усунення напружень та деформацій, що виникають при зварюванні [8]. Однак, користуватися такими даними для порівняльної оцінки при виготовленні і розробці зварних конструкцій, що працюють у лужних середовищах, досить важко через відсутність показників корозійної стійкості наплавленого металу і конкретних рекомендацій зі зварювання.

**Мета дослідження.** Аналіз впливу хімічного складу і структури на корозійну стійкість наплавленого металу і вибір присадних матеріалів для зварювання устаткування, що експлуатується в лужних середовищах.

**Основний матеріал дослідження.** Дослідження фізико-хімічних властивостей металу виконували на зразках багатошарових наплавлень і зварних з'єднань сталі типу 12X18H10T електродами різних марок (табл. 1). Вміст δ-фериту розраховували аналітично і визначали експериментально феритометром ФМ-10і.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості наплавленого металу

№	Марка електроду	Вміст, %									Механічні властивості			Швидкість корозії, г/м <sup>2</sup> ×год	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	фериту	σ <sub>B</sub>	σ <sub>T</sub> , МПа	KCV <sub>K</sub> , Дж/м <sup>2</sup>	30 % NaOH	55 % NaOH
1	ОЗЛ-8	0,07	0,60	1,40	20,0	8,9	-	-	-	7	598	353	1177	0,6921	0,9937
2	ОЗЛ-6	0,09	0,55	1,25	25,6	12,5	-	-	-	4	559	343	1079	0,5972	0,8862
3	ОЗЛ-9	0,20	0,50	6,0	24,5	16,9	-	-	-	-	598	372	1373	0,0175	0,0835
4	ЗЮ-8	0,07	0,55	1,89	23,8	12,6	-	-	-	3,5	549	333	981	0,6007	0,8894
5	ЦЛ-11	0,10	1,00	1,55	19,8	9,5	-	0,98	-	6	608	353	990	0,590	0,6249
6	ЗЮ-3	0,09	0,65	1,67	18,5	10,0	-	0,90	-	5	598	343	980	0,420	0,7877
7	ЦЛ-9	0,11	0,85	1,50	21,0	11,2	-	0,80	-	4	677	372	981	0,1270	0,5971
8	ЦТ-15	0,09	0,35	1,90	19,0	9,4	-	0,80	-	4	589	314	971	0,4510	0,7112
9	АНВ-13	0,03	0,12	0,65	18,4	10,3	-	1,00	-	3,5	578	305	981	0,840	1,1218
10	АНВ-23	0,08	0,80	1,45	18,7	9,1	-	0,36	-	3,5	579	314	981	1,8700	1,3773
11	ЦЛ-4	0,07	0,50	1,95	18,5	9,2	2,3	-	-	7	589	334	981	1,8011	2,3672
12	НИАТ-1	0,09	0,72	1,25	18,3	8,7	2,1	-	-	5	579	343	1079	0,7812	1,5243
13	ЕА-395/9	0,09	0,69	1,70	15,5	25,0	5,8	-	-	-	608	462	1177	0,0290	0,0438
14	АНВ-17	0,22	0,35	6,50	24,5	16,0	2,1	-	-	-	589	353	1275	0,0480	0,1615
15	ЕА-400/10У	0,07	0,48	2,10	18,0	10,5	2,5	-	0,52	6	550	363	1079	0,6900	3,2094
16	ЕА-981/15	0,08	0,50	2,00	15,3	25,0	5,8	-	1,25	-	677	490	1079	0,0440	0,0507
17	НЖ-13	0,06	0,60	1,3	18,0	10,5	2,2	0,65	-	6	608	470	981	0,2930	3,2110
18	НИИ-48	0,18	0,38	5,60	19,8	10,2	0,1	-	-	-	550	372	981	0,2511	0,9596
19	12X18H10T	0,11	0,80	2,00	18,5	10,0	-	0,7	-	2	490	210	981	0,4807	1,3775



## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$C_{re} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \% Si + 1,5 \% V + 0,8 \% W + 0,5 \% Nb + 4 \% Ti + 3,5 \% Al \quad (2)$$

При виборі зварювальних матеріалів слід враховувати можливість розвитку у зварних з'єднаннях структурної, хімічної і механічної неоднорідностей, що значно знижує працездатність і надійність зварних конструкцій. Результати випробувань по визначенню механічних властивостей наплавленого металу показали, що характеристики міцності його після зварювання перевищують рівень показників основного металу типу 12X18H10T. Вміст хрому, нікелю, молібдену і ніобію збільшує властивості міцності, про що свідчить співставлення даних, які отримані при наплавленні електродами ОЗЛ-9, ЦЛ-9, АНВ-17, ЕА-395/9 і ін. Межі текучості наплавленого металу перебувають на високому рівні, що обумовлене легуванням хромонікелевого металу елементами, які зміцнюють твердий розчин (Мо, Nb і V). Ударна в'язкість металу, наплавленого електродами ЗІО-3 і ЦТ-15, на рівні з показниками основного металу. Електроди ОЗЛ-9, АНВ-17, ОЗЛ-8, ЕА-395/9 забезпечили метал зварних швів з пластичністю, яка на 22-40 % більша, ніж у основного металу.

Результати корозійних випробувань показали, що зміна вмісту легувальних елементів, вуглецю й розкислювачів значно впливає на корозійну стійкість металу зварних швів (див. табл. 1). Так, зі зміною вмісту хрому від 20 % до 25,6 % і нікелю від 10 % до 12,5 % корозійна стійкість металу збільшується (зразки № 1 і 2, див табл. 1). При вмісті нікелю 16,9 % швидкість корозії знижується до 0,0175 г/м<sup>2</sup>• год, проти 0,4200 г/м<sup>2</sup>• год (в 24 рази) для вмісту нікелю 10 % (зразки № 3 та 6 відповідно, див табл. 1).

Легування хромонікелевого металу ніобієм позитивно впливає на корозійну стійкість. Так, наплавлений метал типу Х19Н10Б має швидкість корозії незначно меншу, в порівнянні з основним металом. Виключення становлять зразки, які наплавлені електродами АНВ-13 і АНВ-23. Наплавлений метал з молібденом – Х18Н9М2 (зразок № 11) має низьку корозійну стійкість. Марганець незначно підвищує корозійну стійкість, а вплив кремнію в лужних середовищах не визначено.

При дослідженні електрохімічних характеристик зварних з'єднань (табл. 2) встановлено ослаблення активного розчинення і зменшення критичної щільності струму в лужних розчинах зі зростанням вмісту хрому. Крім того, підвищення корозійної стійкості хромонікелевого металу зв'язане зі зниженням струму корозії. Збільшення вмісту нікелю поліпшує пасивувальну здатність наплавленого металу, тому що знижуються критична щільність струму пасивації і струм корозії системи “шов – основний метал”.

Таблиця 2 – Електрохімічні характеристики зварних з'єднань

№ зразка	Тип наплавленого металу	Параметр корозійних процесів				струм корозії, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
		$I_{кр}, \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$I_{п.п}, \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$E_{кр}, \text{В}$	$E_{п.п}, \text{В}$	
19	12X18H10T	1,06	0,12	-0,065	+0,04	6,8
1	07X20H10	1,70	0,22	-0,105	+ 0,14	6,4
3	20X25H17	0,88	0,14	-0,045	-0,01	6,3
11	07X18H10M2	0,96	0,12	-0,020	+0,04	6,0
5	10X19H10Б	1,27	0,12	-0,060	-0,01	5,4
17	06X18H10Б	1,22	0,13	-0,070	-0,01	4,2

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Молибден звужує область активного розчинення і незначно поліпшує його пасивувальну здатність. Однак, струм корозії, при додатковому легуванні зварного шва молибденом, перевищує такий для деяких інших типів наплавленого металу (зразки № 11, № 5, № 17, див. табл. 2). Вочевидь, молибден, при своїй здатності впливати на пасивувальні характеристики, все ж-таки, активно розчиняється і сприяє збільшенню швидкості корозії. Ніобій утруднює пасивувальну здатність хромонікелевого металу, збільшуючи вміст  $\delta$ -фериту. Відзначається зменшення струму корозії системи шов – основний метал.

Корозія хромонікелевого металу в лужних середовищах має структурно-виборчий характер по  $\delta$ -фериту. Металографічні дослідження показали переважне травлення цієї фази в лужних середовищах. Результати випробувань за корозійною стійкістю наплавленого металу підтвердили залежність швидкості корозії металу від вмісту  $\delta$ -фериту у зварному шві (див. табл. 1). Найбільш високу корозійну стійкість мають зварні шви з однофазною аустенітною структурою (електроди ОЗЛ-9, ЕА-395/9, ЕА-981/15, АНВ-17). З появою другої структурної складової ( $\delta$ -фериту), швидкість корозії наплавленого металу зростає (електроди ОЗЛ-8, ЗІО-8, АНВ-13, ЦЛ-9 і ін.). Однак, між швидкістю корозії і вмістом  $\delta$ -фериту немає однозначної залежності

### ВИСНОВКИ

Проведено вибір присадних матеріалів для зварювання устаткування, що експлуатується в лужних середовищах та комплекс експериментів з дослідження впливу хімічного складу і структури на корозійну стійкість наплавленого металу.

На основі аналізу корозійної поведінки та електрохімічних досліджень металу зварних швів на нержавіючих сталях можна зробити висновок, що вплив легувальних елементів проявляється у формуванні структури, зміні електрохімічної і корозійної поведінки наплавленого металу.

Порівняльна оцінка електродних матеріалів дозволяє рекомендувати наступні зварювальні матеріали при розробці технологічних процесів виготовлення конструкцій зі сталі 12Х18Н10Т: ЦЛ-9, ЦЛ-4, ЗІО-3 (лужні середовища невеликих концентрацій). Для устаткування, що експлуатується в більш агресивних технологічних середовищах, – електроди ЕА-395/9, ЕА-981/15, ОЗЛ-9, ОЗЛ-6.

### Список використаних джерел

1. ДСТУ EN ISO 3581:2019 Матеріали зварювальні. Електроди з покриттям для ручного дугового зварювання неіржавких та жароміцних сталей. Класифікація
2. <https://weldmarket.online/uk/markuvannya-zvaryvalnyh-elektrodiv/>
3. *Петров Г.Л.* Сварочные материалы / *Г.Л. Петров* // Учебное пособие для вузов. - Москва: Машиностроение, 1972. - 280 с.
4. AWS A5.4/A5.4M Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding STANDARD by American Welding Society , 01/01/2012 56p
5. DIN 8556-1:1986-05 Filler metals for welding stainless and heat-resisting steels; designation, technical delivery conditions German 10p
6. <https://nisa-svarka.com.ua/ua/g2777339-elektrody-dlya-nerzhaveyuschih>
7. <http://interchim-btw.com.ua>
8. *Каховский Н.И.* Электродуговая сварка сталей / *Н.И. Каховский, В.Г. Фартушный, К.А. Ющенко* // Киев: Наукова думка, 1975. — 480 с.
9. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2-х т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Алешина,

Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – 624 с.

10. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. 2- изд. Доп. И испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. под общ. Ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

**Savonov Y.M., Kapustian O.Ye., Parahnevich E.M., Ershov A.V.**

### COMPARATIVE EVALUATION OF ELECTRODE MATERIALS FOR WELDING CHROME-NICKEL STEEL

*A big problem remains the production of welded joints made of stainless steels, which are operated in aggressive environments of various industries, with high characteristics and a long durability. Requirements for welded joints: corrosion resistance and sufficient mechanical parameters. The question at issue is that operation of welding facilities in aggressive environments causes, firstly: selective destruction of deposited weld metals, and secondly: selective dissolution of one of the phases in the metal structure, the so-called structural selective destruction.*

*It's well known, that the properties of deposited weld metals depend on the amount of alloying elements. This required amount determines structural condition and mechanical properties of the deposited metal. There is a big variety of electrode materials for fabrication of welded equipment from stainless steels, specified their reference mechanical parameters, but the data about the corrosion resistance of this welded joints are either deficient or completely absent.*

*The goal of present research was to make a comparison of main electrode materials that can be used for fabrication of welded equipment that is operating in alkaline environment.*

*For this purpose, the effect of chemical composition on the structural state and corrosion resistance of the deposited metal of welded joints was investigated. At the first stage, the effect of various chemical elements on the corrosion behavior and structural state of the deposited metal, as well as their amount in the composition of welding materials, was quantified.*

*Nickel, chromium and niobium have been shown to increase corrosion resistance. The effect of molybdenum was not clearly detected. With its ability to reduce the corrosion current, it helps to increase the rate of corrosion. These researches made it possible to quantify the content of alloying elements to ensure high corrosion resistance.*

*Corrosion of nickel-chromium steel in alkaline environment has a structural selective nature for delta ferrite. Ferrite in stainless steels is enriched with chrome, but contains a small quantity of nickel. That's why in electrochemical couple of austenite-ferrite the last one stands as anode and is subject to preferential destruction in alkaline environments. The electrochemical researches confirmed the drawn conclusions.*

*To attain high corrosion resistance, the deposited metal of welded joints may contain certain quantity of nickel, chrome, and niobium (as an effective former of carbides and, thereby, preventer of weld decay).*

*The given recommendations of electrode grades for fabrication of welded equipment from stainless steels during their operation in alkaline environments, as low-, as well higher concentrated.*

**Keywords:** *alkaline environment, corrosion resistance, welded joint, deposited metal.*

*Стаття надійшла 06.10.2024р.*