

УДК 622.276.06

DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14487

В. Д. МАКАРЕНКО¹, Т. П. ФЕДОРІНА², І. М. ІКАЛЬЧИК², О. О. ПЕТРЕНКО¹,
Л. А. ТАРАБОРКІН³

¹Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

²ВП НУБіПУ «Ніжинський агротехнічний Інститут»

³Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ, ЛЕГОВАНИХ НІКЕЛЕМ

Встановлено, що найбільш високі і стабільні значення ударної в'язкості (59-70 Дж/см² при $t = -60$ °С) і характеристик опору розвитку тріщин ($K_{Ic} = 76,6$ МПа-м^{1/2} і $\delta_c = 0,21-0,30$ мм при $t = -70$ °С) металу шва холодостійких сталей досягаються при концентрації нікеля в ньому від 1,6 до 2,2 %, яка реалізується введенням в електродне покриття нікелевого порошку в кількості 3-4 %. Покращення механічних властивостей, зокрема, ударної в'язкості і параметрів в'язкості руйнування металу шва, легovanого нікелем, можна пояснити його сприятливим впливом на структурну й хімічну неоднорідність наплавленого металу. Для оцінки ступеню цього впливу стосовно електродів з основним покриттям виконали додаткові дослідження за допомогою сучасних методів металографічного аналізу. Визначено оптимальний хімічний склад наплавленого металу, що забезпечує отримання дрібнозернистої структури, яка вміщує незначну кількість неметалевих включень глобулярної форми (у %): $C < 0,10$; $0,20-0,40$ Si; $0,8-1,20$ Mn; $1,6-2,2$ Ni; S, P < 0,025. Цей склад реалізовано оптимальним вмістом і співвідношенням феросплавів у електродному покритті: 5 % FeMn, 5-8 % FeSi, 7-10 % FeTi; FeTi : FeSi : FeMn = 2 : 1,5 : 1.

Ключові слова: нікель, зварювання, напруження, структура, міцність.

Постановка проблематики і аналіз останніх публікацій. Аналіз літературних даних [1-26] дозволив встановити, що високі й стабільні значення ударної в'язкості металу швів на холодостійких сталях найбільшою мірою забезпечуються в разі розкиснення та легування металу зварного шва марганцем, кремнієм і нікелем. Як випливає з робіт [3-6], при цьому вміст кремнію і марганцю в наплавленому металі має перебувати в наступних межах: від 0,10 до 0,60 % Si і від 0,60 до 1,50 % Mn.

Легування металу шва нікелем можна здійснювати як через покриття, так і через електродний стержень. Відомі електроди, покриття яких нанесено на легований нікелем зварочний дріт, наприклад, Fortrex 8018С (фірма «Woc Murex», Великобританія), ВП-4, ВП-6 і др. Хоча легування через дріт з металургійної точки зору краще (більш високий коефіцієнт переходу легуючих елементів в зварювальну ванну), однак унаслідок високої трудомісткості виготовлення спеціально легovanого зварювального дроту, а також схильності легovanих стержней до перегріву при зварюванні через підвищений питомий електричний опір (домішка 1-1,2%Ni у зварювальний дріт Св-08Г2С збільшує його питомий електричний опір у 1,7-1,8 рази), нами був вибраний інший шлях: легування металу шва через електродне покриття. Для вирішення подібних проблем потрібно було провести додаткові експериментальні дослідження.

Мета досліджень – дослідження впливу нікелю на механічні властивості і параметри тріщиностійкості конструкційних низьколегovanих сталей.

Методика досліджень і матеріали. З метою визначення оптимального вмісту нікелевого порошку в покритті, що забезпечує необхідну концентрацію нікелю в металі шва і високу ударну в'язкість зварних швів за температур до -60°C , виконали додаткові дослідження на конструкційній низьколегованій сталі марки 09Г2С, яку найбільш широко використовують у нафтохімічному машинобудуванні в умовах мінусових температур. Покриття дослідних електродів вміщувало нікелевий порошок марки ПНЭ-1 згідно ГОСТ 9722-79 (насіпна вага $3,22 \text{ г/см}^2$). Склад покриття дослідних електродів подано в табл.1. Хімічний і гранулометричний склад нікелевого порошку наведено в табл. 2. Хімічний склад металу, наплавленого дослідними електродами, показано в табл. 3.

Таблиця 1

Склад покриття дослідних електродів, % (по масі)

Компоненти покриття	Індекс електрода			
	М1	М2	М3	М4
Мармур	29	29	29	29
Плавииковий шпат	22	22	22	22
Синтетична слюда (АНС-1)	4	4	4	4
Польовошпатовий концентрат	7	7	7	7
Феромарганець	4	4	4	4
Феросіліцій	6	6	6	6
Феротитан	8	8	8	8
Fe порошок	20	18	17	16
Нікелевий порошок	0	2	3	4

Таблиця 2

Хімічний і гранулометричний склад нікелевого порошку

Хімічний склад, %							Гранулометричний склад, мкм	
Ni	Co	C	Fe	Cu	Si	S	клас	
99,8	0,07	0,01	0,04	0,01	0,01	0,005	+71	-45
							85	15

Таблиця 3

Хімічний склад наплавленого металу, %

Індекс електрода	C	Mn	Si	Ti	Ni	S	P
М1	0,076	1,15	0,37	0,016	0	0,017	0,021
М2	0,074	1,2	0,39	0,011	1,0	0,019	0,021
М3	0,078	1,3	0,42	0,011	1,6	0,014	0,023
М4	0,077	1,3	0,42	0,012	2,0	0,015	0,021

Результати досліджень і їх обговорення. Результати випробувань механічних властивостей металу шва дослідних електродів наведено на рис. 1 і 2. Видно, що зі збільшенням вмісту нікелю від 0 до 2,0 % в наплавленому металі ударна в'язкість зварних швів на зразках з надрізом по Шарпі (тип IX по ГОСТ 6996-66) за мінусових температур ($-60...-70^{\circ}\text{C}$) підвищується приблизно в 2 рази. При цьому дещо збільшуються і його міцнісні характеристики.

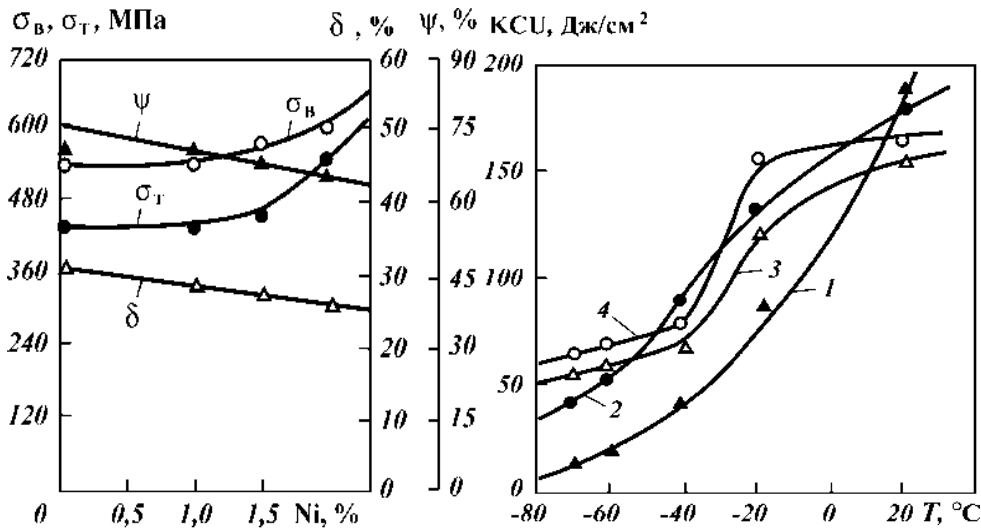


Рис. 1. Графіки залежності механічних властивостей металу шва від вмісту нікелю в наплавленому металі

Рис. 2. Графіки залежності ударної в'язкості металу шва від температури за різних концентрацій нікелю в наплавленому металі: 1 – 0 % Ni; 2 – 1,0 % Ni; 3 – 1,6 % Ni; 4 – 2,0 % Ni

Як показали дослідження, легування металу шва нікелем дозволяє покращити й інші широко використовувані в механіці руйнування металоконструкцій характеристики в'язкості наплавленого металу, зокрема, параметри критичної інтенсивності напружень (K_{Ic} , МПа \times м^{1/2}) і критичного розкриття тріщини (δ_c , мм), що характеризують опір металу шва розкриттю тріщин.

Для виготовлення зразків були зварені стики із сталі 09Г2С дослідними електродами діаметром 4 мм (варіанти М1-М4) і промисловими електродами АНО-11 на змінному струмі ($I_{зв} = 180$ А, $U_d = 23-24$ В) від трансформатора СТШ-500/80. Надріз на зварних зразках наносили по шву. В якості дослідних електродів використовували електроди АНО-26, у покриття яких замість залізного вводили нікелевий порошок в кількості 0, 1, 2, 3 і 4 %.

Втомні (тривалі) тріщини в зразках вирощували за допомогою гідропульсатора ЦДМпу-10 (Німеччина) за частоти навантаження 10-15 Гц і коефіцієнті асиметрії циклу $R = 0,1-0,2$.

Експериментальні випробування з визначення параметрів в'язкості руйнування проводили на установці УМЭ-10 за стандартною методикою [5]. Результати вимірювань наведено в табл. 4. Видно, що метал зварних швів, легований нікелем (0,5-2%), має більші значення коефіцієнтів K_{Ic} і δ_c у всьому діапазоні температур, ніж основний метал, тобто характеризується більш високим опором руйнуванню. Найбільш високі значення критичної величини коефіцієнта інтенсивності напруження K_{Ic} і коефіцієнта розкриття тріщини δ_c отримано для зварних швів з концентрацією нікелю, що дорівнює 2 %.

Покращення механічних властивостей, зокрема, ударної в'язкості й параметрів в'язкості руйнування металу шва, легovanого нікелем, можна пояснити його сприятливим впливом на структурну та хімічну неоднорідність наплавленого металу. Щоб оцінити ступінь цього впливу стосовно електродів з основним покриттям, виконали додаткові дослідження за допомогою сучасних методів металографічного аналізу.

Таблиця 4

**Результати визначення параметрів в'язкості руйнування K_{1c} і δ_c
в залежності від температури випробування**

Індекс (марка) електрода	Вміст нікелю в наплавленому металі, %	Параметри в'язкості руйнування	Температура випробувань, °C			
			+20	-20	-50	-70
М0	0	K_{1c} , МПа-м ^{1/2}	106,5	102,3	79,5	65,7-69,8
М1	0,5		94,6-110,0	90,0-102,3	82,0	66,6-72,3
М2	1,0		108,4	92,2	77,5	76,0
М3	1,6		102,2-115,5	105,3	88,4	84,9
М4	2,0		112,0-127,2	116,1	79,2-98,3	80,5-87,6
Сталь 09Г2С	-		98,5-104,0	88,6-92,5	71,3-78,8	62,1-68,2
М0	0	δ_c , мм	0,70-0,77	0,46-0,53	0,14-0,23	0,06-0,11
М1	0,5		0,73-0,78	0,57-0,66	0,27-0,32	0,10-0,16
М2	1,0		0,81-0,89	0,61-0,69	0,29-0,36	0,14-0,19
М3	1,6		0,82-0,86	0,74-0,82	0,35-0,46	0,21-0,25
М4	2,0		0,84-0,90	0,79-0,85	0,42-0,56	0,24-0,30

Досліджували метал одношарових зварних швів, виконаних дослідними електродами зі змінним вмістом нікелю в покритті (електроди з індексом М1, М2, М3 і М4, див. табл.1). Хімічний склад наплавленого металу наведено в табл. 2.

Зварювання виконували на постійному струмі за зворотної полярності на режимі: $I_{зв} = 180$ А, $U_d = 23-24$ В.

Структуру металу шва вивчали на растровому електронному мікроскопі моделі «JSM-35CF» (фірма «Джеол», Японія). Результати досліджень показали, що структура металу шва електродів М1 (див. табл.1) характеризується наступними особливостями. Нерівноважні зерна верхнього бейніту (діаметром 100-700 мкм і довжиною 1-2 мм) облямовано полікристалічною доєвтектоїдною феритною оторочкою шириною 10-20 мкм, яка не вміщує вторинних фаз впровадження, але з неметалевими включеннями і перлітними колоніями по її межах. У тілі зерен спостережено пластинки карбідів (в основному, карбідів заліза) товщиною 7-10 мкм, невеликі перлітні колонії й неметалеві включення сферичної форми діаметром 0,1-2 мкм.

Легування металу шва нікелем в кількості 1-2 % викликає наступні зміни в мікроструктурі металу (центральна зона шва):

а) значно зменшились розміри як бейнітних зерен, так і його карбідів, зокрема: діаметр зерна – 150-200 мкм (1% Ni) і 100-150 мкм (2 % Ni);

б) зменшилась ширина доєвтектоїдного фериту: 6-8 мкм (1 % Ni) і 3-5 мкм (2 % Ni);

в) зменшилась товщина карбідів бейніту: 4-5 мкм (1 % Ni) і 2-4 мкм (2 % Ni).

Крім того, у разі легування металу нікелем в кількості 2% виявлено роздроблення доєвтектоїдного фериту на субзерна (діаметром 7-10 мкм). Виявлено також, що сульфідів в зварних швах, легуваних нікелем, складаються зі сполук сірки з марганцем глобулярної форми діаметром ~3 мкм. Отже, в даному випадку зв'язування сірки в сполуку MnS знижує ймовірність утворення легкоплавкої евтектики Ni – NiS, що, як відомо, сприяє підвищенню стійкості зварних швів проти утворення гарячих тріщин [15-17].

Рентгеноспектральний мікроаналіз, виконаний на мікроаналізаторі системи «ORTEC» (США), показав, що нікель майже не зв'язується з неметалевими включеннями, а утворює переважно твердий розчин з феритом. Спостерігаються також карбіди марганцю, до складу яких входить нікель. Крім того, виявили

суттєвий вплив нікелю на хімічну неоднорідність, яка проявляється в розширенні ліквацийних смуг фосфору й марганцю та в зменшенні ступеню нерівномірного розподілення таких елементів, як кремній і сірка, що добре узгоджується з результатами робіт [13; 15].

Порівняння даних структурного і мікрорентгеноспектрального аналізу дозволяє припустити, що покращення пластичних властивостей металу шва в разі легування нікелем зв'язано з тим, що нікель зміщує область $\gamma - \alpha$ -перетворення в бік нижчих температур, сприяючи тим самим утворенню достатньо дрібнодисперсної й однорідної структури нижнього бейніту з мінімальною шириною доєвтектоїдної феритної оторочки. Така структура, як відомо [36], сприяє забезпеченню високих механічних властивостей металу шва, зокрема, його ударній в'язкості.

Кількісну оцінку впливу структурного стану наплавленого металу на механічні властивості надали, використовуючи залежність критичних напружень руйнування від розмірів (діаметра) зерна металу, отриману в роботі [3; 5]:

$$\sigma_{кр} = K_p \cdot d^{-1/2}, \quad (1)$$

де K_p – коефіцієнт інтенсивності руйнуючих напружень для однорідної структури; d – вихідний розмір (умовний діаметр) зерна.

Із виразу (1) випливає, що зі зменшенням розміру зерна зростає величина критичних напружень руйнування. Цю залежність отримали для випадку однорідної мікроструктури аустенітних сталей і щодо зварних швів, характеризованих неоднорідною структурою, і вона не повністю відповідає дійсності. Найбільш характерною ознакою структури шва є наявність ділянок доєвтектоїдного фериту по межах зерен. Відомо, що ферит – м'яка структурна складова, у той час як бейнітний пакет – високоміцна. Тому через неоднорідність (за міцнісними характеристиками) структурних складових шва на їх межах будуть існувати локальні області з підвищеною концентрацією напружень, які можуть бути причиною передчасного крихкого руйнування зварного з'єднання.

Ураховуючи сучасні уявлення про механізми руйнування металів [13; 16; 17], оцінимо величину напружень, що виникають на межі неоднорідних ділянок структур.

У зв'язку з тим, що зміна одновісності поля напружень у бейнітного пакета аналогічно випадку концентрації напружень у циліндричного включення, найбільш доцільно використати результати, отримані в роботі [17]. Розглянемо "критичний" випадок, коли бейнітний пакет розміщено в структурі перпендикулярно до зовнішнього напруження. У зв'язку з тим, що модуль зсуву бейніту не дорівнює модулю зсуву фериту, значення локальних напружень, згідно з роботами [10, 17], в 1,2 раза перевищують напруження на ділянці рівномірної деформації. Ураховуючи це, коефіцієнт інтенсивності руйнуючих напружень на межі фериту і бейнітного пакету можна визначити за формулою [3,5]

$$K_{p,n} = 0,85\sqrt{300\gamma E/\pi}, \quad (2)$$

де γ – питома поверхнева енергія; E - модуль зсуву.

Тоді критичні напруження крихкого руйнування для випадку неоднорідної структури шва дорівнюють

$$\sigma_{кр,n} = K_{p,n} \cdot d_{\phi}^{-1/2} = 15d_{\phi}^{-1/2}. \quad (3)$$

Результати розрахунку величини $\sigma_{кр,n}$ для раніше розглянутих трьох видів мікроструктур, легованих нікелем в кількості 0,1 і 2 %, наведено на рис. 3.

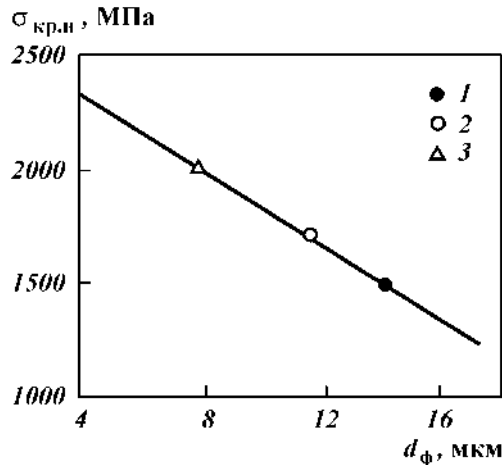


Рис. 3. Розрахункова залежність критичних напружень крихкого руйнування для шва з неоднорідною структурою від розміру зерна доєвтектоїдного фериту в зварному шві:
1 – 0 % Ni; 2 – 1 % Ni; 3 – 3 % Ni

Видно, що метал швів, легованих 1-2 % нікелю, менше піддається крихкому руйнуванню, спричиненому структурною неоднорідністю, ніж метал, який не містить нікелю в своєму складі. Дані фрактографічного аналізу зразків, випробуваних на ударний згин (в інтервалі температур $-70...20$ °С), показали, що злами металу шва, легovanого нікелем, являють собою в'язкі ділянки ямкового типу. При цьому частка в'язкої складової в зломі таких зразків становить не менше 95 %, у той час як у зразків без нікелю вона не перевищує 45-50 %. У той самий час зварні шви, легovanі 2 % нікелю, руйнуються по площинах відколу пакетів нижнього бейніту. Описані вище зміни характеру руйнування шва по мірі збільшення концентрації нікелю ймовірно є причиною спостереженого росту його ударної в'язкості.

Підвищення ударної в'язкості в результаті легування шва нікелем обумовлено не тільки роздробленням структури металу шва, але й впливом нікелю на дислокаційну структуру феритної матриці та бейнітних пакетів [12]. Нікель, що входить до складу бейнітних пакетів, знижує їх твердість, тим самим сприяє пластичній деформації [13].

Пластифікування матриці зерна нікелем підтверджено фрактографічними дослідженнями зломів зразків. Так, у шві, легovanому 2 % нікелю, спостерігали в'язке руйнування за механізмом зародження й об'єднання мікропустот у неметалевих включеннях. У той самий час руйнування квазівідколом, спостережене при випробуванні не легованих нікелем зразків, проходить зазвичай у тілі феритних оторочок поблизу крупних неметалевих включень (діаметром більше 2-4 мкм), які слугують концентраторами напружень. Мікропустоти, шляхом зливання яких утворюється вязка тріщина критичної довжини, від якої починається руйнування відколом, можуть виникати як навколо неметалевих включень, так і в результаті розшарувань по межах феритних зерен [10,12].

Експериментальні випробування показали, що найбільш високі й стабільні значення ударної в'язкості ($59-70$ Дж/см² при $t = -60$ °С) і характеристик опору розвиненню тріщин ($K_{Ic} = 76,6$ МПа \times м^{1/2} і $\delta_c = 0,21-0,30$ при $t = -70$ °С) металу шва холодостійких сталей досягаються в разі концентрації нікелю в ньому від 1,6 до 2,2 %, яка реалізується введенням в електродне покриття нікелевого по-

рошку в кількості 4 %.

Ураховуючи вищевикладене, нами був вибраний оптимальний хімічний склад наплавленого металу (в %): 0,10 С; 0,20-0,40 Si; 0,80-1,2 Mn; 1,6-2,2 Ni; S, P < 0,025, який реалізується оптимальним вмістом і співвідношенням феросплавів в електродному покритті: 4-5 % FeMn, 5-8 % FeSi, 710 % FeTi; FeTi : FeSi : FeMn = 2 : 1,5 : 1.

Висновки

Установлено, що найбільш високі й стабільні значення ударної вязкості (59-70 Дж/см² для $t = -60$ °С) і характеристик опору розвитку тріщин ($K_{Ic} = 76,6$ МПа-м^{1/2} і $\delta_c = 0,21-0,30$ мм для $t = -70$ °С) металу шва холодостійких сталей досягаються за концентрації нікелю в ньому від 1,6 до 2,2 %, яка реалізується введенням в електродне покриття нікелевого порошку в кількості 3-4 %. Визначено оптимальний хімічний склад наплавленого металу, що забезпечує отримання дрібнозернистої структури, яка вміщує незначну кількість неметалевих включень глобулярної форми (в %): С < 0,10; 0,20-0,40 Si; 0,81,20 Mn; 1,6-2,2 Ni; S, P < 0,025. Зазначений склад реалізовано оптимальним вмістом і співвідношенням феросплавів в електродному покритті: 5 % FeMn, 5-8 % FeSi, 7-10 % FeTi; FeTi : FeSi : FeMn = 2 : 1,5 : 1.

Список літератури

1. Бутко И.И., Навроцкий И.В., Сокольский Ю.З. Хладостойкость малоуглеродистой стали с РЗМ. *Металловедение и ТО металлов*. 1973. №11. С.6-9.
2. Браун М.П. Влияние легирующих элементов на свойства стали. Киев: Гостехлит, 1962. 192 с.
3. Вигли Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах. Москва: Мир, 1974. 376 с.
4. Георгиев М.Н. Вязкость малоуглеродистых сталей. Москва: Металлургия, 1973. 224 с.
5. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. Москва: Металлургия, 1977. 224 с.
6. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. *Металловедение сварки низко- и средне-легируемых сталей*. Киев: Наукова думка, 1978. 276 с.
7. Гуляев А.П. *Металловедение*. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
8. Екобори Т.М. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. Москва: Металлургия, 1971. 264 с.
9. Ерохин А. А. *Основы сварки плавлением*. Москва: Машиностроение, 1973. 448 с.
10. Итиро К., Кадзумаса Я., Кэйнори И. Сварка стали с 3,5 % Ni под флюсом, используемая при низких температурах. *Технология сварки*. 1976. №11. С.77-82.
11. Калинин Е.С. Хладостойкая низколегированная сталь. Москва: Металлургия, 1976. 287 с.
12. Makarenko V.D., Prohorov N.N., Paliy R.V. Effect of barium on the phosphorus content of deposited metal of welded joints in cold-resistant steel. *Welding International*. 2002. №14(7). P. 35-40.
13. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Galichenko E.N., Prohorov N.N. Effect of modifying additions on the ductility and plastic properties and the brittle strength of cold-resistant, low-alloy steel. *Welding International*. 2001. №15(1). P. 62-70.
14. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Galichenko E.N., Prohorov N.N. Effect of modifying microadditions on the corrosion resistance of welded joints in low-alloy steel. *Welding International*. 2001. №15(2). 78-85.
15. Marvin C.W. Determining the strength of Corroded Pipe. *Materials protection and Performance*. 2012. №11. P.38-40.

16. Vasilkovsky O., Rivard A. The effect of hydrogen sulfide in grude oil on fatigue crack growth in pipe line steel. *Corrosion*. 2013. V.38. №1. P.19-22.
17. Makarenko V.D., Muravjev K.A., Kalyanov A.I. () Special features of manual arc welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia. *Welding International*. 2006. №10 (5). P.64-71.
18. Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I. Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*. 1998. №12. P.34-39.
19. Makarenko V.D., Shatilo S.P. Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*. 1999. №12. P.56-61.
20. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Protasov V.N., Shatilo S.P. Mathematical model of the mechanism of resistance of welded joints in oil and gas pipelines to static hydrogen fatigue. *Welding International*. 2000. №4. P.83-88.
21. Slobodyan M.S. Analysis of procedures for evaluation of electric resistance of areas electrode-electrode and part-part before spot resistance microwelding. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 2013. №8. P.20-24. [in Russian]
22. Askeland D.R., Fulay P.P., Wright W.J. The science and engineering of materials. Cengage Learning, 2010. 949 p.
23. Dmytryk V.V., Glosko A.V., Syrenko T.A. Peculiarities of welded joints weakening in operating steam pipelines. *The Paton Welding J*. 2018. №5. P.7-11.
24. Glosko A.V. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*. 2016. №1 (84). P.14-20.
25. Razmyshlynev A.D., Ageeva M.V. On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J*. 2018. №3. P.25-28.
26. Razmyshlyev A.D., Ahieva M.V. (2014). Features of arc surfacing process in a longitudinal magnetic field. *Appl. Mech. Mater.* №682. P. 313-318.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2019.

V. D. MAKARENKO, T. P. FEDORINA, I. I. IKALCHYK, O. O. PETRENKO,
L. A. TARABORKIN

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF STRUCTURAL STEELS ALLOYED NICKEL

We established that the highest and stable values of impact strength (59-70 J / cm² at t = -60 ° C) and characteristics of resistance to crack development (K_{1c} = 76,6-MPa·m^{1/2} and δ_c = 0,21 -0.30 mm at t = -70 ° C) of the weld metal of cold-resistant steels are achieved at a concentration of Nickel in it from 1.6 to 2.2%, that is realized by the introduction of Nickel powder in the amount of 3-4% into the electrode coating. Improvements in mechanical properties, such as impact strength and fracture toughness of the nickel alloyed weld metal can be explained by its beneficial effect on the structural and chemical heterogeneity of the deposited metal. To assess the extent of this influence with respect to the electrodes with the main coating, additional studies were performed using modern metallographic analysis methods. The optimal chemical composition of the weld metal, which provides a fine-grained structure containing a small number of non-metallic inclusions of a globular form (in%): C <0,10; 0.20-0.40 Si; 0.8-1.20 Mn; 1.6-2.2 Ni; S, P <0.025. This composition is realized by the optimum content and ratio of ferroalloys in the electrode coating: 5% FeMn, 5-8% FeSi, 7-10% FeTi; FeTi: FeSi: FeMn = 2: 1,5: 1.

Keywords: nickel, welding, stress, structure, strength.

Reference

1. Butko I.I., Navrockij I.V., Sokol'skij Ju.Z. Hladostojkost' malouglerodistoj stali s

RZM. Metallovedenie i TO metallov. 1973. №11. S.6-9.

2. Braun M.P. Vlijanie legirujushhikh jelementov na svojstva stali. Kiev: Gostehlit, 1962. 192 s.
3. Vigli D.A. Mehanicheskie svojstva materialov pri nizkikh temperaturah. Moskva: Mir, 1974. 376 s.
4. Georgiev M.N. Vjazkost' malouglerodistykh stalej. Moskva: Metallurgija, 1973. 224 s.
5. Golikov I.N., Maslenkov S.B. Dendritnaja likvacija v staljah i splavah. Moskva: Metallurgija, 1977. 224 s.
6. Grabin V.F., Denisenko A.V. Metallovedenie svarki nizko- i sredne-legirovannykh stalej. Kiev: Naukova dumka, 1978. 276 s.
7. Guljaev A.P. Metallovedenie. Moskva: Metallurgija, 1986. 544 s.
8. Ekobori T.M. Fizika i mehanika razrushenija i prochnosti tverdykh tel. Moskva: Metallurgija, 1971. 264 s.
9. Erohin A. A. Osnovy svarki plavljeniem. Moskva: Mashinostroenie, 1973. 448 s.
10. Itiro K., Kadzumas Ja., Kjejnori I. Svarka stali s 3,5 % Ni pod fljusom, is-pol'zuemaja pri nizkikh temperaturah. Tehnologija svarki. 1976. №11. S.77-82.
11. Kalinnikov E.S. Hladostojkaja nizkolegirovannaja stal'. Moskva: Metallurgija, 1976. 287 s.
12. Makarenko V.D., Prohorov N.N., Paliy R.V. Effect of barium on the phosphorus content of deposited metal of welded joints in cold-resistant steel. *Welding International*. 2002. №14(7). P. 35-40.
13. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Galichenko E.N., Prohorov N.N. Effect of modifying additions on the ductility and plastic properties and the brittle strength of cold-resistant, low-alloy steel. *Welding International*. 2001. №15(1). P. 62-70.
14. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Galichenko E.N., Prohorov N.N. Effect of modifying microadditions on the corrosion resistance of welded joints in low-alloy steel. *Welding International*. 2001. №15(2). 78-85.
15. Marvin C.W. Determining the strength of Corroded Pipe. *Materials Protection and Performance*. 2012. №11. P.38-40.
16. Vasilkovsky O., Rivard A. The effect of hydrogen sulfide in guide oil on fatigue crack growth in pipe line steel. *Corrosion*. 2013. V.38. №1. P.19-22.
17. Makarenko V.D., Muravjev K.A., Kalyanov A.I. () Special features of manual arc welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia. *Welding International*. 2006. №10 (5). P.64-71.
18. Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I. Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*. 1998. №12. P.34-39.
19. Makarenko V.D., Shatilo S.P. Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*. 1999. №12. P.56-61.
20. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Protasov V.N., Shatilo S.P. Mathematical model of the mechanism of resistance of welded joints in oil and gas pipelines to static hydrogen fatigue. *Welding International*. 2000. №4. P.83-88.
21. Slobodyan M.S. Analysis of procedures for evaluation of electric resistance of areas electrode-electrode and part-part before spot resistance microwelding. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 2013. №8. P.20-24. [in Russian]
22. Askeland D.R., Fulay P.P., Wright W.J. The science and engineering of materials. Cengage Learning. 2010. 949 p.
23. Dmytryk V.V., Glosko A.V., Syrenko T.A. Peculiarities of welded joints weakening in operating steam pipelines. *The Paton Welding J*. 2018. №5. P.7-11.
24. Glosko A.V. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*. 2016. №1 (84). P.14-20.
25. Razmyshlynev A.D., Ageeva M.V. On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J*. 2018. №3. P.25-28.
26. Razmyshlynev A.D., Ahieva M.V. (2014). Features of arc surfacing process in a longitudinal magnetic field. *Appl. Mech. Mater.* №682. P. 313-318.

Макаренко Валерій Дмитрович – доктор технічних наук, професор кафедри «Нафтогазової інженерії та технологій» Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. E-mail: leotar@ukr.net

Федорина Тетяна Петрівна – кандидат педагогічних наук, доцент, зав. кафедри «Загальноінженерні дисципліни» ВП НУБіПУ «Ніжинський агротехнічний Інститут». E-mail: fedoryna@gmail.com

Ікальчик Іван Миколайович – кандидат технічних наук, доцент ВП НУБіПУ «Ніжинський агротехнічний Інститут». E-mail: m.ikolchuk@gmail.com

Петренко Олександр Олександрович – студент Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка

Тараборкін Леонід Анатолійович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, старший науковий співробітник Інституту імені С.О.Патона національної академії наук України. E-mail: leotar@ukr.net