

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАНОУТВОРЕНЬ В МЕТАЛІ
НА ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЗВАРНОГО ШВА
ТА ЙОГО МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

В. В. Головка, д. т. н., С. М. Степанюк, к. т. н., Д. Ю. Єрмоленко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

При формуванні структури зварних швів можливості впливу на її механічні властивості значно обмежені у порівнянні з технологією виробництва сталі. Основними чинниками, завдяки яким можливо збільшити рівень міцності та в'язкості металу швів, є легування твердого розчину і формування неметалевих включень певного розміру, складу і морфології. Дослідження цього питання і було метою даної роботи.

Методика досліджень

Для дослідження можливості підвищення показників міцності та в'язкості металу швів за рахунок розмірів, складу та морфології неметалевих включень в рідкий метал зварювальної ванни вводили карбіди та нітриди легуючих елементів.

Зварювання виконували в середовищі захисного газу ($Ar + CO_2$) порошковим дротом діаметром 1,6 мм. Підготовку до зварювання стикових з'єднань з листів сталі СтЗсп товщиною 20 мм виконували відповідно до вимог ISO 14 171.

Базова система легування С-Мn-Сr-Ni-Mo-Si-Cu, реалізована в варіанті №0, мала на меті формування металу швів з бейнітною структурою, яка за своїми механічними властивостями відповідає низьколегованим сталям категорії міцності К75. Вплив феротитану досліджували на зразках металу швів №4, а введення карбонату та нітриду на зразках металу швів №6 і №7 відповідно. Сполуки титану вводили до зварювальної ванни через порошковий дріт у вигляді частинок розміром не більше 1 мкм.

Зі зварних з'єднань вирізали поперечні зразки для дослідження структури та фазового складу металу швів, а також механічних властивостей на одновісний розтяг та ударний згин.

При виконанні досліджень використовували методи оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноспектрального аналізу. Для проведення робіт були залучені оптичний мікроскоп NEOPHOT-32, електронний скануючий мікроскоп JEOL JSM35CF з приставкою для локального рентгеноспектрального аналізу INCA Energy 350, універсальна випробувальна машина INSTRON 8800, зварювальне устаткування фірми Fronius, оригінальні комп'ютерні програми для аналізу мікроструктурних складових та розподілу неметалевих включень за розміром та складом.

Результати та обговорення

Хімічний склад металу досліджених швів (наплавлений метал) наведено в таблиці 1, а механічні властивості – в таблиці 2.

Таблиця 1.

Хімічний склад металу дослідних швів

№	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb
0	0,050	0,301	1,30	0,025	0,014	0,17	2,50	0,27	0,043	0,006	0,006
4	0,050	0,290	1,32	0,024	0,014	0,16	2,19	0,27	0,039	0,019	0,005
6	0,054	0,263	1,28	0,025	0,011	0,13	2,22	0,26	0,037	0,009	0,007
7	0,035	0,317	1,40	0,019	0,009	0,14	2,29	0,26	0,036	0,011	0,005

Таблиця 2.

Механічні властивості металу дослідних швів

№ шва	Зразки МІ-12 тип ІІ				Зразки МІ-50 при температурі °С				
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	+ 20	0	- 20	- 40	- 60
0	774,9	738,4	16,1	54,4	92,5	87,5	74,2	63,3	58,8
4	787,5	737,1	16,1	51,0	60,0	58,12	57,08	52,08	56,3
6	715,6	643,9	19,4	62,9	112,6	93,7	84,6	73,1	64,4
7	712,3	580,2	5,3	14,7	55,4	47,1	40,4	33,7	

В результаті металографічного аналізу було встановлено, що мікроструктура досліджених швів складається з продуктів розпаду аустенітної фази в процесі охолодження металу і містить певну кількість неметалевих включень. Найбільш поширеними структурами, що спостерігалися в металі швів були зернограничний аллотріоморфний ферит (ЗГА); внутризеренний полігональний ферит (ВПФ), що формується у вигляді верхнього та нижнього бейніту; ферит Відманшетта (ФВ); внутризеренний голчастий ферит (ГФ); верхній і нижній бейніт (ВБ і НБ); фаза, що містить мартенсит, аустеніт і карбіди (МАК). Вміст окремих складових мікроструктури металу швів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Вміст окремих складових мікроструктури металу швів

№ шва	Частка складових (%)				
	ЗГА	ВПФ	ФВ	ГФ	МАК
0	14	26	9	48	3
4	22	16	7	53	2
6	9	9	3	77	2
7	16	18	8	52	6

Базова система легування металу дослідних швів (шов №0), яка забезпечує високі показники міцності, сприяє формуванню мікроструктури з досить високим вмістом внутризеренного полігонального фериту і виділеннями по границям зерен аллотріоморфного фериту (рис. 1а). Внутризеренний ферит формується як у вигляді бейнітної фази, так і в формі масивного фериту, а зернограничний ферит виділяється як у вигляді голчатої фази так і фериту Відманшетта. Неметалеві включення містять оксиди алюмінію та кремнію, в складі яких зустрічаються виділення на базі сірки. Така структурна композиція, що має підвищений вміст бейнітної фази і відносно низький вміст голчастого фериту, характеризується низькою пластичністю (шви №0 та 4).

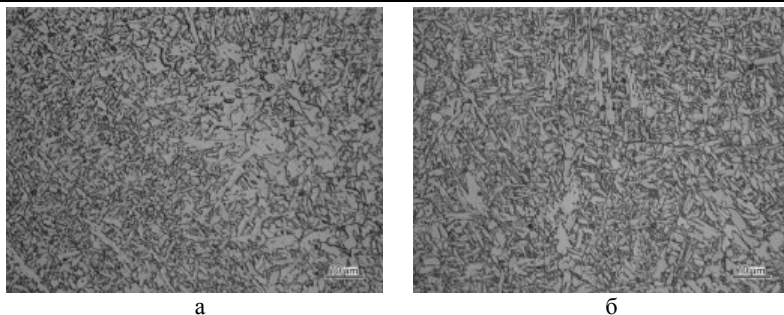


Рис. 1. Оптичне зображення мікроструктури металу шва: а – зразок №0, б – зразок №6.

Введення до зварювальної ванни часток титану у вигляді карбідів приводить до деякого збільшення вмісту включень розміром від 0,3 до 0,8 мкм. В мікроструктурі шва аллотріоморфний ферит виділяється на границях зерен не у вигляді оторочок, а як окремі розрізнені блоки (рис 1б). Внутризеренний ферит формується переважно у вигляді верхнього бейніту, але зниження його вмісту за рахунок зростання голчатої морфології приводить до підвищення показників пластичності і в'язкості. Дещо знижується частка фериту Відманштетту, але при цьому він виростає не з масивів аллотріоморфного фериту, а в тілі зерен.

Комплексний аналіз включень (морфологія, дисперсність, склад) показав, що вплив неметалевих включень на мікроструктури металу швів залежить не тільки від їх хімічного складу, але також від їх розмірів і щільності розподілу в металевій матриці. Комп'ютерна обробка результатів розподілу неметалевих включень за розміром і складом дозволила виділити з загального масиву даних три основні групи за цими ознаками (<0,3, 0,3-0,8, >0,8 мкм). Гістограми розподілу за розміром та потрійні діаграми хімічного складу включень розмірами 0,3-0,8 мкм наведено на рисунку 2 для зразків №0 та №6.

Було встановлено, що включення розміром до 0,3 мкм частіше за все містять окремі сполуки алюмінію або титану, іноді такі сполуки знаходяться в одному включенні.

У включеннях розміром від 0,3 до 0,8 мкм основну масу складають з'єднання алюмінію і титану, можлива також незначна кількість сполук марганцю і кремнію, зустрічаються з'єднання сірки.

Включення розміром вище 0,8 мкм складаються зі з'єднань алюмінію, титану, марганцю, кремнію і сірки, при цьому сумарний вміст марганцю і кремнію може перевищувати 50 % від загальної маси включення.

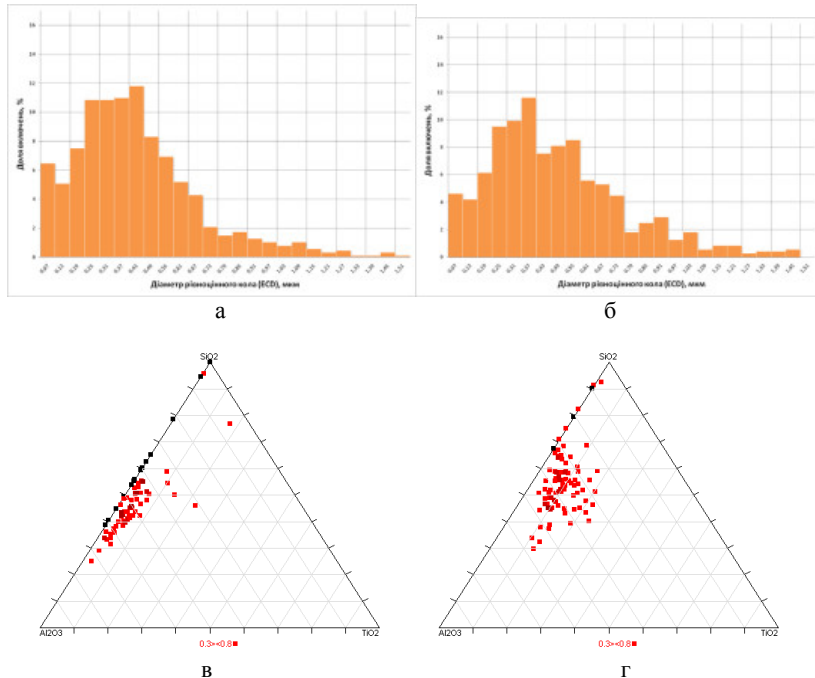


Рис. 2. Гістограми розподілу за розміром (а, б) та потрійні діаграми складу неметалевих включень (в, г) в металі шва №0 (а, в), та №6 (б, г).

У результаті дослідження було встановлено, що однофазні включення розміром не більше 0,3 мкм типу простих оксидів (Al_2O_3 , TiO і SiO_2) не справляють впливу на утворення голчастого фериту. Включення цього розмірного ряду типу нітриду титану, так само як і виділення бору на границях зерен, сприяють формуванню гартівних структур типу фериту Відманштетта й верхнього бейніту. Багатофазні включення розміром понад 0,8 мкм, що містять силікати марганцю, оксиди алюмінію й титану, активно сприяють зародженню полігональних структурних складових у металі швів низьколегованих високоміцних сталей (рис. 3).

Комплексні включення (оксисульфіди й багатофазні включення) є більше ефективними центрами зародження голчастого фериту в порівнянні із простими оксидами й нітридами. В металі зварних швів низьколегованих високоміцних сталей у неметалевих включеннях, що містять дві або більше фази, склад фаз змінюється від центра до поверхні включення.

Найбільше помітно їхній вплив проявляється в тих випадках, коли на зовнішній поверхні багатофазного включення розміром 0,3 - 0,8 мкм розташовані нанорозмірні утворення карбідної фази. Включення такої морфології були

відзначені у випадку введення в рідку ванну поза зоною дії зварювальної дуги карбідів титану (варіант шва №6).

Сканування неметалевих включень шва №6 на вміст вуглецю показало, що наявність карбідної фази на периферії включення сприяє формуванню дрібнодисперсної феритної структури.

Такі включення представляють складні комплекси, склад яких у центрі й на поверхні відрізняється. Якщо в центрі, як правило, розташований оксид, то на поверхні включення містяться острівці карбідів. Виходячи з такої морфології включень можна припустити, що їхній центр формується на стадії кристалізації, а інша маса у вигляді карбідів (типу TiC) осаджується на їхній поверхні з перенасиченого розчину в міждендритному об'ємі металу, а також в результаті дифузії вуглецю в твердому розчині металу при його подальшому охолодженні.

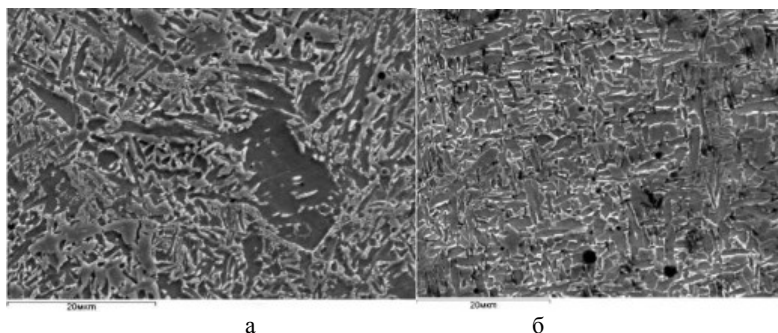


Рис. 3. Електронне зображення мікроструктури металу шва: а – №0, б – №6.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що присутність певної кількості неметалевих включень в металі зварних швів є необхідною умовою для отримання мікроструктури, яка здатна забезпечити високі показники міцності, пластичності і в'язкості металу. Аналіз отриманих даних показав, що позитивний вплив на формування структури і механічних властивостей металу справляють включення розміром від 0,3 до 0,8 мкм, які мають багатофазну морфологію і містять на зовнішньому шарі нанорозмірні утворення типу карбідів титану. Такі включення мають осердя, як правило з оксиду алюмінію, зовнішню багаточарову мантію, основу якої складають сполуки типу галакситу та оксиди титану, а на зовнішні поверхні розташовані виділення сульфідної чи карбідної фази. Частка таких включень на перебільшує 30 %, але саме вони визначають умови формування мікроструктури і рівень механічних властивостей металу зварних швів.