УДК 621.791

ВПЛИВ КАРБІДІВ ТИТАНУ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ

І. К. ПОХОДНЯ, В. В. ГОЛОВКО, С. М. СТЕПАНЮК, Д. Ю. ЄРМОЛЕНКО

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Проаналізовано можливість впливати на механічні властивості зварних швів шляхом контролю вмісту голкового фериту у структурі металу шва. Реалізовано методику додавання до розплаву металу у зварювальній ванні порошку з карбідів титану. Встановлено, що виявлені в структурі металу шва неметалеві включення розміром від 0,3 до 0,8 μm відповідальні за формування складників мікроструктури і механічні властивості металу зварних швів.

Ключові слова: *неметалеві включення, карбід титану, формування мікроструктури, голковий ферит, механічні властивості, метал шва.*

Вступ. Можливості впливу на механічні властивості металу шва (МШ) під час формування зварних з'єднань (ЗЗ) істотно обмежені порівняно з передбаченими технологією виготовлення сталі. Основними чинниками такого впливу вважають легування твердого розчину та формування в структурі неметалевих включень певних розмірів, морфології та складу.

Під час кристалізації сталей з контрольованим вмістом голкового фериту (ГФ) гетерогенними центрами зародження структурних складників служать певні неметалеві включення. Такий напрямок, як "Оксидна металургія" виник для узагальнення практичного досвіду і розроблення реальних шляхів оптимізації цих процесів [1]. Для подальшої оптимізації кількості та розподілу за розмірами включень у структурі сталей сформували напрям "Інженерія включень", який вивчає чинники впливу на цей процес на етапі оброблення розплаву в ковші та його виливання [2]. Поєднання цих двох напрямів створило перспективу впровадження досягнень інженерії включень для оптимізації мікроструктури та, як наслідок, поліпшення механічних властивостей сталей. Включення (оксиди, сульфіди, карбіди або нітриди) завбільшки до 1 μm, які можуть сприяти зародженню ГФ, назвали подрібнювачами (дисперсоїдами). Їх виділили в особливу групу, бо завдяки їхнім малим розмірам вони істотно впливають на формування мікроструктури металу, при цьому не змінюючи негативно його механічні властивості.

Мета роботи – досягти прогнозованого розподілу включень (за об'ємною часткою, складом і розмірами) у металі, наплавленому порошковим дротом (ПД), забезпечивши цим формування прогнозованої мікроструктури МШ з поліпшеними механічними властивостями.

Методики досліджень. Поліпшити механічні характеристики МШ (міцність та ударну в'язкість) можна, змінюючи розміри, склад та морфологію неметалевих включень частинками карбіду титану (TiC) в розплавленій зоні зварювальної ванни [3].

Контактна особа: Д. Ю. ЄРМОЛЕНКО, e-mail: ermolenkopewi@gmail.com

Зразки ЗЗ виготовляли відповідно до вимог ISO 26304:2017 [4]. Зварювали ПД (ISO 18276-A-T62 2Mn2,5NiMoPM2H5) діаметром 1,6 mm у середовищі захисного газу (Ar + CO_2), а стикові ЗЗ – з використанням постійного струму зворотної полярності 240…250 A за напруги горіння дуги 31…32 V. Швидкість зварювання – в межах 10…12 m/h, погонна енергія процесу при цьому 26…28 J/cm. Зі ЗЗ вирізали поперечні зразки для досліджень структури та фазового складу металу швів, а також визначення механічних характеристик за одновісного розтягу та ударного згину (відповідно до вимог ISO 5173:2009).

За використання під час зварювання ПД базової системи легування C–Mn–Cr–Ni–Mo–Si–Cu (варіант I) отримали МШ із структурою бейніту, яка за своїми механічними характеристиками відповідала низьколегованим сталям категорії міцності К75. Додатково дослідили вплив легування МШ з використанням під час зварювання ПД базового складу, до шихти якого додавали відповідні порошки титану (варіант II, марка FeT70 за ISO 5454:1980) чи карбіду титану (варіант III, марка 28/20 за ТУ 1798-75420116-2006) з розмірами часточок до 1 μm, які потрапляли до зварювальної ванни у нерозплавленому вигляді.

Структуру, фазовий склад та механічні властивості МШ отриманих ЗЗ за випроб одновісним розтягом та ударом досліджували на поперечних (стосовно зварного шва) зразках за допомогою методів оптичної (на мікроскопі NEOPHOT-30) і електронної (на сканівному мікроскопі JSM35CF) мікроскопії та рентгеноспектрального аналізу (з використанням приставки INCA Energy 350). Для визначення механічних характеристик використали універсальну випробувальну машину INSTRON 8800, для зварювання – устаткування фірми Fronius, для кількісного аналізу співвідношення структурних складників та розподілу неметалевих включень за розмірами та складом – оригінальні комп'ютерні програми (розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України [5]).

Результати та їх обговорення. Хімічний склад трьох досліджених варіантів МШ та їхні механічні характеристики за розтягу та удару наведено в табл. 1 та 2 відповідно. Бачимо практично однаковий (в межах похибки вимірювання) хімічний склад отриманих варіантів МШ (табл. 1). І попри це отримали помітну різницю між ними за механічними характеристиками (табл. 2). Це особливо чітко видно на варіанті III МШ, для якого за незначного зниження обох характеристик міцності спостерегли найсуттєвіше збільшення характеристик пластичності та ударної в'язкості (причому в широкому діапазоні температур випробувань на удар і, що найважливіше, за низькотемпературних випроб). Звідси зробили висновок, що не з відмінностями за хімічним складом трьох варіантів МШ слід пов'язувати зміну їхніх механічних характеристик.

Таблиця 1. Хімічний склад трьох варіантів МШ, отриманих з використанням ПД (mass%)

Варіант МШ	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb
I	0,050	0,301	1,30	0,025	0,014	0,17	2,50	0,27	0,043	0,006	0,006
II	0,050	0,290	1,32	0,024	0,014	0,16	2,19	0,27	0,039	0,019	0,005
III	0,054	0,263	1,28	0,025	0,011	0,13	2,22	0,26	0,037	0,009	0,007

За результатами металографічного аналізу досліджуваних варіантів МШ в їх мікроструктурі виявили складники та неметалеві включення, утворення яких типове за евтектоїдного розпаду аустеніту під час охолодження розплавленого металу. Вміст окремих мікроструктурних складників (зерномежовий аллотріоморфний ферит (ЗАФ); крізьзеренний полігональний ферит (КПФ) у вигляді верхнього

та нижнього бейніту; ферит відманштетта (ФВ); крізьзеренний ГФ; фаза, до складу якої входили мартенсит, аустеніт і карбіди (МАК)) у досліджених варіантах МШ наведений у табл. 3.

Таблиця 2. Механічні характеристики трьох варіантів МШ, отриманих з використанням ПД

Варіант МШ	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	*KCV*, J/cm^2						Тип включень (у шихті)
	МРа		%		Температура випробувань, °С						
					+20	0	–20	–40	–60	–70	
I	774,9	738,4	16,1	54,4	92,5	87,5	74,2	63,3	58,8	–	–
II	787,5	737,1	16,1	51,0	60,0	58,12	57,08	52,08	56,3	–	FeTi
III	715,6	643,9	19,4	62,9	112,6	93,7	84,6	73,1	64,4	60,6	TiC

Таблиця 3. Вміст мікроструктурних складників, виявлених в аналізованих варіантах МШ

Варіант МШ	Частка складників, vol.%				
	ЗАФ	КПФ	ФВ	ГФ	МАК
I	14	26	9	48	3
II	22	16	7	53	2
III	9	9	3	77	2

Для МШ (варіант I), сформованого з використанням ПД базової системи легування, характерні найвищі показники міцності, формування мікроструктури з досить високим вмістом КПФ і виділеннями вздовж меж зерен ЗАФ (рис. 1*a*). При цьому КПФ формувався як у вигляді бейнітної фази, так і масивного фериту, а ЗАФ виявили як у вигляді голкової фази, так і фериту відманштетта. У складі неметалевих включень спостерігали оксиди алюмінію та кремнію, з додатковими виділеннями на основі сірки всередині них. Для структури з підвищеним вмістом бейнітної фази і відносно низьким вмістом ГФ (рис. 1*b*, варіант II) характерна найнижча пластичність (за величиною ψ).

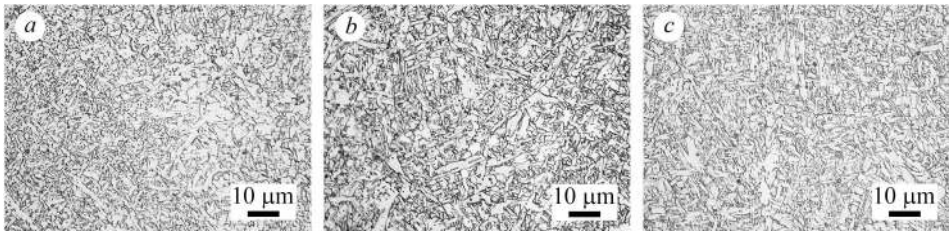

Рис. 1. Мікроструктури МШ варіантів I (*a*), II (*b*) і III (*c*), отримані з використанням оптичного мікроскопа.

Fig. 1. Microstructure of the weld metal of variants I (*a*), II (*b*) and III (*c*) obtained using an optical microscope.

За потрапляння з розплаву до зварювальної ванни часточок карбіду титану в структурі МШ (варіант III) дещо збільшився вміст включень розміром від 0,3 до 0,8 μm, причому аллотріоморфний ферит виділявся вже не у вигляді оторочок вздовж меж зерен, а відокремленими розрізненими блоками (рис. 1*c*). Всередині зерен ферит був переважно у вигляді верхнього бейніту, але внаслідок зменшен-

ня його вмісту (через зростання кількості фаз з голковою морфологією) характеристики пластичності та ударної в'язкості МШ підвищилися (табл. 2). Дещо знизилася також частка відманштеттового фериту, причому формувався він не у вигляді масивів ЗАФ, а всередині зерен.

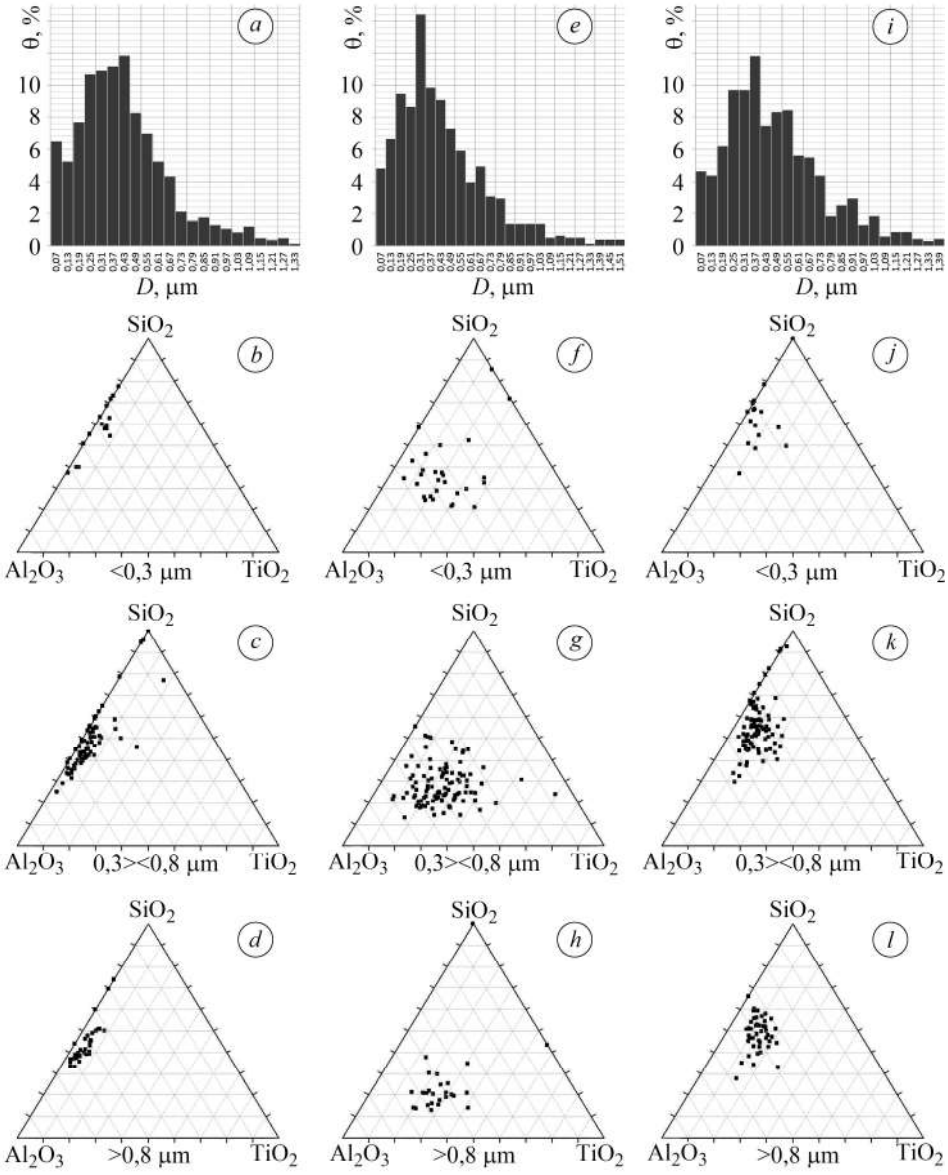

Рис. 2. Гістограми розподілів за розміром (*a*, *e*, *i*) та потрійні діаграми складу неметалевих включень завбільшки до 0,3 (*b*, *f*, *j*), в діапазоні 0,3…0,8 (*c*, *g*, *k*) і понад 0,8 μm (*d*, *h*, *l*) у металі швів варіантів I (*a*–*d*), II (*e*–*h*) і III (*i*–*l*).

Fig. 2. Size distributions histograms (*a*, *e*, *i*) of the nonmetallic inclusions in the weld metal of I (*a*–*d*), II (*e*–*h*) and III (*i*–*l*) variants and ternary diagrams of their composition for the inclusions sizes up to 0.3 (*b*, *f*, *j*) in the range 0.3...0.8 (*c*, *g*, *k*) and more than 0.8 μm (*d*, *h*, *l*).

Комплексний аналіз включень (їхньої морфології, дисперсності, складу (рис. 2)) показав, що вплив неметалевих включень на мікроструктуру МШ залежить не лише від хімічного складу, але також і від розмірів та щільності розта-

шування в металевій матриці. На основі комп'ютерного оброблення результатів розподілу неметалевих включень за розміром і складом із загального масиву даних виділили за цими ознаками три основні групи.

Встановили, що серед включень розміром до 0,3 μm (рис. 2*b*, *f*, *j*) в структурі МШ всіх трьох варіантів найчастіше траплялися окремі сполуки алюмінію або кремнію (іноді ці сполуки виявляли в межах одного і того ж включення. Серед включень розміром від 0,3 до 0,8 μm (рис. 2*c*, *g*, *k*) в основному були сполуки алюмінію і титану. Але спостерігали також незначну кількість сполук марганцю і кремнію, інколи сполук зі сіркою. Включення завбільшки понад 0,8 μm (рис. 2*d*, *h*, *l*) були сполуками алюмінію, титану, марганцю, кремнію і сірки, причому сумарний вміст марганцю і кремнію в них подекуди перевищував 50% від загального вмісту у включеннях.

За результатами електронно-мікроскопічних досліджень структури встановили, що однофазні включення типу простих оксидів (Al_2O_3, TiO_n і SiO_2) завбільшки до 0,3 μm не вплинули на утворення ГФ (рис. 3*a*–*c*). Включення таких розмірів сприяли формуванню структур гартування (типу фериту відманштетта й верхнього бейніту). Багатофазні включення розміром понад 0,8 μm, які містили силікати марганцю, оксиди алюмінію й титану, активно сприяли зародженню полігональних структурних складників у МШ низьколегованих високоміцних сталей усіх трьох варіантів (рис. 3).

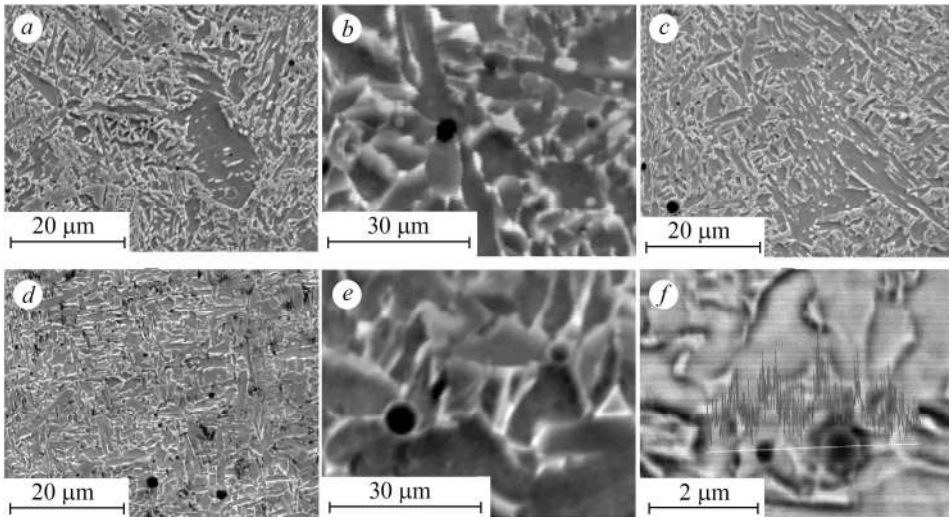

Рис. 3. Мікроструктури МШ варіантів I (*a*, *b*), II (*c*) та III (*d*, *e*), отримані з використанням електронного мікроскопа і розподіл вуглецю в околі неметалевого включення в металі шва варіанта III (*f*).

Fig. 3. Microstructures of weld metals of I (*a*, *b*), II (*c*) and III (*d*, *e*) variants obtained using an electron microscope and carbon distribution in the vicinity of the nonmetallic inclusion in the weld metal of variant III (*f*).

Комплексні (багатофазні) включення – ефективніші центри зародження ГФ порівняно з простими оксидами й нітридами. Для аналізованих варіантів МШ у неметалевих включеннях з двома або більше фазами їх склад змінювався від центру до поверхні включення (рис. 3*d*, *e*). Найпомітніший їх вплив виявили тоді, коли на зовнішній поверхні багатофазних включень завбільшки 0,3…0,8 μm розташовувалися нанорозмірні виділення карбідної фази. Зокрема, такі включення спостерігали за потрапляння до ванни розплаву зварювальної дуги карбідів титану поза зоною горіння (МШ, варіант III). За допомогою сканування вмісту вугле-

цю в двох поряд розташованих неметалевих включеннях на фоні металевої матриці в структурі МШ варіанта ІІІ виявили, що включення карбідної фази на периферії сприяє формуванню дрібнодисперсної феритної структури МШ (рис. 3*f*). Різний також склад таких багатофазних комплексних включень у центрі та на поверхні: у центрі – оксиди, а на поверхні – острівки карбідів. На основі виявленої неоднорідності складу включень припустили, що їх центральна частина сформувалася на стадії кристалізації, а периферійна (у вигляді карбідів типу TiC на їх поверхні) – з пересиченого розчину в міждендритних об'ємах МШ та в результаті дифузії вуглецю з твердого розчину під час його подальшого охолодження.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що для отримання мікроструктури металу шва ЗЗ з потрібними показниками міцності, пластичності і ударної в'язкості необхідні неметалеві включення певного складу, вмісту, розмірів і геометрії. Отримані результати показали, що такими є багатофазні включення завбільшки від 0,3 до 0,8 μm, де в зовнішньому шарі переважали нанорозмірні виділення типу карбіду титану, в осерді – оксид алюмінію, з наближенням до їх зовнішньої поверхні – сполуки типу галакситу та оксиди титану, а на зовнішні поверхні – виділення сульфідів чи карбідів. Частка таких включень на перевищувала 30%, але саме вони впливали на формування дрібнодисперсної мікроструктури металу шва зі складом ІІІ варіанта і забезпечили йому найліпші механічні характеристики.

РЕЗЮМЕ. Проанализирована возможность влияния на механические свойства сварных швов путем контроля содержания игольчатого феррита в структуре металла шва. Реализована методика добавления в расплав металла в сварочной ванне порошка из карбидов титана. Установлено, что обнаруженные в структуре металла шва неметаллические включения размером от 0,3 до 0,8 μm ответственны за формирование составляющих микроструктуры и механические свойства металла сварных швов.

SUMMARY. The possibility of changing the welded joints mechanical properties by controlling the content of acicular ferrite in the weld metal structure is analysed. A method of adding titanium carbides powder to the metal melt in a welding bath is realized. It is established that nonmetallic inclusions of 0.3 to 0.8 μm in the weld metal structure are responsible for the formation of the structural constituents and the mechanical properties of the weld joint.

1. *Takamura J. and Mizoguchi S.* Roles of oxides in steels performance – Metallurgy of oxides in steels // Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong. – Tokyo: ISIJ, 1990. – Vol. 1. – P. 591–597.
2. *Microstructure* control of steels through dispersoid metallurgy using novel grain refining alloys / O. Grong, L. Kolbeinsen, van der C. Eijk, G. Tranell // ISIJ Int. – 2006. – № 46. – P. 824–831.
3. *Головко В. В., Степанюк С. М., Єрмоленко Д. Ю.* Дослідження впливу наноутворень в металі на формування мікроструктури зварного шва та його механічні властивості // Сб. науч. тр. "Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер: Стародубовские чтения". – Днепропетровск: ГВУЗ "ПГАСА", 2012. – Вып. 64. – С. 155–159.
4. *ISO 26304:2017* Welding consumables – Solid wire electrodes, tubular cored electrodes and electrode-flux combinations for submerged arc welding of high strength steels – Classification. – Publ. date 2017-11.
5. *Єрмоленко Д. Ю.* Модифікування дендритної структури металу зварних швів високоміцних низьколегованих сталей дисперсними інокуляторами: дис. канд. техн. наук. – Київ, 2017. – 196 с.

Одержано 08.02.2018