

ВПЛИВ НАНОРОЗМІРНИХ СКЛАДОВИХ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНОГО ШВА ВИСОКОМІЦНИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

В. В. Головка, д-р техн. наук;
С. М. Степанюк, канд. техн. наук;
Д. Ю. Єрмоленко, аспірант

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

Анотація. Розглянуто можливості впливу на механічні властивості зварних швів високоміцних низьколегованих сталей шляхом контролю співвідношення структурних складових. Перевірено ефективність додавання в рідкий метал зварювальної ванни карбідів титану. Установлено, що неметалеві включення розміром 0,3...0,8 мкм спричиняють значний вплив на формування мікроструктури і рівень механічних властивостей металу зварних швів.

Ключові слова: неметалеві включення, нанорозмірні складові, формування мікроструктури, механічні властивості.

Аннотация. Рассмотрены возможности влияния на механические свойства сварных швов высокопрочных низколегированных сталей путем контроля соотношения структурных составляющих. Проверена эффективность добавления в жидкий металл сварочной ванны карбидов титана. Установлено, что неметаллические включения размером 0,3...0,8 мкм оказывают значительное влияние на формирование микроструктуры и уровень механических свойств металла сварных швов.

Ключевые слова: неметаллические включения, наноразмерные составляющие, формирование микроструктуры, механические свойства.

Abstract. The possibilities of impact on the welded joints mechanical properties of high-strength low-alloyed steels were considered by means of the ratio control of the structural components. The efficiency of titanium carbide adding into the liquid metal of the welding pool has been checked. It was detected that the non-metallic inclusions with a size of 0.3 to 0.8 microns cause a significant impact on the welded joints microstructure formation and the level of the welded joints mechanical properties.

Keywords: non-metallic inclusions, nanosized components, microstructure formation, mechanical properties.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При формуванні структури зварних швів високоміцних низьколегованих (ВМНЛ) сталей можливості впливу на їх 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.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

З метою забезпечення виробництва сталі з контрольованим вмістом у структурі голчастого фериту (ГФ) виникла необхідність урахувати процеси, що перебігають при її виготовленні. У 1990 році автори роботи [3] ввели поняття «оксидна металургія», під яким розуміють використання певних неметалевих включень як гетерогенних центрів зародження структури в процесі кристалізації. Пізніше було запропоновано поняття «інжиніринг включень» для розвитку знань про керування кількістю й розподілом за розмірами включень у сталі в процесі ківшової об-

робки і лиття [1]. Через майже десятиліття, в 2006 році, Гронг з колегами [2] об'єднав ці дві ідеї, припустивши, що можливо використовувати інжиніринг включень для оптимізації мікроструктури сталі з метою поліпшення її механічних властивостей. Неметалеві включення (оксиди, сульфід, карбіди або нітриди) розміром менше 1 мкм, які можуть сприяти зародженню ГФ, він назвав «дисперсоїдами». Їх виділили в особливу групу тому, що через свої малі розміри вони не спричиняють негативного впливу на зниження механічних властивостей, але впливають на умови формування мікроструктури металу.

МЕТА РОБОТИ — формування високов'язкої мікроструктури зварних швів шляхом отримання в металі неметалевих включень, прогнозованих по об'ємній частці, складу та розподілу за розмірами.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Методика досліджень. Для дослідження можливості підвищення показників міцності та в'язкості металу швів за рахунок розмірів, складу та морфології неметалевих включень у рідкий метал зварювальної ванни вводили порошок титану та карбіди титану.

Зварювання виконували в середовищі захисного газу ($Ar+CO_2$) порошковим дротом діаметра 1,6 мм. Зварювання стикових з'єднань з листів сталі СтЗсп товщиною 20 мм виконували відповідно до вимог ISO 14171:2010 на постійному струмі зворотної полярності 240...250 А при напрузі на дузі 31–32 В. Швидкість зварювання витримували в межах 10...12 м/год, при цьому погонна енергія процесу була 26...28 Дж/см.

Базова система легування С–Mn–Cr–Ni–Mo–Si–Cu, реалізована у варіанті №0, мала на меті формування металу швів з ферито-бейнітною структурою, яка за своїми механічними властивостями відповідає низьколегованим сталям категорії міцності K75. Вплив легування металу швів титановим порошком досліджували на зразках металу швів №4, а введення карбіду титану — на зразках металу швів №6. Карбіди титану вводили до зварювальної ванни через порошок дріт у вигляді частинок розміром не більше 0,5 мкм.

Зі зварних з'єднань вирізали поперечні зразки для дослідження структури та фазового складу металу швів, а також механічних властивостей на одноісній розтяг (стандартні циліндричні зразки, Ми-12) та ударний згин (зразки Шарпі).

При виконанні досліджень використовували методи оптичної та електронної мікроскопії, рентгено-спектрального аналізу. Для проведення робіт були залучені оптичний мікроскоп NEOPHOT-30, електронний скануючий мікроскоп 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 і складом.

Таблиця 1. Хімічний склад металу дослідних швів

Номер шва	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

Таблиця 2. Механічні властивості металу дослідних швів

Номер шва	Механічні властивості				Ударна в'язкість (KCV) при температурі, °C					
	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	+20	0	-20	-40	-60	-70
	МПа		%							
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	60,6

Таблиця 3. Вміст окремих складових мікроструктури металу швів

Номер 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

Зразки для аналізу розподілу неметалевих включень за розмірами виготовлялися за допомогою полірувальних суспензій фірми Struers. Для металографічного аналізу зразки оброблювали в 4%-му розчині азотної кислоти (HNO_3) в етиловому спирті (C_2H_5OH).

Результати досліджень. Хімічний склад металу досліджених швів (наплавлений метал) наведено в табл. 1, а механічні властивості — у табл. 2.

У 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 алотріоморфний ферит (ЗГА); внутрізеренний полігональний ферит (ВПФ); ферит Відманштетта (ФВ); внутрізеренний ГФ; верхній і нижній бейніт; фаза, що містить мартенсит, аустеніт і карбіди (МАК). Вміст окремих складових мікроструктури металу швів наведено в табл. 3.

Вихідна система легування металу дослідних швів (шов №0), яка забезпечує високі показники міцності, сприяє формуванню мікроструктури з досить високим вмістом внутрішньозеренного полігонального фериту і довгими виділеннями по границях зерен алотріоморфного фериту. Внутрішньозеренний ферит формується як у вигляді бейнітної фази, так і у формі масивного фериту, а зернограничний ферит сприяє виділенню голчастої фази у вигляді фериту Відманштетта (рис. 1). Неметалеві включення містять у собі оксиди алюмінію та кремнію, у складі яких зустрічаються виділення на основі сірки (рис. 2). Така структурна композиція разом з відносно низьким вмістом голчастого фериту характеризується низькою пластичністю ($\delta \approx 16\%$).

На зразках шва №4 досліджували вплив легування металу титаном, який було введено до зварювальної ванни через електродний дріт. У мікроструктурі зварного шва зберігаються довгі стрічки алотріоморфного фериту на границях зерен (рис. 3), а внутрізеренний ферит формується у вигляді масивних блоків, що містять велику кількість неметалевих включень і структури верхнього бейніту. Відносно невеликий вміст ГФ (50...55%) у поєднанні з масивними виділеннями внутрізеренного фериту, армованого неметалевими включеннями, не дозволяє підвищити рівень пластичності металу зварного шва ($\delta \approx 16\%$). Об'ємна частка неметалевих включень порівняно зі швами №0 не змінюється, але в їх складі з'являються сполуки титану, а частка сірки суттєво знижується (рис. 4).

У мікроструктурі шва №6 алотріоморфний ферит виділяється на границях зерен не у вигляді довгих оторочок, а як окремі розрізнені блоки (рис. 5). Внутрізеренний

ферит формується переважно у вигляді верхнього бейніту, але зниження його вмісту за рахунок зростання голчастої морфології приводить до підвищення показників пластичності ($\delta \approx 19,4\%$) і в'язкості (KCV_{-70} не показує суттєвого погіршення пластичності). Помітно знижується частка фериту Відманштетта, при цьому він зароджується не з масивів алотріоморфного фериту, а безпосередньо в тілі зерен. Уведення до зварювальної ванни поза зоною зварювальної дуги карбіду титану (шов №6) приводить до деякого збільшення вмісту включень розміром 0,3...0,8 мкм (рис. 6).

Комплексний аналіз включень (морфологія, дисперсність, склад) показав, що вплив неметалевих включень на мікроструктуру 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

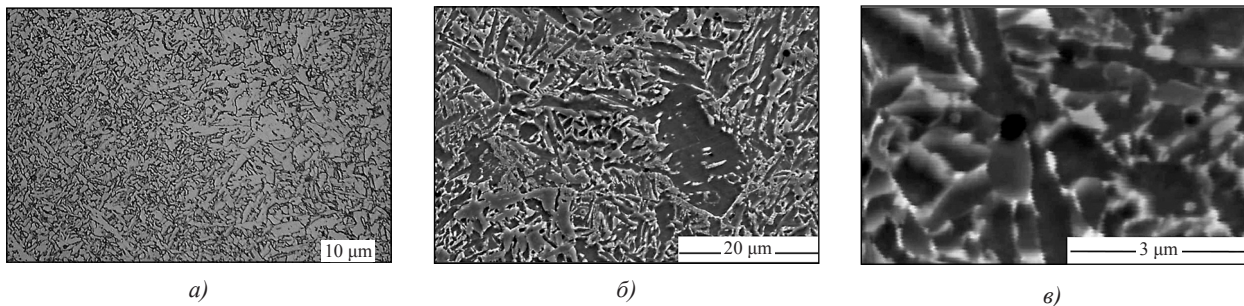


Рис. 1. Мікроструктура металу шва зразків №0: а — оптичне зображення; б, в — електронне зображення

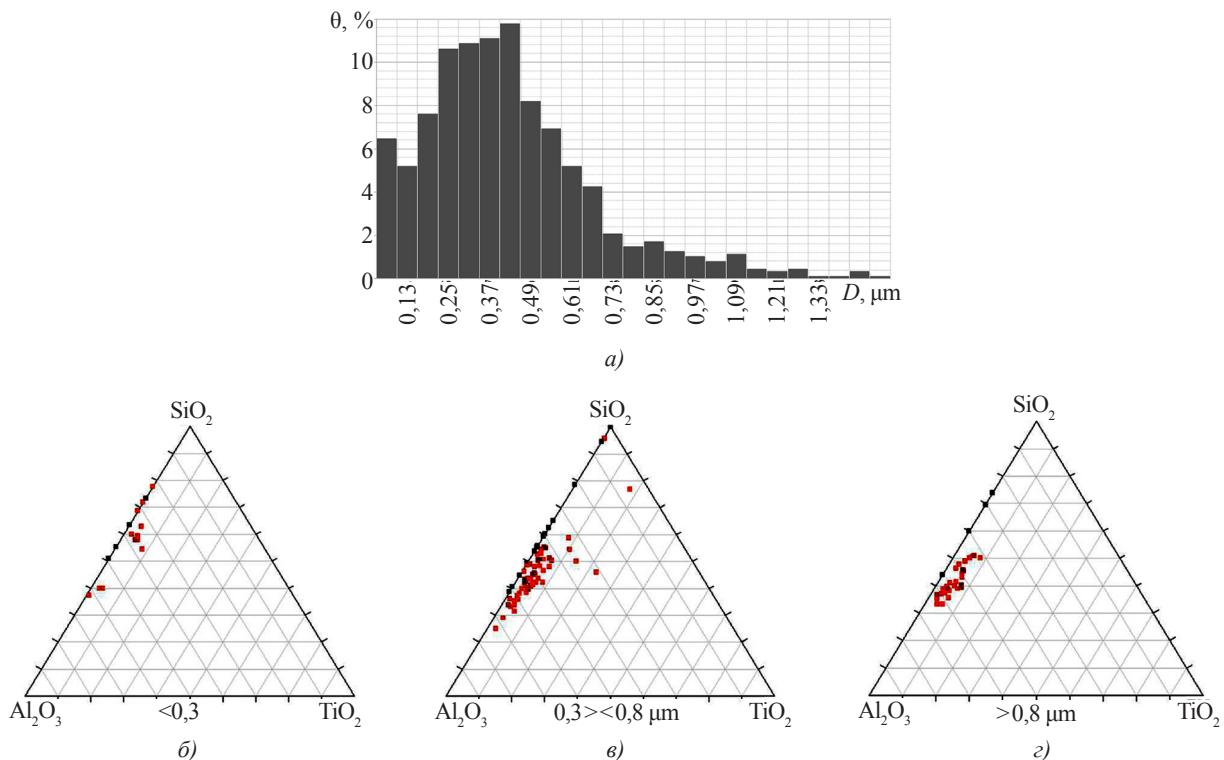


Рис. 2. Гістограма розподілу за розміром (а) та потрійні діаграми складу неметалевих включень у металі шва №0 (б, в, г) різних діапазонів розмірів

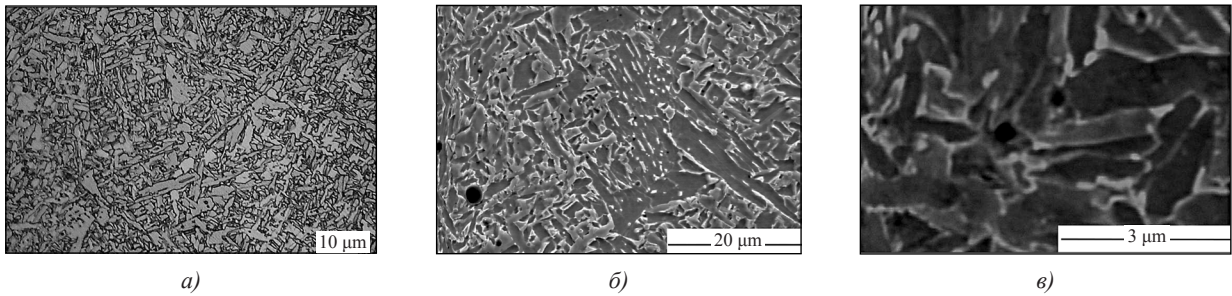


Рис. 3. Мікроструктура металу шва зразків №4: а — оптичне зображення; б, в — електронне зображення

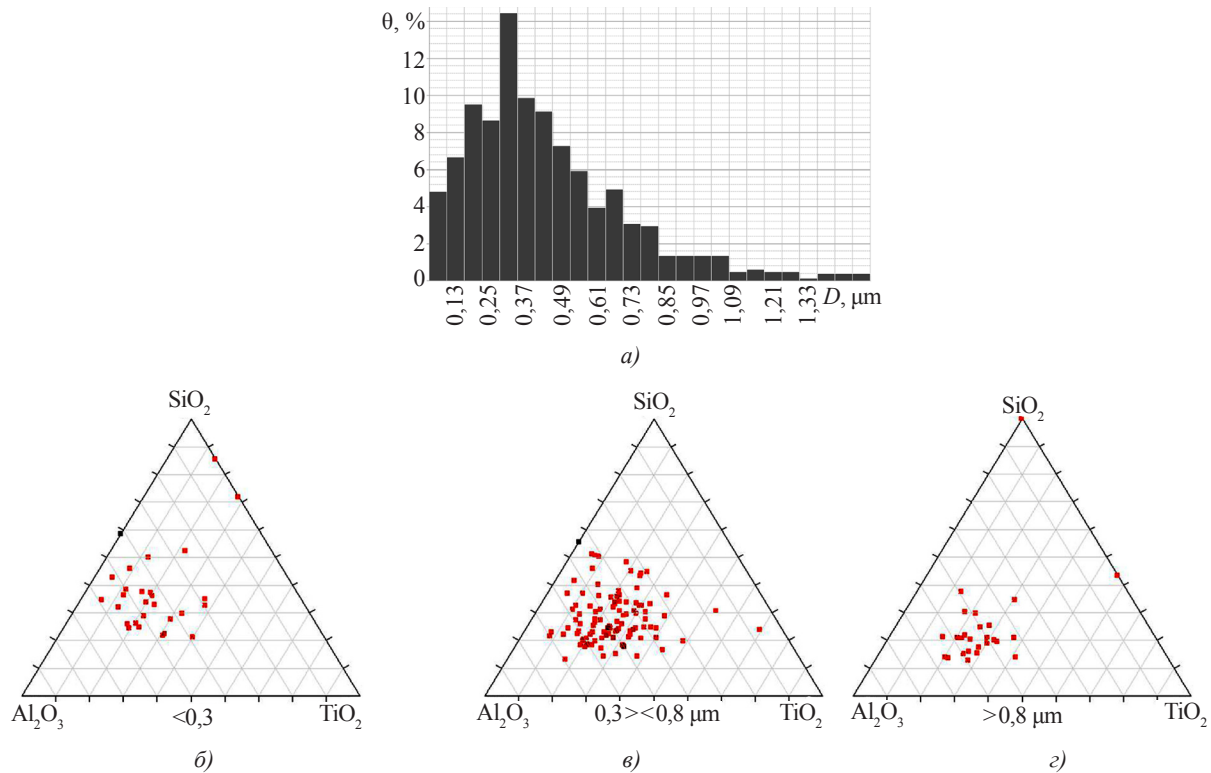


Рис. 4. Гістограма розподілу за розміром (а) та потрійні діаграми складу неметалевих включень у металі шва №4 (б, в, г) різних діапазонів розмірів

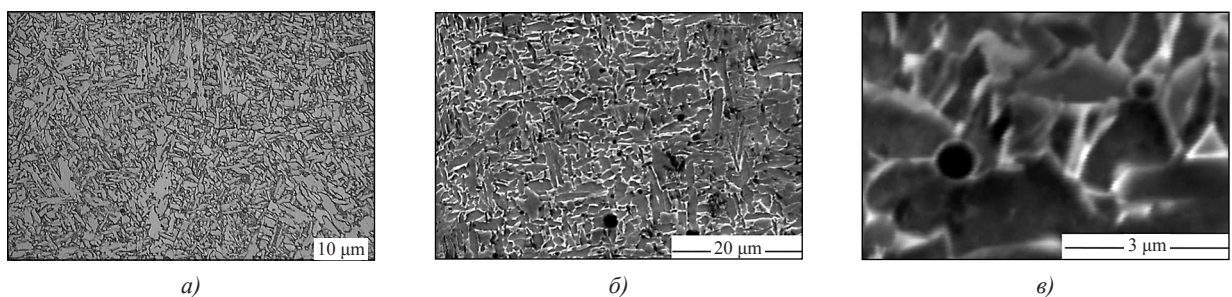


Рис. 5. Мікроструктура металу шва зразків №6: а — оптичне зображення; б, в — електронне зображення

дозволила виділити із загального масиву даних три основні групи за цими ознаками. Потрійні діаграми хімічного складу включень розмірами до 0,3 мкм, 0,3...0,8 та більше 0,8 мкм, що входять до складу цих груп, наведено на рис. 2, 4 та 6 для зразків №0, 4 та 6 відповідно.

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 0,3...0,8 мкм основну масу складають сполуки алюмінію і титану, можлива

також незначна кількість сполук марганцю і кремнію, зустрічаються сполуки сірки.

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

Було виявлено, що однофазні включення розміром не більше 0,3 мкм типу простих оксидів (Al_2O_3 , TiO_n і SiO_2) не спричиняють значного впливу на утворення ГФ. Такі включення 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 за-

родженню полігональних структурних складових у металі швів низьколегованих високоміцних сталей (див. рис. 1, б, в; 3, б, в; 5, б, в).

Комплексні включення (багатофазні включення) є більш ефективними центрами зародження голчастого фериту в порівнянні з простими оксидами й нітридами. На рис. 7 показано, що в металі зварних швів ВМНЛ у неметалевих включеннях, що містять дві або більше фази, склад фаз змінюється від центра до поверхні включення.

Найбільш 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

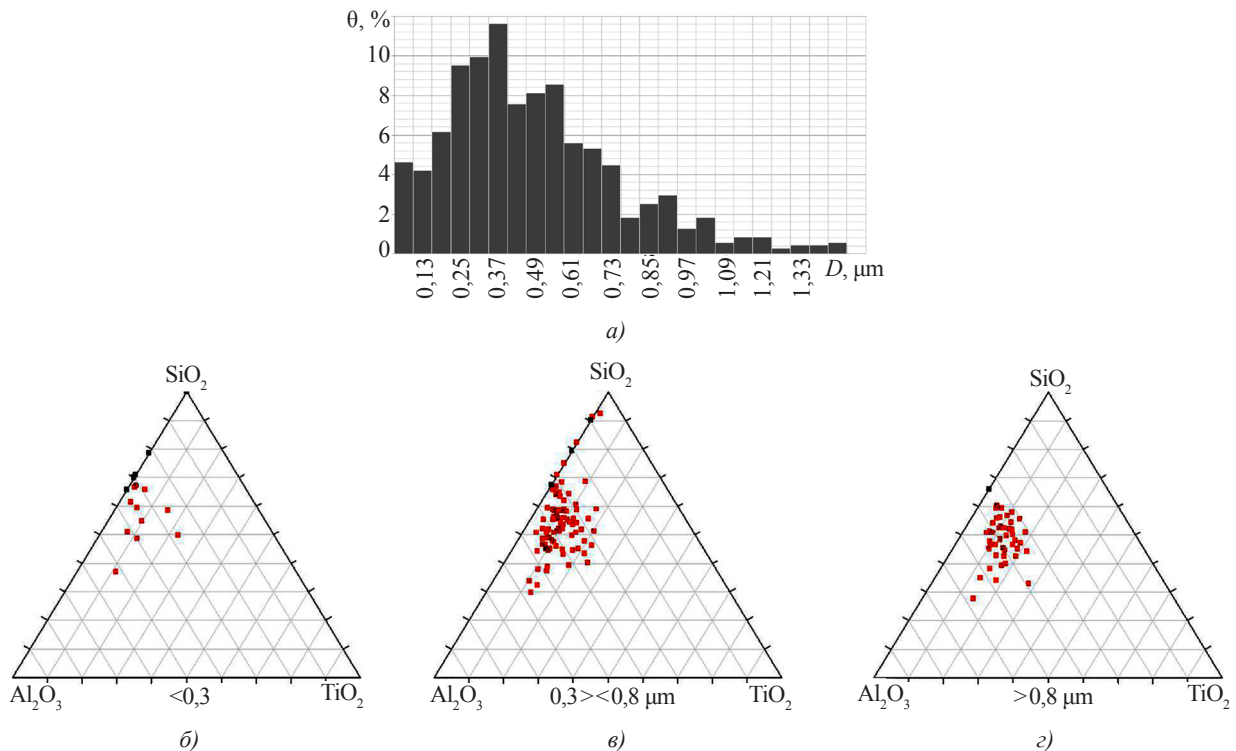


Рис. 6. Гістограма розподілу за розміром (а) та потрібні діаграми складу неметалевих включень у металі шва №0 (б, в, з) різних діапазонів розмірів

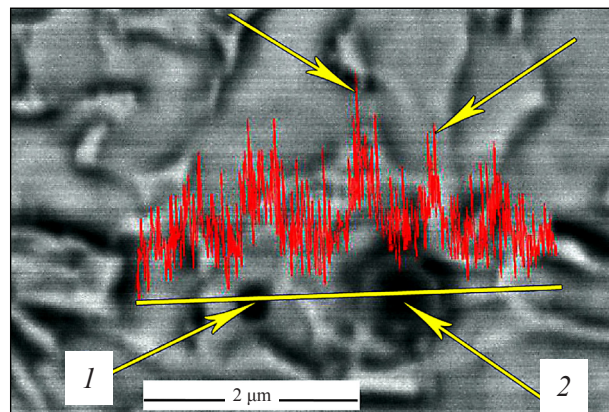


Рис. 7. Профіль розподілу вуглецю при лінійному скануванні зони металу шва №6: 1 — однофазне неметалеве включення; 2 — багатофазне неметалеве включення

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

Наведено результати сканування за вмістом вуглецю двох поряд розташованих неметалевих включень у структурі металу шва №6 (див. рис. 7), з яких видно, що наявність карбідної фази на периферії включення помітно сприяє формуванню дрібнодисперсної феритної структури.

Такі включення являють собою 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 у результаті дифузії вуглецю в твердому розчині металу при його подальшому охолодженні.

ВИСНОВКИ

1. Установлено, що присутність певної кількості неметалевих включень у металі зварних швів сприяє отриманню мікроструктури, яка здатна забезпечити високі показники міцності, пластичності і в'язкості металу.

2. Аналіз отриманих даних показав, що позитивний вплив на формування структури і механічних властивостей металу спричиняють неметалеві включення розміром 0,3...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 зовнішній поверхні розташовані виділення сульфідної чи карбідної фази. Частка таких включень на перевищує 30%, але саме вони визначають умови формування мікроструктури і рівень механічних властивостей металу зварних швів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds / T.K. Lee, H.J. Kim, B.Y. Kang and S.K. Hwang // *ISIJ Int.*, 40 (2000). — P. 1260–1268.
- [2] Microstructure Control of Steels through Dispersoid Metallurgy Using Novel [Text] / O. Grong, L. Kolbeinsen, C. Eijk, G. Tranell. — Grain Refining Alloys // *ISIJ Int.* — 2006. — nr 46. — P. 824–831.
- [3] **Takamura, J.** Roles of oxides in steels performance [Text] / J. Takamura, S. Mizoguchi. — *Metallurgy of oxides in steels // Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo.* — 1990. — Vol. 1. — P. 591–597.

© В. В. Головка, С. М. Степанюк, Д. Ю. Єрмоленко

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *О. М. Дубовий*

Статтю розміщено у Віснику НУК №5, 2012