

УДК 621.791  
К 89

## ВПЛИВ НАНООКСИДІВ ТИТАНУ НА РОЗПОДІЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ І СТРУКТУРУ МЕТАЛУ ШВА НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

В. Д. Кузнецов, д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup>;  
І. В. Смирнов, д-р техн. наук<sup>1</sup>;  
К. П. Шаповалов, інж.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

<sup>2</sup>ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ

**Анотація.** Досліджено вплив наноксиду титану на розподілення неметалевих включень і структуру металу шва при зварюванні низьколегованих сталей. Показано, що введення у зварювальну ванну наноксиду титану в об'ємній частці 0,5 об.% сприяє утворенню голчатих форм фериту з підвищеними механічними властивостями.  
**Ключові слова:** зварний шов, наноксиди, включення, структура.

**Аннотация.** Исследовано влияние наноксидов титана на распределение неметаллических включений и структуру металла шва при сварке низколегированных сталей. Показано, что введение в сварочную ванну наноксидов титана в объемной части 0,5 об.% способствует образованию игольчатых форм феррита с повышенными механическими свойствами.  
**Ключевые слова:** сварной шов, наноксиды, включения, структура.

**Abstract.** The effect of titanium nanooxide on distribution of non-metallic inclusions and structure of weld metal under the welding of low alloyed steels has been studied. It is shown that the implementation into the welding pool of titanium nanooxide in the volume part of 0,5% promotes the formation of needle-shaped ferrite forms with increased mechanical properties.

**Keywords:** welding joint, nanooxides, inclusions, structure.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

За останні десятиліття розповсюджена раніше думка про неметалеві включення як шкідливі домішки металургійного процесу змінилася на підтверджене численними дослідженнями твердження, що включення можуть сприяти формуванню феритних мікроструктур голчастого типу, здатних забезпечити поєднання міцнісних характеристик металу швів з високим рівнем в'язкості. Формування саме такого типу структур є актуальним при зварюванні низьколегованих високоміцних сталей.

Інжиніринг включень можливо використовувати для оптимізації мікроструктури сталі з метою поліпшення її механічних властивостей [5]. Включення (оксиди, сульфід, карбід або нітрид) розміром менше 1 мкм, які сприяють зародженню голчатого фериту (ГФ), виділені в особливу групу, оскільки через свої малі розміри вони не спричиняють негативного впливу на зниження механічних властивостей, але впливають на умови формування мікроструктури металу.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі [3] наведено результати вивчення зародження ГФ на включеннях у низьколегованій сталі і показано, що включення розміром понад 1 мкм мають більше можливості для зародження фериту, вищий вміст ГФ забезпечують включення діаметром від 0,5 до 0,8 мкм.

Позитивна роль нанокарбідів титану такого розмірного діапазону на формування структури і властивостей зварного шва низьколегованих сталей показана в роботі [1].

За результатами аналізу літературних джерел [2, 4, 6, 7] було виявлено, що ефективною нанополукою для впливу на структуру матеріалу може бути наноксид титану, і це обумовило проведення досліджень з оцінки структурних змін у металі шва при зварюванні низьколегованих високоміцних сталей із залученням наноксиду титану.

**МЕТА СТАТТІ** – визначення особливостей розподілення та впливу неметалевих включень на структуру металу шва високоміцних низьколегованих сталей з використанням нанорозмірних оксидів титану.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження проводили на сталі 10Г2ФБ товщиною 10 мм, яка має підвищену структурну неоднорідність, що обумовлює зниження показників фізико-механічних і службових характеристик зварних з'єднань нижче технічного рівня, потенційно закладеного даним хімічним складом. Для зварювання використовували дріт марки 10ХГН2СМФТЮ, базова система легування якого сприяє підвищенню стійкості аустеніту і розширенню температурного інтервалу формування бейніту.

Для зварювання застосовували апарат АДФ 302, до якого пристосовували пальник від напівавтомата КП 004УЗ. Зварювання проводили в суміші газів 72 % Ar + 28 % CO<sub>2</sub> на режимах: струм зварювання I = 170...180 А, напруга дуги U = 25...27 В, швидкість

зварювання  $V = 12,5$  м/год, витрати газу 8...9 л/год, виліт зварювального дроту 15 мм.

Уведення наноконпонентів у зварювальну ванну виконували за технологічною схемою, яка передбачала закладку присадкового матеріалу з нанопорошком оксиду титану (60 нм) у розділку крайок.

У ході металографічних досліджень визначали частку окремих складових мікроструктури металу, елементний склад та розподіл неметалевих включень.

Кількісне визначення мікроструктурних складових проводили із залученням спеціальної комп'ютерної програми.

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: включення розмірами до 0,3 мкм, 0,3...0,8 та більше 0,8 мкм.

Обробка даних за показником діаметра рівнозначного кола показала, що у вихідному стані частка включень розміром до 0,3 мкм становить 3...8 %, розміром 0,3...0,8 мкм – 2...10 % (рис. 1,а).

У структурі металу шва з наноксидом  $TiO_2-0,5$  % включення розміром до 0,3 мкм присутні в об'ємній частці 2...10 %. Зростає також до 13 % і об'ємна частка включень розміром 0,3...0,8 мкм (див. рис. 1,б).

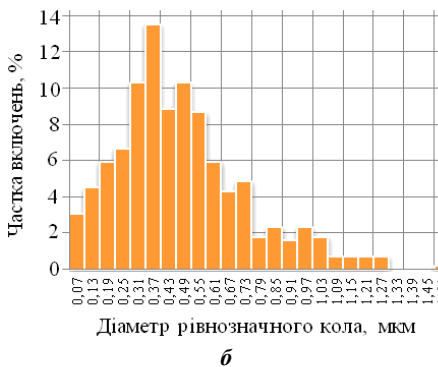


Рис. 1. Гістограма розподілення часток включень у металі зварного шва за показником діаметра рівнозначного кола у вихідному стані (а) і з наноксидом  $TiO_2-0,5$  % (б)

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 масивний (блочний) ферит (БФ), пластинчатий ферит (ПФ), внутрізеренний голчатий ферит (ГФ); внутрізеренний полігональний ферит (ВПФ), що формується у вигляді верхнього та нижнього бейніту; ферит Відманштетта (ФВ); верхній і нижній бейніт (ВБ і НБ).

Вміст окремих складових мікроструктури металу швів наведено в табл. 1.

Вихідна структура характеризується підвищеним вмістом крихких складових (блочний ферит, ферит Відманштетта, верхній бейніт) та формуванням голчатого фериту з високим коефіцієнтом форми. Мікроструктура металу шва має досить високий вміст внутрізеренного полігонального фериту з виділеннями по границях зерен алотріоморфного фериту.

Таблиця 1. Вміст окремих складових мікроструктури металу швів, %

Структура	БФ	ПФ	ГФ	ВБ	НБ	ФВ
Вихідний стан, без наноксидів	До 10	10...20	До 10	20...40	20...40	До 35
3 наноксидом $TiO_2-0,5$ %	До 10	До 10	20...40	10...20	–	До 15
3 наноксидом $TiO_2-1,0$ %	До 40	До 40	До 10...20	До 10	–	–

Внутрізеренний ферит формується як у вигляді бейнітної фази, так і масивного фериту, а зернограничний ферит виділяється як у вигляді голчатої фази, так і фериту Відманштетта (рис. 2).

Шви з такою структурою характеризуються низьким рівнем в'язкості і пластичності металу. Виміри показали, що значення мікротвердості структурних складових змінюються від HV 231 до HV 253.

За результатами аналізу розподілення, вмісту та складу неметалевих включень було встановлено, що у вихідному стані без нанодобавок їх об'ємна частка становить 0,47 %, у розмірному діапазоні 0,3...0,5 мкм – 36 %, у діапазоні 0,5...0,8 мкм – 31 %. Основна маса включень розміром до 0,8 мкм. Хімічний склад включень: силікати марганцю, що містять до 19 %  $Al_2O_3$  і до 15 %  $TiO_2$ .

Включення розміром вище 0,8 мкм є центрами зародження феритної фази голчатої морфології з коефіцієнтом форми ( $L/B$ ) 4...7 і довжиною голок до 20 мкм.

Структура металу шва з наноксидом  $TiO_2-0,5$  % характеризується (див. табл. 1) зниженим вмістом

крихких складових (блочний ферит, ферит Відманштетта, верхній бейніт) та формуванням голчатого фериту з більш прийнятним коефіцієнтом форми порівняно з вихідною структурою (рис. 3).

Шви з такою структурою характеризуються поєднанням достатньо високого рівня показників в'язкості, пластичності і міцності металу. Виміри показали, що значення мікротвердості структурних складових змінюються від HV 230 до HV 250.

За результатами аналізу розподілення, вмісту та складу неметалевих включень було встановлено, що в металі шва з наноксидом  $TiO_2-0,5\%$  об'ємна частка неметалевих включень становить 0,41 %, у розмірному діапазоні 0,3...0,5 мкм – 43 %, у діапазоні 0,5...0,8 мкм – 26 %. Основна маса включень розміром до 0,8 мкм. Хімічний склад включень: си-

лікати марганцю містять до 13 %  $Al_2O_3$  і до 13 %  $TiO_2$ .

Аналіз даних указує на збільшення об'ємної частки включень у розмірному діапазоні 0,3...0,5 мкм і відповідно зменшення в діапазоні 0,5...0,8 мкм порівняно з вихідною структурою. Включення розміром менше 0,8 мкм служать центрами зародження феритної фази голчатої морфології з коефіцієнтом форми ( $L/B$ ) 3...5 і довжиною голок до 5 мкм.

Структура металу шва з наноксидом  $TiO_2-1,0\%$  характеризується (див. табл. 1) підвищеним вмістом крихких складових (блочний ферит, грубий голчатий ферит, пластинчатий ферит) та формуванням витягнутих (видовжених) голок фериту з більш несприятливим коефіцієнтом форми порівняно зі структурою металу шва, що містить наноксид  $TiO_2-0,5\%$  (рис. 4).

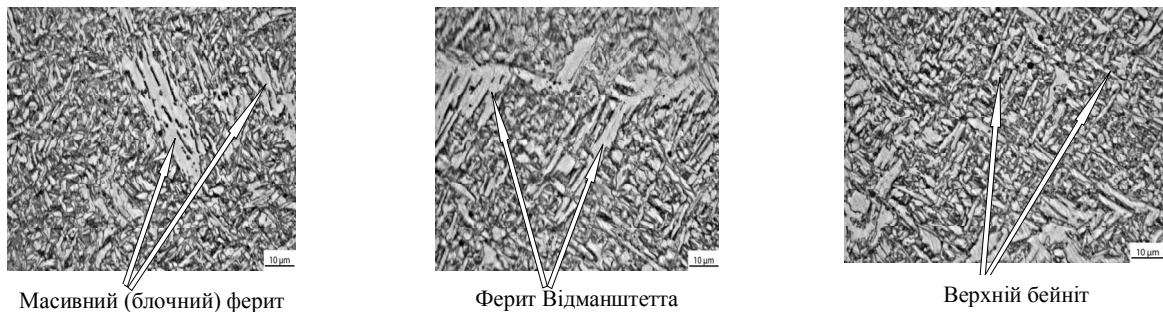


Рис. 2. Характерні структури металу шва без додавання наноксидів

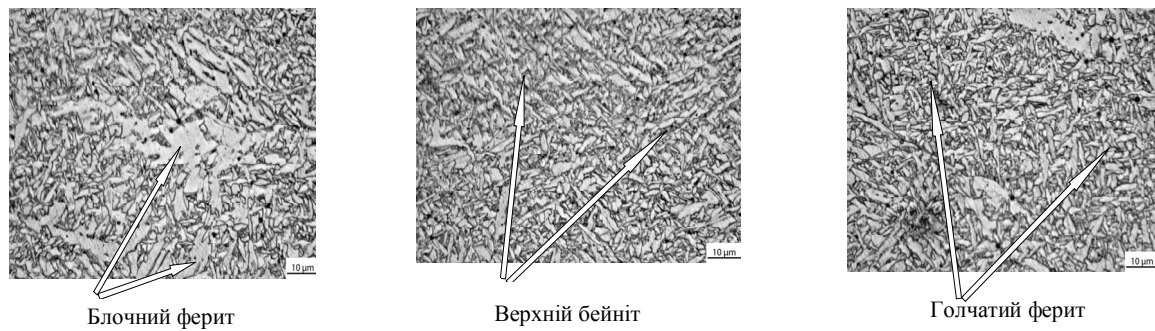


Рис. 3. Характерні структури металу шва з додаванням наноксиду  $TiO_2-0,5\%$

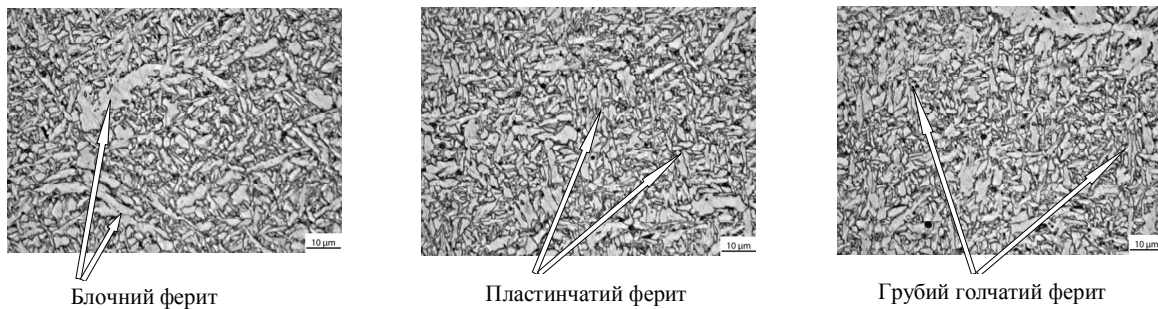


Рис. 4. Характерні структури металу шва з додаванням наноксиду  $TiO_2-1,0\%$



Шви з такою структурою характеризуються високим рівнем показників міцності і меншою в'язкістю. Виміри показали, що значення мікротвердості структурних складових змінюються від HV 230 до HV 270.

За результатами аналізу розподілення, вмісту та складу неметалевих включень було встановлено, що в металі шва з наноксидом  $TiO_2$ –1,0 % об'ємна частка неметалевих включень становить 0,80 %, у розмірному діапазоні 0,3...0,5 мкм – 52 %, у діапазоні 0,5...0,8 мкм – 19 %.

Основна маса включень розміром до 0,8 мкм. Хімічний склад включень: силікати марганцю містять до 17 %  $Al_2O_3$  і до 19 %  $TiO_2$ . Отримані результати вказують як на загальне зростання об'ємної частки включень, так і в розмірному діапазоні 0,3...0,5 мкм при введенні у ванну наноксиду  $TiO_2$ –1,0 %, але при цьому феритна фаза голчатої морфології зароджується з більш несприятливим коефіцієнтом форми ( $L/B$ ) 5...10 і довжиною голок до 20 мкм.

Таким чином, у вихідному стані без нанодобавок у металі шва неметалеві включення містять оксиди алюмінію та кремнію, у складі яких зустрічаються виділення на базі сірки. Така структурна композиція, що має підвищений вміст бейнітної фази і відносно низький вміст голчатого фериту, характеризується низькою пластичністю.

Уведення до зварювальної ванни наноксиду титану приводить до збільшення вмісту включень розміром 0,3...0,8 мкм. У мікроструктурі шва ферит виділяється на границях зерен не у вигляді оторочок, а як окремі розрізнені блоки. Внутрізеренний 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 Відманштетта, при цьому він виростає не на границях, а в тілі зерен.

У результаті дослідження було встановлено, що однофазні включення розміром не більше 0,3 мкм типу простих оксидів ( $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , MnO) не впливають на утворення голчатого фериту. Включення цього розмірного ряду сприяють формуванню гартівних структур типу фериту Відманштетта і верхнього бейніту.

Результати досліджень були підтверджені випробуваннями, проведеними на Новокраматорському машинобудівному підприємстві при зварюванні сталі А-514 товщиною 16 мм електродним дротом Св.08Г2С діаметром 1,2 мм у суміші газів 72 % Ar + + 28 %  $CO_2$  на режимах: струм зварювання  $I = 270$  А, напруга дуги  $U = 27$  В. Результати механічних випробувань наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати механічних випробувань

Структура	Границя міцності $\sigma_b$	Границя текучості $\sigma_t$	Відносне подовження	Відносне звуження	Ударна в'язкість КСВ, кДж/м <sup>2</sup>
	МПа		%		
Без нанодобавок	357	542	21	61	4,6
З наноксидом $TiO_2$ –0,5 %	514	647	12	54	9,3

Дані табл. 2 свідчать про збільшення показників міцності металу шва та особливо ударної в'язкості при зварюванні з наноксидом титану  $TiO_2$ –0,5 %.

### ВИСНОВКИ

1. При зварюванні низьколегованих сталей введення у ванну наноксиду титану впливає як на загальний вміст, так і на розподілення неметале-

вих включень різного розмірного діапазону, зокрема на збільшення об'ємної частки розміром 0,3...0,8 мкм.

2. Утворення голчатої морфологічної форми фериту з більш високими показниками механічних властивостей найбільш ефективно проявляється при введенні у зварювальну ванну наноксиду титану  $TiO_2$ –0,5 %.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Головка, В. В. Влияние нановключений на формирование структуры металла швов ферритно-бейнитных сталей (Обзор) [Текст] / В. В. Головка, Г. М. Григоренко, В. А. Костин // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 4. – С. 42–49.

[2] Принцип легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких сварных строительных сталей [Текст] / И. В. Горынин, В. В. Рыбин, В. А. Рисьшевский, Е. И. Хлусова // МиТОМ. – 2007. – № 1. – С. 9–15.

[3] Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds [Text] / T. K. Lee, H. J. Kim, B. Y. Kang, S. K. Hwang // ISIJ Int. – 2000. – № 40. – P. 1260–1268.

[4] Formation of Intragranular Acicular Ferrite Grains in a Ti-containing Low Carbon Steel [Text] / H. N. Jin, J. H. Shim, Y. W. Cho, H. C. Lee // ISIJ Int. – 2003. – № 43. – P. M3–M3.

- [5] Microstructure Control of Steels through Dispersoid Metallurgy Using Novel Grain Refining Alloys [Text] / O. Grong, L. Kolbeinsen, C. van der Eijk, G. Tranell // ISIJ Int. – 2006. – № 46. – P. 824–831.
- [6] Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn el [Text] / J. S. Byun, J. H. Shim, Y. W. Cho, D. N. Lee // Acta Mater. – 2003. – № 51. – P. 1593–1606.
- [7] **Yamamoto, K.** Effect of Boron on Intra-granular Ferrite Formation in Ti-Oxide Bearing Steel [Text] / K. Yamamoto, T. Hasegawa, J. Takamura // ISIJ Int. – 1996. – № 36. – P. 80–86.

---

© В. Д. Кузнецов, І. В. Смирнов, К. П. Шаповалов

Надійшла до редколегії 20.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2013