

УДК 621.791

**В.В. Мачуляк***Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України***МИКРОЛЕГУВАННЯ ТИТАНОМ, БОРОМ, МОЛІБДЕНОМ ТА АЛЮМІНІЄМ ПРИ МОКРОМУ ПІДВОДНОМУ ЗВАРЮВАННІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ**

*Розроблено новий порошковий дріт з системою мікролегування Ti+B. Розглянуто вплив мікролегування зварного шва титаном, бором, алюмінієм, молібденом на його механічні властивості при підводному зварюванні. Досліджено структуру металу, яка утворилася в результаті мікролегування, основні механічні показники наплавленого металу. Механічні властивості металу шва відповідають вимогам класу А Специфікації підводного зварювання ANSI/AWS D3.6.*

*Ключові слова: підводне мокре зварювання, мікролегування, голчастий ферит.*

**В.В. Мачуляк****МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНОМ, БОРОМ, МОЛИБДЕНОМ И АЛЮМИНИЕМ ПРИ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

*Разработана новая порошковая проволока с системой микролегирования Ti + B. Рассмотрено влияние микролегирования сварного шва титаном, бором, алюминием, молибденом на его механические свойства при подводной сварке. Исследована структура металла, которая образовалась в результате микролегирования, основные механические показатели наплавленного металла. Механические свойства металла шва соответствуют требованиям класса А Спецификации подводной сварки ANSI / AWS D3.6.*

*Ключевые слова: подводная мокрая сварка, микролегирования, игольчатый феррит.*

**V. Machulyak****MICROALLOYING BY TITANIUM, BORUM, MOLYBDENIUM AND ALUMINIUM FOR WET UNDERWATER WELDING OF LOW CARBON STEEL**

*Main conceptual basis for developing new cored wire was possibility of applying the experience of successful experiments with microalloying while air welding before underwater wet welding.*

*Was considered the influence of weld joint microalloying by titanium, borium, molybdenum and aluminum on its mechanical properties while welding butt joints on the backup bar that remains under water. The structure of metal formed in the result of microalloying, main mechanical properties of weld metal were investigated. Were defined optimum microalloying proportions that increase the mechanical fracture of weld metal and provoke developing of acicular ferrite.*

*Mechanical properties of weld metal that meet the requirements of A Class Underwater Welding Specification ANSI/AWS D3.6.*

*Keywords: underwater wet welding, microalloying, acicular ferrite.*

**Постановка проблеми.** Вимоги до якості і надійності зварних з'єднань, виконаних під водою, постійно зростають. Зварні шви сучасних підводних металоконструкцій відповідального призначення часто за рівнем властивостей не повинні поступатися швам, виконаним на суші. У той же час фізико-хімічні і металургійні процеси при зварюванні під водою протікають у важких, екстремальних умовах, які обумовлюють складність проблем одержання якісних з'єднань. Це пов'язано не стільки з технічними, скільки з тепловими і металургійними особливостями зазначеного способу: інтенсивним тепловідведенням, значним насиченням розплавленого металу воднем, підвищеним тиском навколишнього середовища.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** При зварюванні під водою найбільшим недоліком зварних з'єднань є низький рівень пластичних властивостей зварного з'єднання, через те, що метал швидко охолоджується за допомогою води. Підвищення пластичності металу шва можна досягнути металургійним шляхом, за рахунок поліпшення мікроструктури, вводячи в зварний шов додаткові легуючі елементи. Найкращою умовою для підвищення пластичних властивостей є створення умов для формування голчастого фериту.

У результаті досліджень процесу сухого гіпербаричного зварювання, було встановлено оптимальне сполучення кількості марганцю, вуглецю і кисню, при якому у зварному шві утвориться максимальна кількість голчастого фериту. Також досліджено, що мікролегування такими компонентами, як алюміній, молібден, бор та титан сприяють поліпшенню структури та підвищенню пластичності металу шва, утворенню голчастого фериту.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження впливу мікролегуючих компонентів на механічні властивості металу шва та розроблення якісно нового самозахисного порошкового дроту для підводного мокрого зварювання низьколегованої сталі. При підводному зварюванні

основними структурними складовими в металі шва є зернограничний ферит і ферит із другою фазою, що характеризуються низькими пластичними властивостями, тому для підвищення пластичних властивостей необхідно зменшити їх частку у металі шва, при збільшенні частки ГФ.

**Викладка основного матеріалу дослідження.** В ході експериментальних дослідження було виготовлено партію порошкових дротів на базі загальновідомого порошкового самозахисного дроту для підводного зварювання рутил-руднокислого типу ППС-АН1 діаметром 1.6мм. До шихти дроту ППС-АН1 вводили добавки Al, Mo, FeTi та FeV за рахунок зменшення кількості залізного порошку. Добавки FeTi та FeV вводилися через те, що легування Ti та V у чистому вигляді не можливе. Зварювання проводилося в стаціонарних умовах у лабораторному басейні на глибині 1 м, зварювальному тракторі ТС-17 адаптованому для підводного зварювання в стаціонарній лабораторії ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Зразки МИ-34 і МИ-12(П) для механічних досліджень, а також шліфи для оптичних досліджень і досліджень хімічного складу наплавленого металу, виготовлялися зі стикового з'єднання, на підкладці що залишається, матеріал Ст3. Шов багато прохідний, 7-9 проходів в залежності від формування валика.

Алюміній в метал шва вводився у співвідношенні 10% та 20%. В обох випадках встановили, що мікролегування алюмінієм погіршує формування шва та горіння дуги. В результаті чого з'являються численні дефекти, знижується пластичність металу шва. При вмісті легуючого компоненту Al=10% у шихті зварювального дроту, I<sub>зв</sub>=180-200А, U<sub>зв</sub>=32-33В, спостерігалася інтенсивне газовиділення із зони зварювання, формування шва з великою лускуватістю. При Al=10% – I<sub>зв</sub>=180-200А, U<sub>зв</sub>=32-33В також спостерігалася інтенсивне газовиділення із зони зварювання та формування шва з великою лускуватістю, дуга не стабільна, також шлакова кірка мала численні розриви. Зниження вмісту легуючого компоненту Al=5% позитивного результату не дало, негативні явища притаманні попереднім дослідом мали місце. Даних з механічних випробувань не вдалося отримати, так як метал шва мав численні дефекти, що є концентратором напружень, тому розриви відбувалися в дефектних місцях майже одразу після навантаження.

Мікролегування молібденом (вміст легуючого елементу Mo=5%, I<sub>зв</sub>=180-190А, U<sub>зв</sub>=30-32В) покращує процес горіння дуги при підводному зварюванні, формування шва є задовільним. Ця тенденція зберігається також при вмісті Mo=10% та Mo=20% у шихті зварювального дроту. Дослідження пластичності металу шва при мікролегуванні молібденом показали несуттєві зміни пластичності у порівнянні з базовою шихтою порошкового дроту і складають  $\delta=10-12\%$ .

Сумісне легування Al5%+Mo5% не дало позитивного результату: нестійке горіння дуги з численними дефектами металу шва, незадовільне формування валика шва (рис.1). Подальші дослідження з мікролегуванням Al та Mo не проводилися.

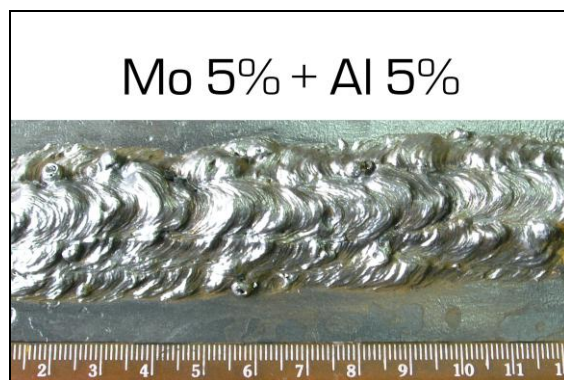


Рис.1. - Зовнішній вигляд зварного шва при підводному зварюванні.

Аналізуючи отримані дані при системі легування FeTi та FeV зварного шва, можна зробити висновок, що при всіх способах легування міцність зварного з'єднання підвищується не суттєво, однак зміна пластичності має неоднозначний характер. Так у зразках №3 та №8  $\delta=17,7\%$  та  $\delta = 16,0\%$  відповідно. Також при сумісному максимальному легуванні (зразок №9) міцність з'єднання підвищуються не суттєво, але різко падає пластичність (6.3%), при зварюванні таким порошковим дротом виникали деякі труднощі, зварювальна дуга була не стабільною, утворювалися багаточисельні дефекти у вигляді шлакових включень і пор.

Виконана поліномінальна інтерполяція експериментальних даних дозволила встановити розподіл значень відносного видовження та тимчасового зусилля розриву від вмісту бору та

титану у зварному шві. З контурної карти розподілу (рис.2-3) видно, що найбільше значення пластичності досягається при вмісті Ti – 0,005...0,01% і В - 0,0015...0,0025% у зварному шві.

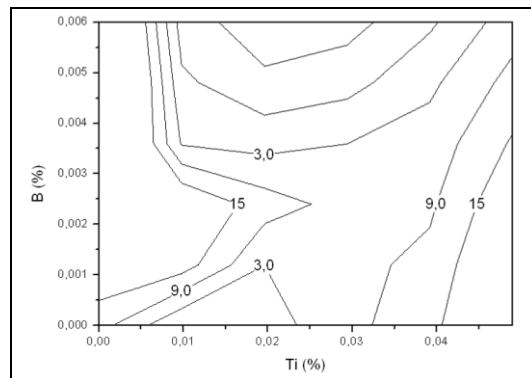


Рис. 2. - Залежність пластичності металу шва від вмісту Ti та В у ньому.

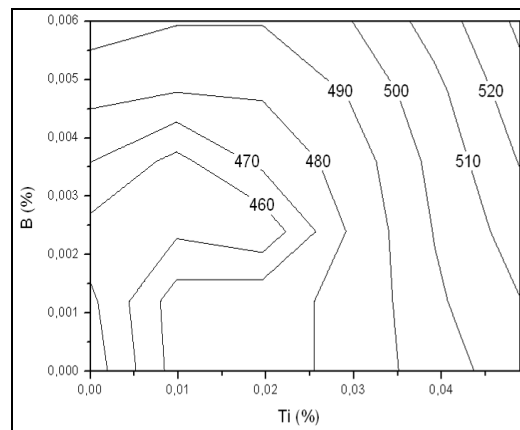


Рис. 3. - Вплив вмісту Ti та В у шві на тимчасове зусилля розриву.

Під час металографічних досліджень, відмічено наявність дефектів у всіх зразках, що характерно для зварювання під водою. Структура металу шва зразка №1, що виконувався дротом ППС-АН1 без легування Ti та В представляє собою феритну матрицю та дрібні карбіди. Мікротвердість металу останнього валика складає  $HV1=1880...2130$  МПа. При введенні бору кількість карбідів зменшується, що призводить до зниження мікротвердості  $HV1=1760...1870$  МПа. Структура металу шва – ферито-карбідна суміш.

При легуванні титаном, структура представляє собою ферит різних модифікацій: з упорядкованою та неупорядкованою другою фазою, полігональний ферит та невелика кількість ділянок з голчастим феритом та бейнітом. Твердість підвищилася  $HV1=2430...2850$  МПа. Структура навколошовної зони металу шва представляє собою феритно-карбідну суміш, де карбіди дрібніші ніж в ділянках з литою структурою і розташовані більш компактно. Зі збільшенням масової частки титану у шві в структурі останнього шару спостерігаються такі модифікації фериту: з упорядкованою і не упорядкованою другою фазою, полігональний ферит вздовж границь кристалітів. Виділення полігонального фериту більш крупні, а голчастого фериту немає. При сумісному легуванні Ti та В суттєвих змін не спостерігається у порівнянні з роздільним легуванням. Структура швів складається з різноманітних модифікацій фериту, змінюється переважно співвідношення між кількістю фериту з упорядкованою і неупорядкованою другою фазою.

Користуючись контурною картою розподілу значень відносного видовження від вмісту бору та титану у зварному шві, з метою оптимізації вмісту титану та бору у зварювальних матеріалах для підводного зварювання та зварному шві, було виготовлено нову партію з трьох самозахисних порошкових дротів (№11, №12 та №13).

При зварюванні стикового з'єднання дротом №11, спостерігалися багаточисленні шлакові включення, непровари, обриви дуги, значне розбризкування металу, погане формування валика шва, велика лускуватість та погане розтікання розплавленого металу. Що дало підстави для припинення подальшого дослідження даного дроту і системи його легування. При зварюванні

дротами №12 та №13 (рис.4) формування валика шва було задовільне, процес зварювання стабільний. В цілому можна зробити висновок, що зниження вмісту легуючих компонентів до  $Ti=0,003\%$  та  $B=0,002\%$  сприяє підвищенню пластичності металу шва до 20,8%, при чому міцність залишається на досить високому рівні. В процесі експериментів визначено оптимальні параметри режиму зварювання для дроту №13:  $U_{зв}=31...32$  В,  $I_{зв}=180...190$  А,  $L_B=15...20$  мм, полярність зворотна.



Рис. 4. - Зварне з'єднання виконане дротом №13 з оптимізованим вмістом легуючих компонентів

Досліджено метал шва зразка №13 і ЗТВ на предмет дефектів та неметалічних включень. Виявлено велику кількість дрібних включень (в основному оксиди та силікати) у шві, а також крупні складні оксиди в невеликій кількості. На границях між валиками є поодинокі пори. Тріщин у шві не спостерігається.

Структура металу в корені шва феритна з незначною кількістю перлітної складової. Структура складається з поліедричного, полігонального (розташованого вздовж зерен кристалізації), відманштеттового фериту, а також пластинчатого фериту з неупорядкованою другою фазою, даний факт місце і в попередніх експериментах. Голчатого фериту в металі шва не виявлено. Зварювання стикового з'єднання на глибині 10 та 20 метрів дротом №13, дало позитивний результат у вигляді задовільного формування валика, відсутності пор, тріщин, шлакових включень у металі шва. Все це свідчить про справедливість твердження, щодо можливості перенесення досвіду проведення успішних експериментів з мікролегування титаном та бором при зварюванні на повітрі до підводного мокрого зварювання. Однак встановлено, що в оптимально область вмісту  $Ti$  та  $B$  у зварному шві не співпадає з областю максимальних механічних властивостей шва. Механічні властивості металу відповідають вимогам класу А Специфікації підводного зварювання ANSI/AWS D3.6.

**Висновки.** В процесі експериментальної роботи встановили, що мікролегування титаном та бором дозволяє ефективно керувати механічними показниками металу шва. Мікролегування алюмінієм погіршує формування шва та горіння дуги, призводить до розривів шлакової кірки, в результаті чого з'являються численні дефекти, знижується пластичність металу шва. Мікролегування молібденом покращує процес горіння дуги, дуга стабільна, однак спостерігається зниження пластичності при механічних випробуваннях. У металі шва також спостерігаються численні дефекти. Визначено оптимальний вміст титану та бору у металі зварного шва, що становить 0.003% титану та 0.002% бору, при якому рівень пластичних властивостей становить 20.8%.

Металографічні дослідження показали, що область з максимальною кількістю голчатого фериту не співпадає з визначеною областю максимальних механічних властивостей. В умовах зварювання під водою збільшення частки голчатого фериту призводить до окрихнення металу шва. При сумісному легуванні  $Ti$  та  $B$  структура швів складається з різноманітних модифікацій фериту, змінюється переважно співвідношення між кількістю фериту з упорядкованою і неупорядкованою другою фазою.

Розроблено самозахисний порошковий, котрий забезпечує такі механічні властивості металу шва: відносне видовження металу шва  $\delta=20.8\%$ ; межа міцності металу шва  $\sigma_B=469.6$  МПа; тимчасове зусилля розриву  $\sigma=469.6$  МПа; ударна в'язкість  $KCV=36,8$  Дж/см<sup>2</sup>.

**Перелік посилань:**

1. ANSI/AWS.D3.6. Specification for underwater welding.
2. Ibarra S., Grabbs C., Olson D. (1988) Fundamental approaches to underwater welding metallurgy. *Journal of Metals*. №12. pp. 8-10.
3. Masubuchi K., Gaudiano A.V., Reynolds T.J. Technologies and practices of underwater welding // *Underwater welding: Proc. Intern. conf.. Trondheim, June 27-28, 1983. - Oxford: S.a., 1983. - P. 49-70*
4. Olson D. (1990) The Influence of Boron and Titanium on Low Carbon Steel Weld Metal. *Welding Journal*. №4. p.151-158.
5. Sanchez-Osio A., Liu S., Olson D., Ibarra S. (1993) Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications. *Proc. 12th Int. Conf. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. V.3. Part A. P. 119-128.*
6. Грабин В., Денисенко А. (1978) *Металоведение сварки низко- и среднелегированных сталей*. Наукова думка. Україна, Київ.
7. Каблуковский А., Ябуров С. (1999) *Преимущества микролегирования стали титаном с помощью порошковой проволоки*. Металлург.
8. Кононенко В. (2002) *Современное состояние подводной сварки и резки в Украине*. Автоматическая сварка. №2.С. 44-48.
9. Максимов С., Кражановский Д. (2006) *Содержание игольчатого феррита в металле швов при подводной сварке*. Автоматическая сварка. №1. с. 62-64.
10. Максимов С., Мачуляк В., Шеремета А. (2012) *Визначення впливу мікролегуння на механічні властивості металу шва*. Матеріали V всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології». Україна, Київ.
11. Максимов С., Мачуляк В., Шеремета А., Гончаренко О. (2014) *Влияние микролегирования титаном и бором металла шва при сварке под водой на его механические свойства*. Автоматическая сварка. №6-7. С. 79-83.
12. Мачуляк В., Котик В. (2013) *Вплив титану та бору на пластичність шва при підводному зварюванні*. Матеріали VI всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології». Україна, Київ.
13. Мачуляк В.В. (2016) *Розробка порошкового дроту для мокрого підводного зварювання*. Монографія «Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій». Україна. Київ.
14. Мачуляк В. В. (2016) *Self-protective cored wire for under water welding of low-carbon steel*. Матеріали конференції «Welding and related technologies». Slovakia, Bratislava.

**Рецензенти:**

**Рижов Р.М.**, викладач НТУУ «КПІ» ім. І.Сікорського, д.т.н., проф.

**Скульський В.Ю.**, старший науковий співробітник ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, д.т.н.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2017