

## ТЕХНОЛОГІЯ МІГ ЗВАРЮВАННЯ ХРОМИСТОЇ СТАЛІ МАРТЕНСИТНОГО КЛАСУ СА-6NM

А.Р. Гаврик<sup>1</sup>, А.К. Царюк<sup>1</sup>, І.Г. Осипенко<sup>1</sup>, О.В. Линник<sup>2</sup>, О.В. Вавілов<sup>2</sup>, О.Г. Кантор<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [tsaryuk@paton.kiev.ua](mailto:tsaryuk@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>АТ «Українські енергетичні машини». 61037, м. Харків, просп. Московський, 199.

E-mail: [office@ukrenergymashines.com](mailto:office@ukrenergymashines.com)

Досліджено зварюваність мартенситної сталі СА-6NM та розроблено принципову технологію її механізованого зварювання в суміші захисних газів за вимогами до виготовлення відповідальних деталей та вузлів гідротурбінного обладнання, а також заварювання дефектів литва. Відповідно рівню міцності сталі вибрано та всебічно досліджено зварювальний дріт суцільного перерізу діаметром 1,2 мм Thermanit 13/04 Si за EN 12072/G 134 (Німеччина) та один з варіантів захисної суміші Микс 1 (82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>). Установлено, що для попередження утворення холодних тріщин в зварних з'єднаннях, зварювання цієї сталі необхідно виконувати з попереднім та супутнім підігрівом до 150...200 °С і обов'язковим післязварювальним відпуском при температурі 600 °С. Розроблена технологія дозволяє суттєво підвищити механічні властивості зварних з'єднань металу шва (на 30...35 % вище вимог до рівня показників основного металу хромистої сталі СА-6NM). Проведено атестацію технології, розроблені рекомендації щодо виробничого застосування на АТ «Українські енергетичні машини». Бібліогр. 17, табл. 5, рис. 8.

*Ключові слова:* механізоване зварювання, сталь мартенситного класу, суміш захисних газів, дифузійний водень, холодні тріщини, механічні властивості, структура

**Вступ.** Для виготовлення відповідальних деталей і зварних вузлів гідротурбінного устаткування, що працюють в умовах інтенсивного кавітаційного, корозійного та абразивного зносу в Україні використовуються хромисті сталі, як вітчизняного виробництва марок 06X13H4МД, 06X12H3Д, так і закордонного, зокрема сталь СА-6NM (03X13H5M) [1]. Особливістю виготовлення таких вузлів гідравлічних радіально-осьових турбін є великий різновид окремих типів деталей і зварних конструкцій, що підлягають з'єднанню і включають, наприклад, з'єднання штампованих або литих лопастей, вальцьованих і литих ободів для створення робочого колеса, а також використання зварювання можливих дефектів литва в деталях великої маси до 50 т. Разом з тим виготовлення зварно-литих конструкцій потребує технології з'єднання з іншими марками сталей того ж класу (06X12H3ДЛ, 06X12H4МЛ) за умов великих товщин та значної жорсткості деталей. При цьому потрібно збереження високих механічних властивостей зварних з'єднань цих марок сталей, та необхідно орієнтуватись на вимоги сталі СА-6NM. Сьогодні при виготовленні зварних деталей і вузлів гідротурбінного обладнання зі хромистих сталей мартенситного класу, в тому числі й для зварювання дефектів литва на АТ «Українські енергетичні машини» в основному застосовується ручне дугове електрозварювання покритими електродами і механізоване зварювання в CO<sub>2</sub>, яким властивий ряд недоліків [2–4]. З урахуванням зва-

рювально-технологічних властивостей механізоване зварювання, наприклад в суміші захисних газів (Ar + CO<sub>2</sub>) має значні переваги в порівнянні з вищезгаданими процесами [5, 6]. При зварюванні у суміші газів 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> відсутня область режимів з короткими замиканнями дугового проміжку (існує лише область з краплинним переносом та область зі струминним переносом). При цьому зменшуються втрати електродного металу на вугар і розбризкування, поліпшується якість формування зварних швів, підвищується стійкість проти утворення пор і технологічна міцність, знижується трудомісткість при зачистці з'єднання від бризок, а також є реальна можливість підвищити показники механічних властивостей зварних з'єднань.

Тому розробка і впровадження механізованого зварювання в суміші захисних газів при виготовленні компонентів гідротурбінного обладнання із хромистої мартенситної сталі та заварюванні дефектів литва є актуальною задачею. В зв'язку з цим метою даної роботи було дослідження і розробка науково обґрунтованих положень технології механізованого зварювання в суміші захисних газів сталі СА-6NM, що дозволяють підвищити технологічну міцність, зокрема опір зварних з'єднань утворенню холодних тріщин та забезпечити їх високі службові властивості.

**Матеріали та методики проведення експериментів і досліджень.** Хімічний склад хромистих

Гаврик А.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-0793-2754>, Царюк А.К. – <https://orcid.org/0000-0002-5762-5584>,

Осипенко І.Г. <https://orcid.org/0000-0002-9969-7375>

© А.Р. Гаврик, А.К. Царюк, І.Г. Осипенко, О.В. Линник, О.В. Вавілов, О.Г. Кантор, 2023

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних сталей, мас. %

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S		P		Інші елементи
							не більш		не більш		
Сталь 06X12H3Д за ТУ 1081425-86	≤ 0,06	≤ 0,3	≤ 0,06	12,0...13,5	2,8...3,2	–	0,025	0,025	0,025	0,025	Cu–0,50–1,10 W+V
Сталь СА-6NM у стані постачання (дані Інституту електрозварювання ім. С.О. Патона (ІЕЗ))	0,037	0,20	0,43	11,81	3,9	0,47	0,016	0,017	0,017	0,017	–

сталей марок 06X12H3Д і СА-6NM, які розглядаються в роботі, наведено у табл. 1.

При виборі зварювального дроту орієнтувалися на його відповідність хімічному складу основного метала, тобто можливості використання його для сталей мартенситного класу з 13 % хрому. Окрім відповідності хімічного складу, зварювальний дріт при механізованому зварюванні повинен забезпечувати вимоги рівномірності за механічними властивостями – забезпечення рівномірності за всіма показниками з матеріалом, що використовується для зварювання.

На основі аналізу ринку пропозицій зварювальних матеріалів було обрано суцільний дріт діаметром 1,2 мм марки Thermanit 13/04 Si виробництва «Thyssen» (Німеччина). Хімічний склад дроту наведено в табл. 2. Попередня оцінка його зварювально-технологічних властивостей при механізованому зварюванні в суміші газів Микс 1 показала високу стабільність при зварюванні у всіх просторових положеннях з відмінним формуванням швів, незначним розбризкуванням та відсутністю будь-якого типу дефектів. Результати дослідження хімічного складу наплавленого металу у 7-му шарі наведено в табл. 2. Як бачимо він характеризується низьким вмістом таких шкідливих домішок, як сірка та фосфор та близький до хімічного складу сталі СА-6NM.

Вимоги Інструкції ГТИ-407-2018 [1] до механічних властивостей основного метала та металу шва наведено в табл. 3.

При виконанні даної роботи було використано наступні методики дослідження:

- спиртова методика дослідження зразка «карандашної проби», який виготовляється шляхом вилування зварювальної ванни у роз'ємну мідну виливницю [7] для визначення концентрації дифузійного водню в наплавленому металі (методика застосовується у суднобудуванні);

- методика відновленого плавлення зразка в потоці високочистого газу-носія концентрації залишкових газів у металі відлитих проб;

- методика визначення еквіваленту шкідливих домішок у металі шва [8], для оцінки спільного впливу концентрації кисню, сірки і фосфору  $[P_E] = [O] + 0,8 [S] + 0,7 [P]$ , де: [O], [S], [P] – концентрації кисню, сірки та фосфору;

- методика кількісної оцінки схильності зварних з'єднань до утворення холодних тріщин (метод Імплант), яка передбачає оцінку характеристик міцності при уповільненому руйнуванні зразків-вставок [9];

- методика якісної оцінки схильності зварних з'єднань до утворення холодних тріщин [10];

- металографічні дослідження мікроструктури зварних з'єднань проводили за допомогою оптичного світлового мікроскопу марки «Neophot-32» з приєднаним до нього оптичним модулем на основі цифрової фотокамери типу «Olympus C-5060» для фотофіксації зображень мікроструктур і неметалічних включень;

- методика травлення макрошліфів зварних з'єднань у 30%-му водному розчині хлорного заліза (FeCl<sub>3</sub>);

- електролітичне травлення мікрошліфів у 10%-му водному (дистильована вода) розчи-

Таблиця 2. Хімічний склад дроту та наплавленого металу, мас. %

Об'єкт дослідження	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Інші елементи
Дріт Thermanit 13/04Si EN12072/G 13/4	0,03	0,8	0,7	13,0	4,7	0,5	–	–	–
Наплавлений метал, виконаний дротом Thermanit 13/04S (дані ІЕЗ)	0,03	0,36	0,36	12,0	3,8	0,27	0,010	0,005	–

Таблиця 3. Вимоги до механічних властивостей основного та наплавленого металу

Об'єкт дослідження	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа	Межа плинності $\sigma_p$ , МПа	Відносне подовження $\delta$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %	Ударна в'язкість Дж/см <sup>2</sup> при 20 °С		Твердість, НВ
					KCU	KCV	
Сталь 06X12H3Д (для порівняння)	690	540	14,0	30,0	59	49	187...275
Сталь СА-6NM	755	550	15,0	35,0	≥ 50	–	–
Наплавлений метал (дріт Thermanit 13/04Si по EN 15971*)	800	≥ 680	≥ 15	–	–	≥ 50	250

Примітка. \*після високого відпуску при 600 °С протягом 8 год.

ні хромової кислоти. Режим травлення: напруга 12...15 В, час травлення 10...15 с. Виявлення мікроструктури проводиться з переполіровою поверхні шліфа на сукні з нанесенням на нього порошком окису хрому;

- визначення твердості металу зварних з'єднань проводилось на приборі ТП-5.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Забезпечення мінімальної газонасиченості металу шва одна із найважливіших зварювально-технологічних властивостей зварювальних матеріалів. Особливо помітний вплив на технологічну міцність металу шва та зони термічного впливу (ЗТВ) має дифузійно-рухливий водень. Визначена концентрація  $H_d$  дифузійно-рухомого водню в металі шва, наплавленого досліджуваним дротом. Установлено, що середнє значення  $H_d$  знаходиться на дуже низькому рівні ( $< 0,1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  наплавленого металу). Звернули також особливу увагу на вміст кисню у наплавленому металі, оскільки в основному металі це визначає об'ємну частку неметалевих включень, а в наплавленому металі є одним із ключових факторів ударної в'язкості металу шва. Результати дослідження насиченості металу шва такими газами, як кисень, азот та залишковий водень наведені в табл. 4. Вони свідчать, що вміст газів у наплавленому металі при різних способах зварювання практично однаковий та задовольняє поставленим вимогам.

Як відомо шкідливі домішки (сірка, фосфор, кисень) мають спільний негативний вплив на пластичні властивості та ударну в'язкість металу шва. За методикою в роботі [8] введено поняття еквівалента шкідливих домішок [ $P_E$ ]. Введення поняття еквівалента шкідливих домішок дозволяє звести множинну кореляцію до двох змінних і порівнювати окрихчення на металі шва у вигляді окисних включень, сірки і фосфору, незважаючи на існуючі відмінності в поведінці цих домішок. Установлено, що суттєве падіння пластичності спостерігається при [ $P_E$ ]  $\geq 0,08 \%$ , одночасно з цим зростає тимчасовий опір розриву [8]. При підрахунку кисню та вмісту сірки та фосфору в наплавленому металі дротом «Thermanit 13/04 Si» у суміші захисного газу Микс 1 [ $P_E$ ] дорівнює 0,07 %. Це свідчить, що внаслідок такої активної дії кисню відбувається значне вигорання сірки та фосфору, що дозволяє отримати  $P_E$  допустимої величини для застосування механізованого зварювання зазначеним зварювальним дротом. Таким

чином, хімічний склад металу шва, концентрація в ньому дифузійного водню і вміст газів ( $O_2$ ,  $N_2$  і  $H$ ) цілком відповідають поставленим вимогам і повинні сприяти високій тріщиностійкості і необхідному рівню механічних властивостей зварних з'єднань сталі СА-6NM (табл. 3).

Зварюваність сталей мартенситного класу з часткою хрому 13 % характеризується підвищеною схильністю з'єднань до утворення холодних тріщин. Визначальна роль цього явища відводиться мартенситному перетворенню, підвищеному вмісту водню та вуглецю [13]. У результаті термічного циклу зварювання сталі мартенситного класу зазнають загартування, метал ЗТВ стає більш твердим, міцним та крихким [14]. Для виключення можливості утворення холодних тріщин авторами робіт [15–16] рекомендується забезпечувати мінімальний вміст вуглецю та азоту в основному та присадному матеріалі, при цьому у шві повинно бути не більше 10 %  $\delta$ -фериту. Цьому сприяє підвищений вміст нікелю до 4...5 %. Максимальний вміст вуглецю та азоту в основному металі та зварювальних матеріалах може бути обмежений до рівня 0,02...0,03 %, а марганець і кремній зазвичай становить до 0,6...0,7 %. Оптимальний вміст нікелю не більше 5 % [17] також збільшує вміст високо пластичних складових у структурі зварних з'єднань.

Для сталей, що гартуються, доцільно оцінювати цикл охолодження в інтервалі від 500 до 300 °С, що відображає термодинамічні особливості перетворення аустеніту в мартенситно-бейнітної області. Також дуже важливими для технологічної міцності є умови охолодження металу ЗТВ після завершення фазового перетворення від ~ 200 до 100 °С. Уповільнене охолодження при цих температурах забезпечує розвиток дифузійних процесів, з якими пов'язані низькотемпературна відпустка мартенситу та вихід атомарного водню із зони можливого утворення тріщин.

Визначення фактичних швидкостей охолодження металу ЗТВ у зазначених інтервалах представляло інтерес при дослідженні схильності сталі СА-6NM до уповільненого руйнування. Для оцінки схильності сталі СА-6NM до холодних тріщин і визначення необхідної температури попереднього підігріву при механізованому зварюванні дротом діаметром 1,2 марки «Thermanit 13/04 Si» у суміші захисних газів Микс 1 проводили ряд дослідів за методикою «Імплант»

Таблиця 4. Вміст залишкових газів у наплавленому металі

Наплавлений метал	[O], мас. %	[N], мас. %	[H], мл/100 г Ме
У суміші 82 % Ag + 18 % CO, при зварюванні дротом Thermanit 13/04 Si	0,059	0,043	2,46
При зварюванні в 100 % CO, [11]	0,063...0,078	0,021	1,1
Ручне зварювання електродами ЦЛ-20М діаметром 4 мм [11]	0,0307	0,012	1,4
Автоматичне зварювання під флюсом АН-43М [12]	0,054	0,0138	1,6

при різних температурах попереднього підігріву (100, 150, 200 і 250 °С) і без підігріву, а також при різному рівні навантаження зразків-вставок. Зварювання виконували на режимі  $I_{зв} = 180...200$  А,  $U_d = 24...26$  В, витрата газу 1000 л/год одним нитковим швом (валиком).

Швидкість охолодження ЗТВ металу вставки визначали за термічним циклом (ТЦ), зварювання записували до  $T = 100$  °С. Швидкість охолодження в інтервалах  $T = 600...500$ ;  $500...300$  і  $200...100$  °С, що позначаються відповідно  $w_{6/5}$ ,  $w_{5/3}$  і  $w_{2/1}$ , визначали розрахунково-графічним способом по кривій ТЦ. Подібно обробляли 2-3 криві різних ТЦ, отримані при одній і тій самій температурі підігріву, та за отриманими показниками знаходили середнє значення швидкості охолодження.

Результати оцінки схильності до уповільненого руйнування зварних з'єднань сталі СА-6 NM представлені на рис. 1. З графіка можна визначити, що відсутність схильності до холодних тріщин при механізованому зварюванні дротом марки Thermanit 13/04 Si в суміші газів Микс 1 забезпечується підігрівом основного металу до температури 150 °С. Встановлено, що рівень критичної напруги вище межі плинності забезпечується при попередньому підігріві 150...200 °С. Отже, зварювання необхідно виконувати після попереднього підігріву на рівні 150...200 °С.

Якісну оцінку схильності зварних з'єднань до утворення холодних тріщин здійснювали шляхом зварювання першого кореневого проходу в стиковому жорсткому з'єднанні (рис. 2) при температурах попереднього підігріву, оптимальна величина яких була визначена за методом Імплант. Такою температурою була прийнята величина 150 °С.

Після охолодження до кімнатних температур і витримки протягом 48 год зварні жорсткі проби розрізали на поперечні темплети. Поверхні зварних з'єднань вивчалися на предмет виявлення тріщин. Попередній підігрів зварних з'єднань вище 150 °С дозволяє виключити утворення тріщиноподібних дефектів.

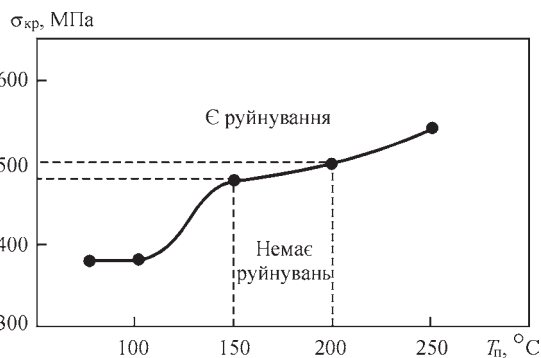


Рис. 1. Крива критичної напруги руйнування для сталі СА-6NM в залежності від температури підігріву

**Дослідно-промислова перевірка результатів досліджень.** З метою дослідження структури та механічних властивостей металу шва зварних з'єднань сталі СА-6NM, виконаних механізованим зварюванням у суміші захисних газів, були підготовлені та зварені стики, розміром 200×300×30 та 200×300×40 мм. На рис. 3 представлено форму оброблення кромки для напівавтоматичного зварювання в захисних газах з розмірами, відповідними типу TP-6 за ДСТУ EN 9692-1:2014.

Зварювання дослідного стика виконувалося з попереднім та супутнім підігрівом до температури 150 °С. Режим зварювання кореневого проходу:  $I_{зв} = 120...140$  А,  $U_d = 19...22$  В, витрата захисного газу 600 л/год. Для заповнення обробки режим збільшувався  $I_{зв} = 180...200$  А,  $U_d = 24...26$  В, витрата газу до 1000 л/год. Після виконання зварювання проводилася термічна обробка стика у вигляді відпуску за температури 600 °С протягом чотирьох годин, з подальшим розрізанням стика на темплети, з яких виготовлялись зразки для механічних випробувань. При дослідженні механічних властивостей металу шва випробування на статичне розтягнення проводилися на зразках, вирізаних з металу шва вздовж шва. При дослідженні зварних з'єднань зразки вирізалися поперек шва з серединою зразка на лінії сплавлення. Для статичного загину при нормальній температурі кут загину зразків зварних з'єднань повинен бути не нижче, чим для основного металу. Випробування металу шва на ударний вигин зразків з круглим надрізом (KCU) проводили при кімнатній температурі. Випробування зразків на ударний

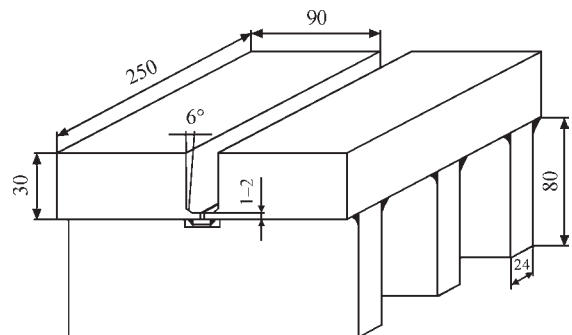


Рис. 2. Жорстка проба для виконання зварного стикового з'єднання сталі СА-6NM

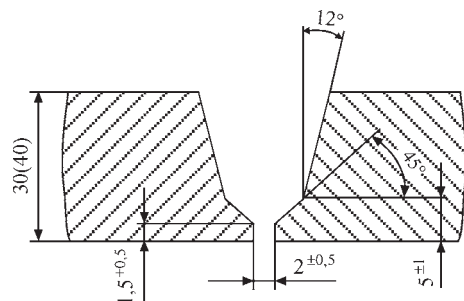


Рис. 3. Форма обробки кромки з'єднання сталі СА-6NM для механізованого зварювання



Таблиця 5. Результати механічних випробувань

Об'єкт дослідження	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Ударна в'язкість, Дж/см <sup>2</sup> при 20 °С		Кут загину, град	Твердість НВ
					KCU	KCV**		
Шов*	870,2...884,1	710,5...725,2	15,5...15,9	56,8...60,1	86,7...89,6...98,8	68,7...78,5... 80,7	–	235...250
Зварне з'єднання*	814,3...827,7	–	–	–	–	–	130	–

Примітка. \*після високого відпуску при 600 °С протягом 4 год. \*\*при – 40 °С KCV становить 53,9... 59,7...59,9.

вигин з гострим надрізом (KCV) проводили в інтервалі температур від + 20 до – 40 °С. Результати механічних випробувань металу шва та зварного з'єднання сталі СА-6NM, наведено в табл. 5.

Таким чином, механічні характеристики металу шва і зварного з'єднання сталі СА-6NM, виконаного механізованим зварюванням у суміші захисних газів Микс 1 з використанням дроту «Thermanit» 13/04 Si, цілком задовольняють вимогам до зварних з'єднань сталі СА-6NM (див. табл. 3).

Металографічні дослідження проводилися з метою оцінки якості основного металу, зварних з'єднань та металу шва, а також структурних змін, що є результатом процесу зварювання та термічної обробки. Макрошліф повного перерізу із зварного з'єднання після термічної обробки показаний на рис. 4.

Для мікродосліджень із зварних з'єднань після термообробки вирізались мікрошліфи для дослідження мікроструктури.

Досліджувались мікроструктури металу шва, ЗТВ та основного металу.

Як видно з приведених зображень на рис. 5 розподіл неметалевих включень у металі шва досить рівномірний. Вони є одиночними та дрібними оксидами і силікатами розміром 0,5...0,9 мкм. Для порівняння на рис. 6 наведені неметалеві включення в металі шва, виконаного дуговим ручним зварюванням електродами FOX CN 13/4 (BÖHLER), що представляють собою оксиди та силікати розміром 1,3...2,3 мкм.

Неметалеві включення в основному металі сталі СА-6NM показані на рис. 7, являють собою одиночні оксиди розміром 1,0...2,5 мкм і окисиди сульфідів розміром 4...15 мкм.



Рис. 4. Макрошліф зварного з'єднання сталі СА-6NM

Структурні особливості різних ділянок зварного з'єднання сталі СА-6NM розглянуті для стану після зварювання та відпуску 600 °С чотири години. Метал шва у верхній, середній та нижній частинах має бейнітно-мартенситну структуру. Структура ЗТВ сталі СА-6NM у верхній, середній



Рис. 5. Неметалеві включення та їх розмір у металі шва, виконаного дротом «Thermanit» 13/04 Si у захисній газовій суміші Микс 1: а – верхня частина шва,  $\times 1000$ ; б – середня частка шва,  $\times 1000$ ; в – нижня (коренева) частка шва

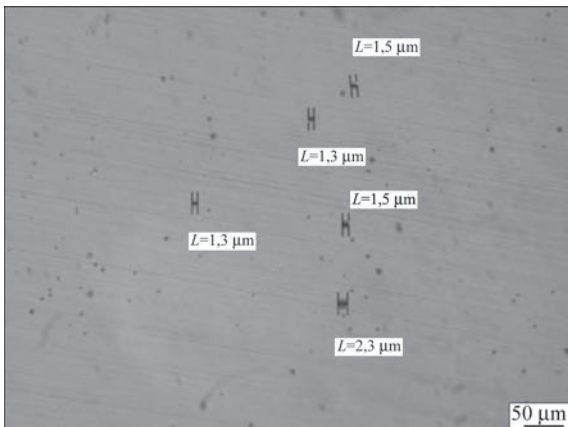


Рис. 6. Неметалічні включення та їх розмір у металі шва, виконаного електродами FOX CN 13/4

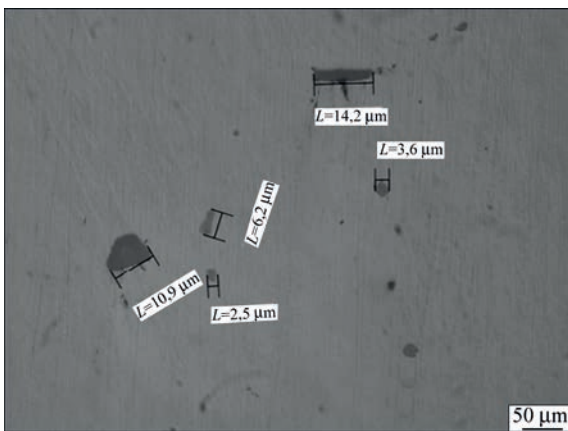


Рис. 7. Неметалічні включення та їх розмір у сталі CA-6NM та нижній частинах являє собою бейніт та мартенсит із крапленнями зернограничного фериту. Структура основного металу на віддаленні від шва бейнітно-мартенситна з виділеннями зернограничного фериту. Розподіл твердості у зварному з'єднанні сталі CA-6NM у стані після термічної обробки показано на рис. 8.

Таким чином, на підставі проведених металографічних досліджень, показано, що в металі шва наплавленому механізованим способом в газовій суміші Микс 1 дротом Thermanit 13/04 Si такі дефекти як пори, непровари, шлакові включення і тріщини відсутні. Також показано, що характер розподілу неметалевих включень у наплавленому

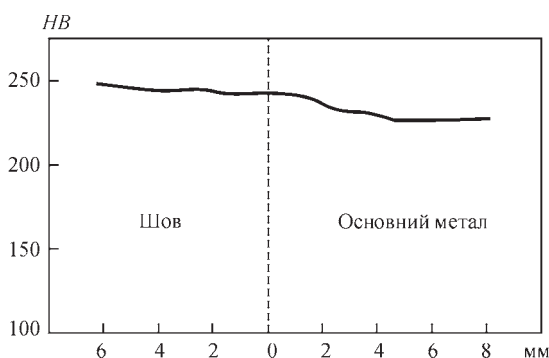


Рис. 8. Розподіл твердості у зварному з'єднанні сталі CA-6NM

металі при зварюванні в суміші Микс 1 однорідніший порівняно з металом, наплавленим електродами FOX CN 13/4. При цьому розмір включень менший, що позитивно впливає на механічні властивості шва. Структура металу шва досить однорідна, складається з бейніту та мартенситу, що цілком відповідає даному класу матеріалу. У стані після відпуску 600 °C протягом чотирьох годин метал шва має твердість у межах 240...250 HB. ЗТВ має структуру, характерну для сталі CA-6NM (бейніт + мартенсит) з окремими виділеннями зернограничного фериту та твердість у межах 230...240 HB. Твердість металу шва і ЗТВ задовольняє вимогам до зварних з'єднань сталі CA-6NM.

Результати виконаних досліджень використані для атестації запропонованої технології механізованого зварювання в суміші захисних газів Микс 1 сталі CA-6NM. Атестація показала реальну можливість застосування цієї технології для зварювання та заварки дефектів литва деталей та вузлів гідротурбінного устаткування.

## Висновки

Досліджено зварюваність мартенситної сталі CA-6NM та розроблено принципову технологію її механізованого зварювання в суміші захисних газів за вимогами до виготовлення відповідальних деталей та вузлів гідротурбінного обладнання, а також заварювання дефектів литва. Відповідно рівню міцності сталі вибрано та всебічно досліджено зварювальний дріт суцільного перерізу діаметром 1,2 мм Thermanit 13/04 Si за EN 12072/G 134 (Німеччина) та один з варіантів захисної суміші Микс 1 (82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>). Обґрунтована доцільність застосування для зварних з'єднань хромистої сталі CA-6NM попереднього і супутнього підігрівів до температури 150...200 °C та виконання післязварювальної термічної обробки – відпуску за температури 600 °C. Розроблена технологія МІГ зварювання дозволяє суттєво підвищити технологічну міцність та механічні властивості зварних з'єднань на 30...35 % від рівня вимог до показників основного металу хромистої сталі CA-6NM. Проведено атестацію технології, розроблені рекомендації щодо виробничого застосування на АТ «Українські енергетичні машини».

## Список літератури

1. Инструкция ГТИ-407-2018 (2018) *Турбины гидравлические. Технические требования по качеству изготовления сварно-литых рабочих колес радиально-осевых гидротурбин*. Харьков, ОАО «Турбоатом».
2. Воличенко Н.П., Цебренько Э.К. (2009) Сварка в турбостроении Украины. *Сварщик*, 2, 66.
3. Патон Б.Е. (2013) Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона для современной энергетики. *Автоматическая сварка*, 4, 12–20.
4. Царюк А.К., Левченко С.В., Гришин М.М. та ін. (2020) Зварювання в енергетичній промисловості України. *Автоматичне зварювання*, 3, 29–34.

5. Римский С.Т. (2006) *Руководство по технологии механизированной сварки в защитных газах*. Киев, ЭкоТехнология.
6. Кононенко В.Я. (2007) *Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом*. Киев, Тов. «Нико-Принт».
7. Козлов Р.А. (1986) *Сварка теплоустойчивых сталей*. Ленинград, Машиностроение.
8. Потапов Н.М. (1976) *Основы выбора флюсов при сварке сталей*. Москва, Машиностроение.
9. Sawhill, J.M., Dix, A.W., Savage, W.F. (1974) Modified Implant Test for Studying Delayed Cracking. *Welding Journal*, **12**, 554–560.
10. Касаткин Б.С., Мусяиченко В.Ф. (1970) *Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций*. Киев, Техника.
11. Анохов А.Е., Земскова М.С. и др. (1974) Проверка эксплуатационной надежности стыков трубопроводов, выполненных полуавтоматической сваркой в CO<sub>2</sub>. *Автоматическая сварка*, **8**, 43–46.
12. Царюк А.К., Иваненко В.Д., Козловец О.Н. (1995) Влияние чистоты сварочных материалов на свойства металла швов соединений теплоустойчивой стали 15X1M1Ф. *Там же*, **5**, 45–46.
13. Bilmes, P.D., Llorente, C., Perez, Ipina J. (2000) Toughness and microstructure of 13Cr4NiMo high-strength steel welds. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **9**(6), 609–615.
14. Casas, W.J.P., Henke, S.L., Novicki, N. (2009) Fracture toughness of CA6NM alloy, quenched and tempered, and of its welded joint without PWHT. *Welding International*, **23**(3), 166–172.
15. Рымкевич А.И. (1980) Сварка низкоуглеродистой 13 % хромистой стали для получения однородных и разнородных соединений. *Сварочное производство*, **9**, 1–12.
16. Рымкевич А.И. (1986) Выбор электродов для сварки высокопрочных коррозионноустойчивых сталей. *Автоматическая сварка*, **6**, 57–60.
17. Bilmes, P.D. et al. (2009) Microstructure, heat treatment and pitting corrosion of 13CrNiMo plate and weld metals. *Corrosion Science*, **51**(4), 876–81.
2. Volichenko, N.P., Tsebrenko, E.K. (2009) Welding in turbine construction of Ukraine. *Svarshchik*, **2**, 66 [in Russian].
3. Paton, B.E. (2013) Research and developments of the E.O.Paton Electric Welding Institute for nowadays power engineering. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 14–22.
4. Tsaryuk, A.K., Levchenko, E.V., Grishin, M.M. et al. (2020) Welding in power engineering industry of Ukraine. *The Paton Welding J.*, **3**, 19–24.
5. Rimsky, S.T. (2006) *Guide on mechanized shielded-gas welding*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
6. Kononenko, V.Ya. (2007) *Shielded-gas consumable and non-consumable electrode welding*. Kyiv, Niko-Print [in Russian].
7. Kozlov, R.A. (1986) *Welding of heat-resistant steels*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
8. Potapov, N.M. (1976) *Principles of flux selection in welding of steels*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Sawhill, J.M., Dix, A.W., Savage, W.F. (1974) Modified implant test for studying delayed cracking. *Welding J.*, **12**, 554–560.
10. Kasatkin, B.S., Musiyachenko, V.F. (1970) *High-strength low-alloyed steels for welded structures*. Kyiv, Tekhnika [in Russian].
11. Anokhov, A.E., Zemskova, M.S. et al. (1974) Verification of serviceability of butt joints of pipelines made by semiautomatic CO<sub>2</sub>-welding. *The Paton Welding J.*, **8**, 43–46.
12. Tsaryuk, A.K., Ivanenko, V.D., Kozlovets, O.N. (1995) Influence of welding material purity on properties of weld metal of heat-resistant steel 15Kh1M1F joints. *Ibid.*, **5**, 45–46 [in Russian].
13. Bilmes, P.D., Llorente, C., Perez, Ipina J. (2000) Toughness and microstructure of 13Cr4NiMo high-strength steel welds. *J. Mater. Eng. and Performance*, **9**(6), 609–615.
14. Casas, W.J.P., Henke, S.L., Novicki, N. (2009) Fracture toughness of CA6NM alloy, quenched and tempered, and of its welded joint without PWHT. *Welding International*, **23**(3), 166–172.
15. Rymkevich, A.I. (1980) Welding of low-alloyed 13% chromium steel for producing of uniform and dissimilar joints. *Svarochn. Proizvodstvo*, **9**, 1–12 [in Russian].
16. Rymkevich, A.I. (1986) Selection of electrodes for welding of high-strength corrosion-resistant steels. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 57–60 [in Russian].
17. Bilmes, P.D. et al. (2009) Microstructure, heat treatment and pitting corrosion of 13CrNiMo plate and weld metals. *Corrosion Sci.*, **51**(4), 876–81.

## References

1. Instruction GTI-407-2018 (2018) *Hydraulic turbines. Technical requirements on quality of producing the cast welded wheels of radial-flow turbines*. Kharkov, Turboatom [in Russian].

## TECHNOLOGY OF MIG WELDING OF CHROMIUM STEEL OF MARTENSITIC GRADE CA-6NM

A.R. Gavryk<sup>1</sup>, A.K. Tsaryuk<sup>1</sup>, I.G. Osypenko<sup>1</sup>, O.V. Lynnyk<sup>2</sup>, O.V. Vavilov<sup>2</sup>, O.G. Kantor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: tsaryuk@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>JSC “Ukrainian Energy Machines”. 199 Moskovsky Ave., 61037, Kharkiv, Ukraine. E-mail: office@ukrenergymachines.com

The weldability of the martensitic steel CA-6NM was investigated and the fundamental technology of its mechanized welding in a mixture of shielding gases was developed according to the requirements for the manufacture of critical parts and assemblies of the hydro-turbine equipment, as well as rewelding of casting defects. According to the strength level of the steel, the welding wire Thermanit 13/04 Si of a solid cross-section with a diameter of 1.2 mm and one of the variants of the protective mixture Mix 1 (82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>) were selected and comprehensively investigated according to EN 12072/G 134 (Germany). It was established that in order to prevent the formation of cold cracks in welded joints, it is necessary to perform welding of this steel with a preliminary and accompanying heating up to 150...200 °C and a mandatory postweld tempering at a temperature of 600 °C. The developed technology provides a significant improvement in mechanical properties of welded joints of weld metal (by 30...35 % higher than specified by the requirements to the level of the base metal of chromium steel CA-6NM). Certification of the technology was carried out and recommendations for its production use at the JSC “Ukrainian Energy Machines” were worked out. 17 Ref., 5 Tabl., 8 Fig.

*Keywords: mechanized welding, martensitic steel, mixture of shielding gases, diffusion hydrogen, cold cracks, mechanical properties, structure*

Надійшла до редакції 11.04.2023