

## ВПЛИВ ТЕРМІЧНИХ ЦИКЛІВ ЗВАРЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ 06Г2БДП

А.В. Завдовєєв<sup>1</sup>, В.Д. Позняков<sup>1</sup>, С.Л. Жданов<sup>1</sup>, М. Rogante<sup>2</sup>, А.О. Максименко<sup>1</sup>,  
О.Г. Синєок<sup>1</sup>, А.М. Герасименко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>Rogante Engineering Office, 62012 Civitanova Marche, Italy

У машинобудуванні та промислового будівництва все більш широкого використання набувають високоміцні низьколеговані сталі з високими експлуатаційними характеристиками, зокрема, стійкістю до атмосферної корозії. Їх використання дозволяє не лише зменшити питому вагу металоконструкцій, а й підвищити їх надійність та експлуатаційний ресурс. З огляду на це, на базі сталі 06Г2Б створена сталь підвищеної стійкості проти корозії 06Г2БДП. Для підвищення корозійної стійкості в сталі збільшений вміст міді і фосфору. У роботі розглянуто питання впливу термічних циклів зварювання на механічні властивості та структуру металу ЗТВ зварних з'єднань атмосферостійкої сталі 06Г2БДП. Показано, що за показниками статичної міцності, пластичності і ударної в'язкості сталь 06Г2БДП не поступається сталі 06Г2Б, та переважає сталь 10ХСНД, її використання доцільно в якості альтернативи зазначеним сталям при виготовленні сучасних металоконструкцій ручним дуговим і механізованим в захисних газах зварюванням в визначеному для них діапазоні швидкостей охолодження металу ЗТВ. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 4.

*Ключові слова:* корозійностійка сталь, термічний цикл зварювання, зона термічного впливу, структура, властивості

Високоміцні низьколеговані сталі з високими експлуатаційними характеристиками: міцністю, в'язкістю, стійкістю до атмосферної корозії набувають все більш широкого використання у машинобудуванні та промислового будівництва, зокрема, у мостобудуванні. Їх використання дозволяє не лише зменшити питому вагу металоконструкцій, а й підвищувати їх надійність та експлуатаційний ресурс. Результати обстеження стану металоконструкцій мостів із сталевими головними та поперечними балками і сталезалізобетонною проїзною частиною свідчать, що основним видом їх пошкоджень є зменшення розмірів перерізу поясів і стінок балок внаслідок корозії, що істотно знижує несучу здатність і експлуатаційну придатність мостів [1]. Поєднання подекуди неефективних конструктивних і технологічних рішень в сукупності із застосуванням раніше в мостах звичайних будівельних сталей підсилюють та прискорюють процеси корозії в конструкції [2].

Корозійній стійкості низьколегованих сталей в атмосферних умовах присвячена велика кількість досліджень. Зокрема, вони свідчать про те, що обмежено атмосферостійкі низьколеговані сталі містять елементи, які при впливі звичайної атмосфери утворюють на поверхні плівку продуктів корозії, яка володіє захисними властивостями. Сталі такого типу були розроблені в США і спочатку використовувалися в кузовах залізничних вагонів. У 1960-х роках такі сталі почали застосо-

увати в інших конструкціях, таких як сталезалізобетонні мости.

Вплив хімічного складу на швидкість атмосферної корозії металу розглядався в багатьох роботах [3, 4]. Встановлено, що підвищений вміст міді, фосфору, хрому, а також нікелю і молібдену підвищує стійкість сталі до атмосферної корозії [4]. У ASTM G101 наводиться індекс, за яким можна судити про стійкість сталі до атмосферної корозії:  $I = 26,01\text{Cu} + 3,88\text{Ni} + 1,20\text{Cr} + 1,49\text{Si} + 17,28\text{P} - 7,29\text{CuNi} - 9,10\text{NiP} - 33,39\text{Cu}$ .

Масштаби застосування атмосферостійких сталей в конструкціях мостів в різних країнах різні. У Німеччині та Франції такі мости рідкісні, тоді як в Італії та Великобританії їх кількість найбільша. У США і Японії близько 50 % металевих і комбінованих мостів виконані з атмосферостійких сталей [5–7].

В Україні протягом останніх п'ятнадцяти років при будівництві відповідальних зварних конструкцій впроваджені і успішно застосовуються сталі 06ГБ, 06Г2Б та 10ХСНД. Економнолеговані сталі підвищеної міцності і холодостійкості вигідно відрізняються від сталей, які зазвичай застосовуються при виготовленні вітчизняних металоконструкцій. Сталі такого класу відносяться до сталей з карбонітридним зміцненням. Вони є низьковуглецевими ( $C = 0,04...0,08$  %) та економнолегованими, маючи при цьому збалансовані механічні і технологічні властивості [8–10]. Від закордонних

Завдовєєв А.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>, Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>,

Жданов С.Л. – <https://orcid.org/0000-0003-3570-895X>, Rogante М. – <https://orcid.org/0000-0002-6846-0826>

А.В. Завдовєєв, В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, М. Rogante, А.О. Максименко, О.Г. Синєок, А.М. Герасименко, 2020

Таблиця 1. Хімічний состав сталей, мас. %

Сталь	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti
06Г2БДП	0,08	0,35	1,4	0,05	0,012	0,02	0,30	0,02	0,30	0,3	0,03	0,02
06Г2Б	0,08	0,25	1,3	0,025	0,01	0,02	-	0,1	-	0,3	-	-
10ХСНД	≤0,12	0,8	0,8	0,03	0,035	-	0,6	-	0,5	0,4	-	-

сталей Кортен А і Кортен В відрізняються меншим вмістом таких елементів як нікель, хром та молібден. На даний час ці сталі були успішно застосовані при будівництві низки відповідальних об'єктів, таких як доменна піч на Криворізькому комбінаті, резервуарів для зберігання нафти ємністю 50000 та 75000 м<sup>3</sup>, окремих елементів конструкцій мосту через вхід в гавань Подільського мостового переходу.

З огляду на зацікавленість мостобудівників в застосуванні для прогонових будов мостів атмосферостійкого прокату, на базі сталі 06Г2Б створена сталь підвищеної стійкості проти корозії 06Г2БДП [11]. Для підвищення корозійної стійкості в сталі збільшений вміст міді і фосфору. Як зазначено вище фосфор підвищує міцність, а також атмосферну корозійну стійкість, особливо в контакті з міддю. В той же час деформаційні властивості сталі погіршуються. До того ж, як відомо, підвищений вміст в сталі фосфору може знизити її холодостійкість та погіршити здатність до зварювання. Тому мета даної роботи полягала у вивченні впливу термічних циклів зварювання на механічні властивості та структуру металу ЗТВ зварних з'єднань сталі 06Г2БДП.

**Методика досліджень.** В якості об'єкту дослідження було вибрано сталі, хімічний склад та механічні властивості яких наведено в табл. 1 і табл. 2.

Відповідно до ГОСТ 9.911-89, ГОСТ 9.908-85 в лабораторних умовах ІЕЗ ім. Є.О. Патона були виконані порівняльні дослідження корозійної стійкості пропонуємої сталі і прокату сталей 10ХСНД та 06Г2Б, які широко використовуються в мостобудуванні. Стандарт ГОСТ 9.911-89 регламентує метод порівняльних прискорених корозійних випробувань низьколегованих сталей, які застосовуються без захисту від атмосферної корозії. Цей метод досліджень може бути також використаний і для отримання порівняльних даних щодо корозійної стійкості вуглецевих і низьколегованих сталей, які застосовуються із захисними покриттями. Суть методу полягає в прискоренні корозійного процесу утворення захисних шарів продуктів корозії на поверхні сталі. Прискорення процесу корозії досягають підвищенням відносної вологості повітря і температури при дії сірчистого газу, періодичної конденсації вологи, а також

Таблиця 2. Механічні властивості сталей

Сталь	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	KCV <sup>7-40</sup>
06Г2БДП	608	684	22	355
06Г2Б	490	590	20	98
10ХСНД	390	530...660	19	29

чергуванням змочування поверхні зразків електролітом і подальшого її висушування.

Зразки досліджуваних сталей в кількості не менше 3 шт. (100×50×1,5 мм) порівнювали зі зразками сталі еталона. В даному дослідженні в якості еталона були використані зразки зі сталі 10ХСНД. Випробування проводилися циклічно з періодичною зміною першої і другої стадії циклу. Тривалість одного циклу – 168 год. Загальна тривалість випробувань 7 циклів (1176 год). Перша стадія циклу: в атмосфері SO<sub>2</sub> при температурі 40 °С протягом 7 год, потім при температурі 20 °С протягом 64 год. Друга стадія циклу: періодичне занурення зразків в розчин 5·10<sup>-6</sup> моль/л сірчаної кислоти протягом 97 год (10 хв в розчині і 50 хв на повітрі, в тому числі в потоці повітря при температурі 60 °С) на установці «корозійне колесо».

Показники корозії і корозійної стійкості визначали по ГОСТ 9.908-85. За основний показник суцільної корозії приймали зменшення маси на одиницю площі зразків і швидкість втрати маси зразків.

Залежність механічних властивостей від швидкості охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур 600...500 °С вивчали з використанням модельних зразків розміром 120×12×12 мм, які були нагріті та охолоджені у відповідності до термічних циклів дугового зварювання на спеціалізованому устаткуванні МСР-75. Процес термічного оброблення полягав в наступному. Спочатку зразки нагрівалися до температури 1200...1300 °С, які є характерними для ділянки перегріву ЗТВ зварних з'єднань. Швидкість нагріву зразків складала 150...170 °С/с, що відповідає умовам нагріву металу в зоні термічного впливу при дугових процесах зварювання. При даній температурі зразки витримувались протягом орієнтовно 2 с, а після цього примусово охолоджувались. Щоб забезпечити різні швидкості охолодження нагрітих зразків змінювали умови їх остигання. Так, для забезпечення швидкостей охолодження в інтервалі від 3,0 до 7,5 °С/с остигання зразків здійснювали за допомогою охолодження мідних затискачів установки проточною водою різної інтенсивності протікання. Більш великі швидкості охолодження досягалися в результаті додаткового обдування зразків інертним газом, що дозволяло за рахунок зміни інтенсивності витрат газу регулювати  $w_{65}$  від 8,0 до 20,0 °С/с. Швидкість нагрівання-охолодження зразків контролювали хромель-алюмелевою термомпарою діаметром 0,5 мм.

З кожної партії модельних зразків, які термічно обробляли, виготовляли стандартні зразки для проведення механічних випробувань і визначення ударної в'язкості металу ЗТВ. Для випробувань на статичний розтяг механічним способом виготовляли зразки типу II (по 3 зразки на кожну швидкість охолодження) та на ударний згин типу IX відповідно до ГОСТ 6996-96. Ударна в'язкість визначалася при випробуванні зразків Шарпі з гострим надрізом при температурах випробування 20, -20, -40 °С. За результатами проведених випробувань оцінювали вплив швидкості охолодження на зміну наступних показників металу ЗТВ: статичної міцності ( $\sigma_t$  та  $\sigma_b$ , МПа); пластичності ( $\delta_5$  та  $\psi$ , %) та ударної в'язкості ( $KCV$ , Дж/см<sup>2</sup>).

Металографічні дослідження виконували за допомогою мікроскопу «Neophot-32», мікротвердість окремих структурних складових і інтегральну твер-

дість металу вимірювали на твердомірі М-400 фірми «LECO» при навантаженнях відповідно 100 г ( $HV_{0,1}$ ) та 10 кг ( $HV_{10}$ ). Зразки для досліджень підготовлювали за стандартним методом при застосуванні алмазних паст різної дисперсності, виявлення мікроструктури виконували методом хімічного травлення у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти.

**Результати та обговорення.** Згідно термодіаграм розпаду переохолодженого аустеніту сталі 06Г2Б та 06Г2БДП при нормальних умовах охолодження мають переважно бейнітну структуру. Натомість сталь 10ХСНД має феритно-перлітну структуру, що зумовлює нижчі показники механічних властивостей у порівнянні зі сталями 06Г2Б та 06Г2БДП. За умов прискорених швидкостей охолодження, характерних для термічного циклу зварювання, структура сталі 06Г2Б у достатньо широкому діапазоні швидкостей охолодження металу ЗТВ лишається переважно бейнітною. Разом з тим для сталі 06Г2БДП, за рахунок додаткового легування фосфором та міддю область бейнітного перетворення дещо зсунута, що відображається на більшій схильності до утворення бейніту і як наслідок підвищення механічних властивостей у порівнянні зі сталлю 06Г2Б. Для сталі 10ХСНД характерно формування перлітно-бейнітної структури при швидкостях охолодження відповідних термічному циклу зварювання. Цей факт негативно впливає на характеристики холодостійкості зазначеної сталі.

За результатами випробувань на корозійну стійкість встановлено, що її показники для досліджуваної сталі 06Г2БДП на 20 % вище ніж у сталі 10ХСНД, та не поступаються сталі 06Г2Б. Про це

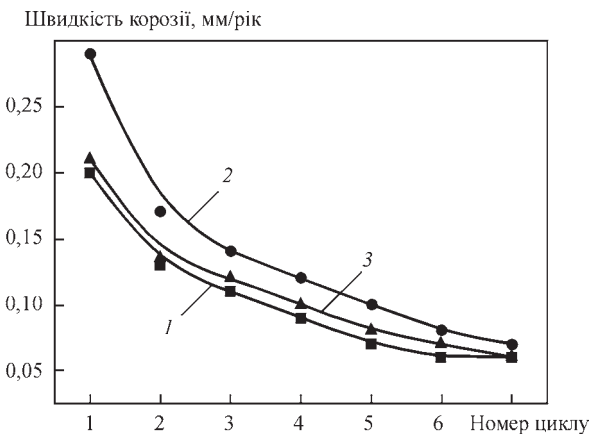


Рис. 1. Зміна швидкості корозії сталі в процесі випробувань: 1 – 06Г2БДП; 2 – 10ХСНД; 3 – 06Г2Б

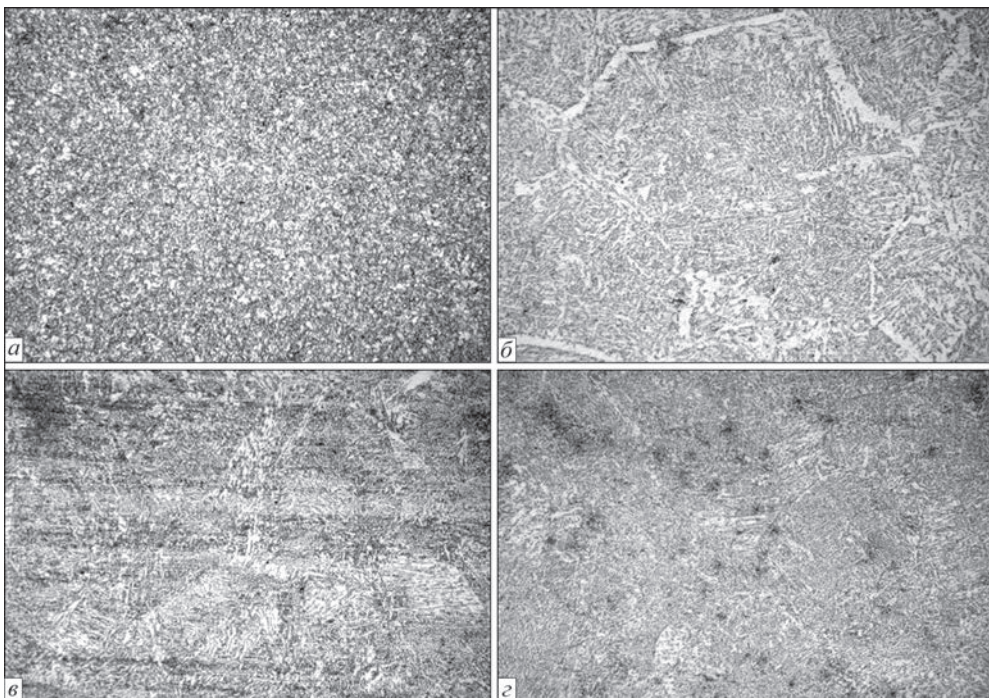


Рис. 2. Мікроструктура ( $\times 200$ ) сталі 06Г2БДП в залежності від величини швидкості охолодження  $w_{0,5}$ : а – основний метал; б – 3 °С/с; в – 14; г – 23

свідчать дані щодо зміни швидкості корозії, наведені на рис 1, особливо на перших циклах досліджень.

Результати металографічних досліджень свідчать, що завдяки проведенню термічної обробки у вигляді гартування та відпуску в дослідженій сталі 06Г2БДП утворюється феритно-карбідна структура (рис. 2, а) з розміром зерна порядку 4...20 мкм та твердістю  $HV_{20} 206$ . Це, в свою чергу, забезпечує високі показники статичної міцності  $\sigma_T > 600$  та  $\sigma_B > 690$  МПа, пластичності  $\delta_5 > 21$  % та  $\psi > 72$  % та ударної в'язкості металу ЗТВ сталі 06Г2БДП, які істотно перевищують нормативні значення та аналогічні показники сталі 10ХСНД.

Залежності, які характеризують зміни показників статичної міцності і пластичності в імітованому металі ЗТВ сталі 06Г2БДП під впливом ТЦЗ наведено на рис. 3. Для порівняння наведені результати випробувань металу ЗТВ сталі 06Г2Б та 10ХСНД.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що при швидкості охолодження в інтервалі температур 600...500 °С  $w_{6/5} = 3$  °С/с знижуються показники межі плинності металу ЗТВ в порівнянні з вихідним станом, а саме  $\sigma_{0,2}$  від 608 до 490 МПа, зі збільшенням  $w_{6/5}$  до 14 °С/с межа плинності збільшується до 544 МПа і до 565 МПа при  $w_{6/5} = 23$  °С/с. Межа статичної міцності  $\sigma_B$  незначно знижується до 657 МПа при  $w_{6/5} = 3$  °С/с, а потім зростає до 710 МПа при  $w_{6/5} = 25$  °С/с. У той же час пластичні властивості імітованого металу ЗТВ в порівнянні з вихідним станом зміню-

ються несуттєво (зміни не перевищують 5 %). Подібна тенденція щодо змін зазначених механічних властивостей характерна і для металу ЗТВ сталі 06Г2Б та 10ХСНД, але абсолютні значення цих показників нижчі.

При випробуваннях на ударний згин зразків з гострим V-образним надрізом встановлено, що ударна в'язкість металу ЗТВ сталі 06Г2БДП зменшується по відношенню до основного металу (рис. 4). Найбільш істотне зниження значень  $KCV$  спостерігається в зразках, які охолоджувалися зі швидкістю  $w_{6/5} = 3$  °С/с (від 355 до 86 Дж/см<sup>2</sup> при температурі випробувань 20 °С, і від 316 до 10 Дж/см<sup>2</sup> при температурі -40 °С). Зі збільшенням швидкості охолодження до 14 °С/с значення ударної в'язкості металу ЗТВ істотно зростають до 270 Дж/см<sup>2</sup> при температурі випробування 20 °С та лише до 31 Дж/см<sup>2</sup> при температурі випробування зразків -40 °С. Подальше підвищення швидкості охолодження  $w_{6/5}$  до 23 °С/с призводить до зменшення показників ударної в'язкості зразків, які випробовувалися при температурі 20 °С до  $KCV^{20} = 180$  Дж/см<sup>2</sup>, в той час продовжили дещо зростати та досягли величин  $KCV^{-40} = 35$  Дж/см<sup>2</sup>.

Слід зазначити, що показники механічних властивостей та ударної в'язкості металу ЗТВ сталі 06Г2Б, на основі якої створена корозійностійка сталь 06Г2БДП, практично знаходяться на одному з нею рівні. Стосовно ж показників ударної в'язкості металу ЗТВ модельних зразків в сталі 10ХСНД можна виділити суттєву відмінність їх

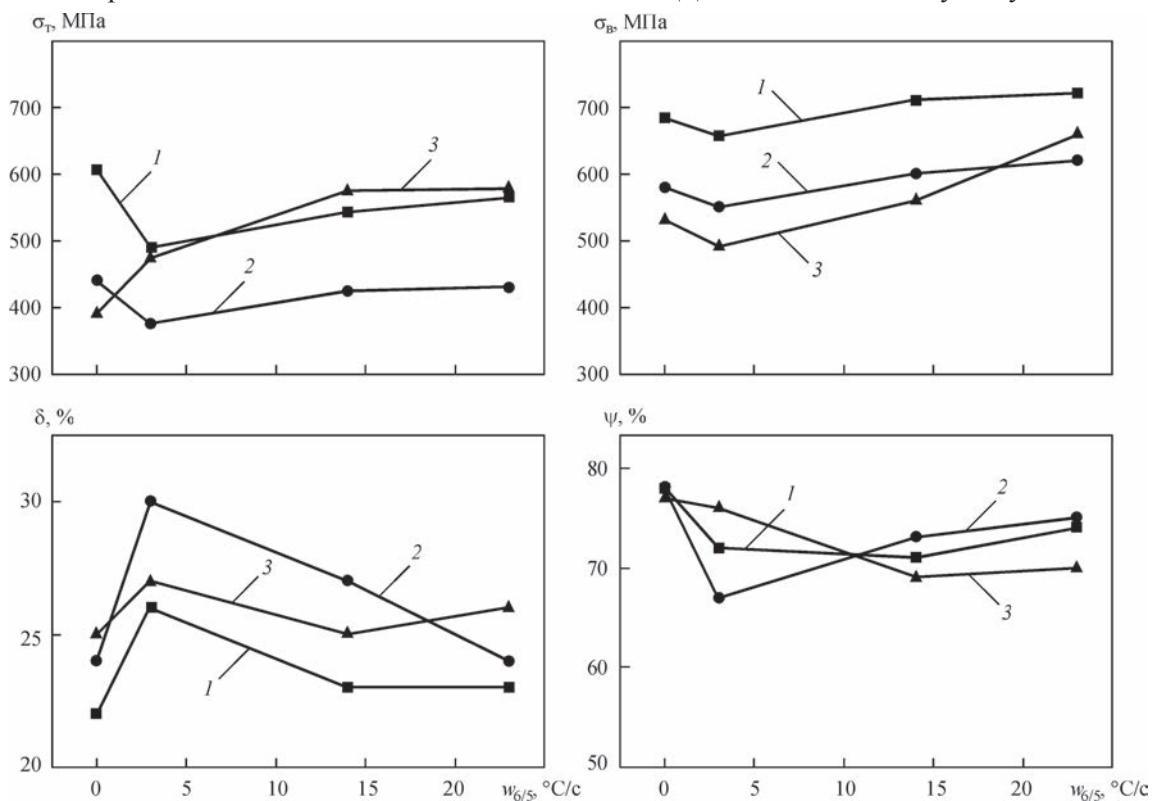


Рис. 3. Механічні властивості металу ЗТВ досліджуваних сталей в залежності від величини швидкості охолодження  $w_{6/5}$ : 1 – 06Г2БДП; 2 – 06Г2Б; 3 – 10ХСНД

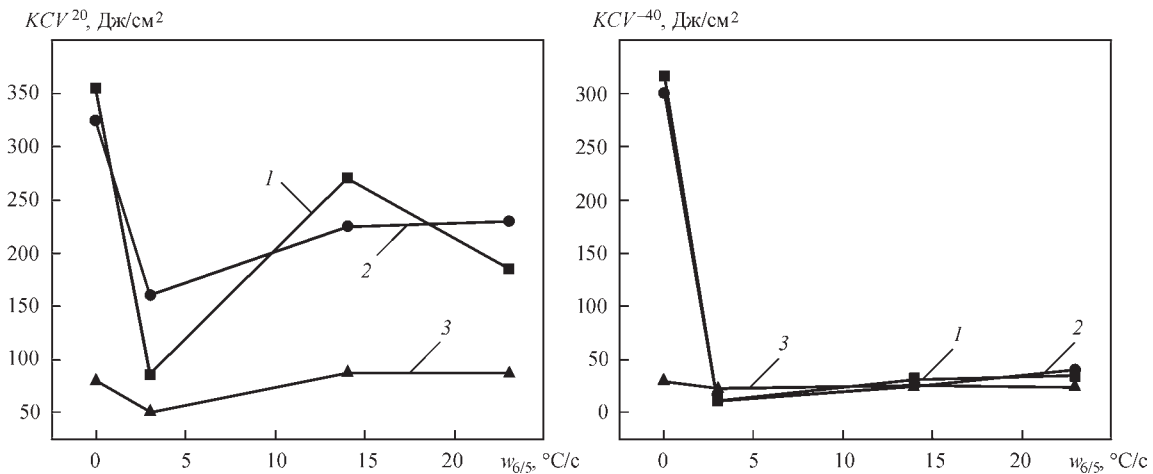


Рис. 4. Ударна в'язкість досліджуваних сталей в залежності від величини швидкості охолодження  $w_{6/5}$ : 1 – 06Г2БДП; 2 – 06Г2Б; 3 – 10ХСНД

поведінки під дією термічних циклів зварювання у порівнянні з економнолегованими сталями 06Г2Б та 06Г2БДП. А саме, показники  $KCV$  металу ЗТВ даної сталі при випробуваннях за температур 20 і  $-40$  °С слабо реагують на зміну швидкості охолодження. Про це свідчить той факт, що ударна в'язкість зразків сталі 10ХСНД, які випробувалися при температурі 20 °С, знаходяться в межах 55...75 Дж/см<sup>2</sup>, а при температурі  $-40$  °С 14...22 Дж/см<sup>2</sup>.

Зміни механічних властивостей металу ЗТВ сталі 06Г2БДП обумовлені різними структурними перетвореннями в діапазоні досліджуваних швидкостей охолодження. Про це свідчать результати металографічних досліджень. Металографічними дослідженнями встановлено, що на ділянці перегріву в металі ЗТВ сталі 06Г2БДП при швидкості охолодження  $w_{6/5} = 3$  °С/с сформувалася структура, що складається з феритно-перлітної суміші з оторочками фериту (рис. 2, б), середній розмір зерна порядку 300 мкм. Твердість такого металу становить  $HV$  270. При підвищенні  $w_{6/5}$  до 14 °С/с утворюється рівновісна бейнітна структура з вмістом бейніту верхнього 70 % і бейніту нижнього 30 %. Розмір зерна зменшується і дорівнює 100 мкм, а твердість при цьому зростає до  $HV$  303.

При подальшому зростанні швидкості охолодження до  $w_{6/5} = 23$  °С/с в імітованому металі ЗТВ формується структура, що складається з суміші верхнього (30 %) і нижнього бейніту (70 %). Завдяки цьому твердість металу коливається у межах від  $HV$  232 до  $HV$  340, що, в свою чергу призводить до зростання показників його статичної міцності. При цьому розмір зерна зменшується до 70 мкм.

Показано, що зменшення статичної міцності і ударної в'язкості металу ЗТВ сталі 06Г2БДП при швидкості охолодження  $w_{6/5} = 3$  °С/с обумовлено істотним зростанням зерна (до 300 мкм) і формуванням феритно-перлітної структури з оторочками.

Підвищення швидкості охолодження  $w_{6/5}$  до 14 °С/с призводить до зменшення середнього розміру зерна до 100 мкм, збільшення питомої частки верхнього бейніту до 70 % і, як наслідок, до підвищення показників статичної міцності, однак показники холодостійкості (ударна в'язкість при негативних температурах) знаходяться на нижній границі допустимості. Останній факт пояснюється високим вмістом бейніту верхнього (30 %) в отриманій структурі.

Таким чином, з огляду на дані, отримані з випробувань на корозійну стійкість, сталь 06Г2БДП має вищі показники за інші досліджувані сталі. Враховуючи також те, що за показниками статичної міцності, пластичності і ударної в'язкості сталь 06Г2БДП не поступається сталі 06Г2Б та переважає сталь 10ХСНД, її використання доцільно в якості альтернативи зазначеним сталям при виготовленні сучасних металоконструкцій ручним дуговим і механізованим в захисних газах зварюванням в характерному для них діапазоні швидкостей охолодження металу ЗТВ.

### Висновки

Проведені дослідження впливу термічних циклів зварювання на структуру і властивості сталі 06Г2БДП показали наступне:

- при швидкості охолодження імітованого металу ЗТВ  $w_{6/5} = 3$  °С/с (характерною для процесів зварювання під флюсом), спостерігається істотне зниження межі плинності до 490 МПа і ударної в'язкості до значень, які не задовольняють вимогам стандартів Євроном (менше 34 Дж/см<sup>2</sup>), що обумовлено істотним зростанням розмірів зерен структури, отриманої за таких умов охолодження;

- збільшити значення статичної міцності і ударної в'язкості дозволяє підвищення мінімальної швидкості охолодження імітованого металу ЗТВ  $w_{6/5}$  до 14 °С/с. При цьому в металі ЗТВ формується структура з розміром зерен близько 100 мкм.

Встановлено, що оптимальні поєднання механічних властивостей і структури можна досягти при швидкості охолодження металу ЗТВ зварних з'єднань  $w_{6/5}$  в інтервалі від 14 до 23 °С/с.

Автори висловлюють свою вдячність за допомогу у проведенні експериментів д-ру техн. наук Костіну В.А., канд. техн. наук Олексенко Т.О., інж. Жукову В.А.

### Список літератури

1. Шимановский О.В. (2020) *Нариси стосовно проблем позакласних мостів*. Київ, Сталь.
2. Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., Синеок А.Г., Задорожний В.А. (2005) Характерные повреждения сварных металлических конструкций мостов. *Автоматическая сварка*, **10**, 29–35.
3. Конюхов А.Д. (1995) *Коррозия и надежность железнодорожной техники*. Москва, Транспорт.
4. Конюхов А.Д. (2006) Стальной прокат с улучшенными свойствами для более эффективных мостовых конструкций. *Сталь*, **1**, 74–76.
5. Конюхов А.Д., Рувинская Е.М. (2002) Пролетные строения мостов из атмосферостойкой стали. *Защита металлов*, **1**, 89–95.
6. Zhang B., Chen W., Xu J. (2018) Mechanical behavior of prefabricated composite box girders with corrugated steel webs under static loads. *J. of Bridge Engineering*, **1**, 23(10).
7. Wu J., Yang D., Su Q. (2019) Inspection and evaluation strategy for uncoated weathering steel bridges. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **677**, **2**, pp. 22–23. IOP Publishing.
8. Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., А.А. Петрученко А.М. и др. (2007) Стальной прокат повышенной атмосферостойкости для сварных строительных конструкций. *Дороги і мости. Зб. наук. праць Держжор. НДІ*, **7**, 297–304.
9. Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., Синеок А.Г. (2004) Высокопрочная экономнолегированная сталь 06Г2Б с  $\sigma_s \geq 440$  МПа для мостостроения. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, **69**, 106–113.

10. Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., Гоцуляк А.А. (2006) Выбор стали для ответственных сварных строительных конструкций. *Автоматическая сварка*, **11**, 32–37.
11. Синеок А.Г., Герасименко А.М., Рябоконе В.Д. и др. (2014) Атмосферостойкий прокат классов прочности с355-500 для металлоконструкций мостов. *Мосты и тоннели: теория, исследования, практика*, **5**, 83–91.

### References

1. Shimanovskiy, O.V. (2020) *Essays on problems of out of class bridges*. Kyiv, Stal [in Russian].
2. Kovtunenکو, V.A., Sineok, A.G., Gerasimenko, A.M., Sadorozhny, V.A. (2005) Typical damages of welded metal structures of bridges. *The Paton Welding J.*, **10**, 27-32.
3. Konyukhov, A.D. (1995) *Corrosion and reliability of railway equipment*. Moscow, Transport [in Russian].
4. Konyukhov, A.D. (2006) Rolled stock with improved properties for more effective bridge structures. *Stal*, **1**, 74–76 [in Russian].
5. Konyukhov, A.D., Ruvinskaya, E.M. (2002) Bridge spans from atmospheric-resistant steel. *Zashchita Metallov*, **1**, 89–95 [in Russian].
6. Zhang, B., Chen, W., Xu, J. (2018) Mechanical behavior of prefabricated composite box girders with corrugated steel webs under static loads. *J. of Bridge Engineering*, **1**, 23(10).
7. Wu, J., Yang, D., Su, Q. (2019) Inspection and evaluation strategy for uncoated weathering steel bridges. *InIOP Conference Series: Materials Sci. and Engin.*, **677**, **2**, 22–23. IOP Publishing.
8. Kovtunenکو, V.A., Gerasimenko, A.M., Petruchenko, A.A. et al. (2007) Steel roll stock of improved atmosphere resistance for welded building structures. *In: Dorogy i Mosty, NDI*, **7**, 297-304 [in Russian].
9. Kovtunenکو, V.A., Gerasimenko, A.M., High-strength sparsely-alloyed steel 06G2B  $\geq 440$  MPa for bridge building. *Avtomobilni Dorogy i Dorozhnie Budivnytsvo*, **69**, 106-113 [in Russian].
10. Kovtunenکو, V.A., Gerasimenko, A.M., Gotsulyak, A.A. (2006) Selection of steel for critical building welded structures. *The Paton Welding J.*, **11**, 27-31.
11. Sineok, A.G., Gerasimenko, A.M., Ryabokon, V.D. et al. (2014) Atmosphere-resistant rolled stock of c355-500 strength class for bridge metal structures. *Mosty i Tonneli: Teoriya, Issledovaniya, Praktika*, **5**, 83-91 [in Russian].

## IMPACT OF THERMAL CYCLES OF WELDING ON FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CORROSION-RESISTANT STEEL 06G2BDP

A.V. Zavdoveev<sup>1</sup>, V.D. Poznyakov<sup>1</sup>, S.L. Zhdanov<sup>1</sup>, M. Rogante<sup>2</sup>, A.O. Maksymenko<sup>1</sup>, O.G. Sineok<sup>1</sup>, A.M. Gerasimenko<sup>1</sup>

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Rogante Engineering Office, 62012 Civitanova Marche, Italy.

High-strength low-alloyed steels with high service properties, in particular, resistance to atmospheric corrosion, become ever wider accepted in mechanical and industrial engineering. Their application allows not only reducing the specific weight of metal structures, but also increasing their reliability and operating life. In view of that, 06G2BDP steel with higher corrosion resistance was developed on the base of 06G2B steel. Copper and phosphorus content in the steel was increased, in order to improve its corrosion resistance. The work deals with the issue of the impact of thermal cycles of welding on the mechanical properties and structure of HAZ metal in welded joints of atmospheric-resistant steel 06G2BDP. It is shown that by the values of static strength, ductility and impact toughness 06G2BDP steel is not inferior to 06G2B steel, and is superior to 10KhCND steel. Its application is rational as an alternative to the above-mentioned steels in fabrication of modern metal structures by gas-shielded manual and mechanized arc welding in the specified for them range of HAZ metal cooling rates. 11 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

*Keywords: corrosion-resistant steel, thermal cycle of welding, heat-affected zone, structure, properties*

Надійшла до редакції  
26.08.2020