

ВИКОРИСТАННЯ СТАЛЕЙ КЛАСІВ МІЦНОСТІ С350–С490 ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В.Д. Позняков

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджено вплив термічних циклів дугового зварювання на структуру і механічні властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань мікрولةгованих конструкційних сталей класу міцності від С350 до С490. Встановлено, що в результаті дії термічних циклів зварювання структура металу зони термічного впливу більшості мікрولةгованих сталей класу міцності від С350 до С490, за винятком сталі 09Г2СЮч, в широкому діапазоні швидкостей охолодження залишається стабільно бейнітною, а механічні властивості суттєво не змінюються. Внаслідок зварювання структура металу зони термічного впливу сталі 09Г2СЮч може змінюватися від бейнітної при помірних швидкостях охолодження до бейнітно-мартенситної та мартенситної по мірі збільшення швидкості охолодження металу. За рахунок цього показники статичної міцності та ударної в'язкості металу зростають, а його пластичні властивості зменшуються. Бібліогр. 12, табл. 5, рис. 7.

Ключові слова: конструкційні сталі, термічний цикл зварювання, структура металу, механічні властивості, зварні будівельні конструкції

Одним із головних завдань сучасного розвитку промисловості є підвищення техніко-економічних показників машин, механізмів та інженерних споруд на основі зниження їх питомої металоемності, збільшення експлуатаційної надійності та довговічності. У світовій практиці це досягається за рахунок застосування при виготовленні зварних металевих конструкцій високоміцних сталей з межею плинності 350 МПа і більше.

Зокрема, низьколеговані високоміцні сталі класу міцності С355–С490 широко використовуються в мостобудуванні, при виробництві резервуарів для зберігання і переробки газу та нафти, при виготовленні будівельних конструкцій, тощо. Оскільки переважна більшість зазначених металевих конструкцій є зварними, до таких сталей існують певні вимоги, а саме, вони повинні добре зварюватися, забезпечувати високу пластичність та рівномірність зварних з'єднань, а також показники ударної в'язкості на рівні вимог, які регламентуються державними будівельними нормами, які в останні роки зазнали певних змін. Насамперед ці зміни стосуються показників ударної в'язкості та відносного звуження прокату у Z-напрямку. Згідно сучасним вимогам сталі, а відповідно, метал шва і зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань повинні мати ударну в'язкість $KCV^{20} \geq 25$ Дж/см² для сталей з $\sigma_T = 290 \dots 390$ МПа та $KCV^{40} \geq 25$ Дж/см² для сталей з $\sigma_T \geq 390$ МПа і відносне звуження у Z-напрямку (Ψ_z) не менше 35, 25 та 15 % для першої, другої та третьої груп конструкцій відповідно.

До теперішнього часу при виготовленні будівельних конструкцій на теренах країн СНД

все ще широко використовуються низьколеговані сталі класу міцності С350–С390, такі як 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД та інші, які були розроблені ще за часів СРСР (табл. 1). Всі зазначені в табл. 1 низьколеговані конструкційні сталі цілком задовольняють сучасним вимогам щодо статичної міцності і пластичних властивостей сталей вздовж та поперек прокату (табл. 2). У більшості із них ударна в'язкість також знаходиться на рівні цих вимог. Але для збереження необхідного рівня показників KCV металу ЗТВ швидкість охолодження зварних з'єднань в інтервалі температур 600...500 °С ($w_{6/5}$) повинна знаходитися в діапазоні 15...20 °С/с. Це потребує суттєвого обмеження режимів зварювання, що ускладнює технологічний процес та робить його малопродуктивним. Окрім цього, Ψ_z у таких сталей не перевищує 15 %, що лімітує їх використання в зварних елементах, які працюють у напрямку товщини прокату.

Починаючи з 1990-х років в металургійній промисловості внаслідок значних економічних, господарських та технічних перетворень відбулись певні зміни. Масовий перехід підприємств на економічну самостійність спонукав до створення сталей, виробництво яких найбільш економічно вигідне для конкретних господарських умов комбінатів. Інтенсивна інтеграція вітчизняної металургії в світову економіку визвала необхідність до перегляду стандартів оцінки якості сталей. Перш за все це стосується оцінки їх ударної в'язкості. Окрім загальноприйнятого у вітчизняній промисловості підходу щодо визначення ударної в'язкості, за результатами іспиту зразків з U-подібним надрізом, почали використовувати зразки, які мають V-подібний надріз. Їх застосування при ви-

Таблиця 1. Вимоги до хімічного складу сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій

Марка сталі	Масова частка елементів, ваг. %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	S	P
09Г2С	≤0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,035	<0,03
15ХСНД	0,12...0,18	0,4...0,7	0,4...0,7	0,6...0,9	0,3...0,6	-	-	-	0,2...0,4	<0,035	<0,03
17Г1С	0,15...0,20	0,4...0,6	1,15...1,6	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,035	<0,03
10Г2С1	≤0,12	0,8...1,1	1,3...1,65	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,035	<0,03
10ХСНД	≤0,12	0,8...1,1	0,5...0,8	0,6...0,9	0,5...0,8	-	-	-	0,4...0,6	<0,035	<0,03

Таблиця 2. Вимоги до механічних властивостей сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій (не менше)

Марка сталі	σ_p , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCV^{40} , Дж/см ²
09Г2С	350	500	21	34
15ХСНД	350	500	21	29
17Г1С	350	500	22	29
10Г2С1	390	520	19	29
10ХСНД	390	530...660	19	29

пробуваннях дозволяє більш точно оцінити здатність сталей опиратися руйнуванню. В той же час такий підхід виявив певні вади вітчизняних сталей. У зв'язку з цим виникла потреба в модернізації існуючих та створенні нових сталей, які б дозволили задовольнити постійно зростаючі вимоги виробництва. Як результат, в останні роки вітчизняними металургійними комбінатами було освоєно виробництво нових сталей підвищеної та високої міцності, які виготовляються за вітчизняними та міжнародними стандартами і цілком відповідають вимогам Євроном.

Високої міцності, пластичності та ударної в'язкості (табл. 3) сучасні високоміцні конструкційні сталі набувають за рахунок формування в металі дрібнозернистої структури певного складу. Це досягається як за рахунок легування сталей (як правило, вони містять марганець, обмежену до 0,5 % кількість кремнію, до 0,15 % вуглецю та до 0,012 % азоту і мікролеговані окремо або в поєд-

Таблиця 3. Вимоги до механічних властивостей нових мікролегованих сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій (не менше)

Марка сталі, клас міцності	σ_p , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCV^{40} , Дж/см ²
06ГБ, 390	390	490	22	98
06Г2Б, 440	440	540	22	98
09Г2СЮч	450	570	19	29
10Г2ФБ	490	565	22	29

Таблиця 4. Вимоги до хімічного складу нових мікролегованих сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій

Марка сталі, клас міцності	Масова частка елементів, ваг. %										
	C	Si	Mn	Mo	Al	Nb	V	Ce	Cu	S	P
06ГБ, 390	0,04...0,08	0,25...0,50	1,1...1,4	≤0,08	≤0,05	0,01...0,03	0,02...0,05	-	<0,3	<0,01	<0,025
06Г2Б, 440	0,04...0,08	0,25...0,50	1,3...1,6	≤0,10	0,02...0,05	0,03...0,05	0,03...0,07	-	<0,3	<0,01	<0,025
09Г2СЮч	0,08...0,11	0,3...0,6	1,9...2,2	-	0,035...0,065	-	-	0,002...0,005	0,3-0,6	<0,015	<0,02
10Г2ФБ	≤0,15	≤0,35	≤1,7	≤0,3	0,02...0,03	≤0,08	≤0,1	-	-	<0,01	<0,02

нанні ванадієм, алюмінієм, ніобієм, церієм), так і в результаті контрольованої прокатки, або спеціальної термічної обробки сталевого прокату (табл. 4).

Враховуючи те, що зазначені сучасні високоміцні конструкційні сталі, виготовлення яких освоєно на металургійних підприємствах України, мають винятково високі механічні властивості, всі вони були рекомендовані та внесені до Державних будівельних норм як такі, що можуть використовуватися при виготовленні будівельних металевих конструкцій. Для обґрунтування такої можливості в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона були виконані комплексні дослідження, які засвідчили добру здатність цих сталей до зварювання та дозволили визначити умови зварювання, при яких з'єднання даних сталей будуть повністю відповідати сучасним вимогам до металевих будівельних конструкцій.

Оцінка здатності сталей до зварювання зводиться до визначення оптимальних умов зварювання, за яких виключається можливість утворення в з'єднаннях холодних тріщин, а в металі зони термічного впливу структур, які сприятимуть зниженню його міцності, пластичності та холодостійкості.

На відміну від сталевого прокату на формування структури в металі ЗТВ зварних з'єднань високоміцних сталей суттєво впливає термічний цикл зварювання (ТЦЗ) [1–9]. Найбільш суттєві зміни в структурі сталі при зварюванні відбуваються на ділянці перегріву металу ЗТВ, тобто в тій його зоні, яка знаходиться в безпосередній близькості до шва і нагрівається до температури 1300...1150 °С. При дуговому зварюванні параметри ТЦЗ залежать від багатьох факторів. Найважливішими з них є погонна енергія зварювання, початкова температура металу та його товщина, тип зварного з'єднання. Зі збільшенням погонної енергії зварювання та початкової температури металу

швидкість охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур 600...500 С ($w_{6/5}$, °C/c) зменшується, а при збільшенні товщини металу – зростає. Зважаючи на це, саме показник $w_{6/5}$ нами вибрано у якості критерію, який дозволить порівняти реакцію сталей на ТЦЗ та визначити яким чином умови нагріву та охолодження металу впливають на його структуру і механічні властивості.

Дослідження, результати яких наведено в даній статті, виконувалися стосовно оброблених по термічному циклу зварювання зразків та зразків, які виготовлялись з наплавлень на пластину. Вплив термічних циклів зварювання на структуру металу ЗТВ вивчали методом дилатометричних досліджень та оптичної мікроскопії [10]. Механічні випробування на статичний розтяг та ударний вигин проводили з використанням стандартних зразків: тип II по ГОСТ 6996-66 та тип IX по ГОСТ 9454-78.

Для визначення впливу хімічного складу та умов охолодження металу на його структуру використовували діаграми перетворення аустеніту, які побудовані з урахуванням процесів, що відбуваються при зварюванні. При цьому, щоб забезпечити характерну для зварювання високу стійкість аустеніту, при побудові діаграм перетворення вибирали такі умови нагрівання (w_H), за яких достатньо чітко починають проявлятися індивідуальні особливості сталей щодо схильності до росту зерна. Зазвичай під час дилатометричних досліджень швидкість нагрівання зразків встановлюють в межах 150...300 °C/c [11]. В наших дослідженнях вона становила 150 °C/c. Швидкості охолодження дилатометричних зразків вибирали виходячи з необхідності забезпечення в інтервалі температур найменшої стійкості аустеніту таких умов охолодження, які будуть максималь-

но наближені до умов охолодження металу на ділянці перегріву зони термічного впливу з'єднань, виконаних на характерних для процесів дугового зварювання режимах.

Швидкість нагрівання регулювали змінюючи по заданій програмі силу струму, який проходить через зразок, а швидкість охолодження – охолоджуючи пристрої, які передають струм від нагрівальної машини до зразка водою, обдуваючи зразки інертним газом.

Завдяки жорсткому закріпленню зразків в нагрівальній машині в них на ділянці рівномірного нагрівання імітуються процеси розвитку внутрішніх деформацій, які по величині і характеру змін близькі до поздовжніх внутрішніх деформацій, що утворюються на ділянці перегріву металу ЗТВ при дуговому наплавленні шару металу на кромки пластин.

Побудовані на підставі діаграми перетворення аустеніту залежності щодо зміни структурних складових, які відбуваються при різних швидкостях охолодження на ділянці перегріву металу ЗТВ нових високоміцних мікролегованих конструкцій сталей, представлено на рис. 1.

На відміну від низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД в яких перетворення аустеніту в значній мірі залежить від швидкості охолодження металу та може відбуватися в феритній (при помірній, до 10 °C/c, швидкості охолодження) та в бейнітній і мартенситній областях при підвищених швидкостях охолодження, в мікролегованих сталях марок 06ГБД, 06Г2Б та 10Г2ФБ воно відбувається суттєво інакше. Майже у всьому дослідженому діапазоні швидкостей охолодження перетворення аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ сталей 06Г2Б та 10Г2ФБ відбувається пере-

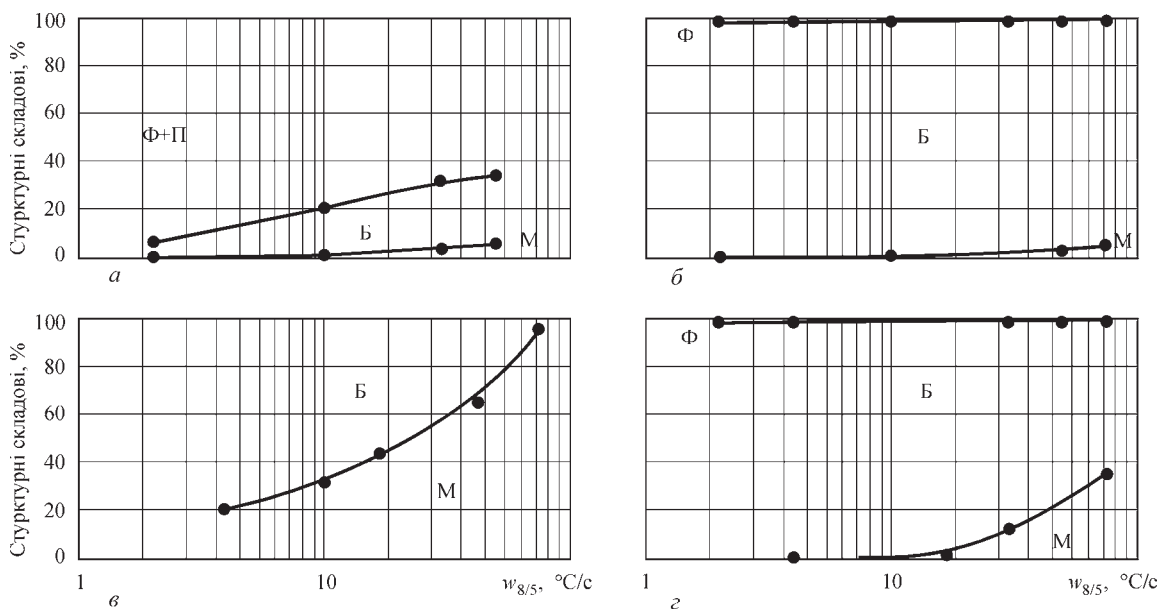


Рис. 1. Діаграми структурних перетворень аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ низьколегованих високоміцних сталей типу 06ГБД (а); 06Г2Б (б); 09Г2СЮч (в); 10Г2ФБ (г)

важно з утворенням бейніту, а в сталі 06ГБД – фериту, перліту та бейніту [1, 2].

Винятком серед досліджених мікролегованих конструкційних сталей є сталь марки 09Г2СЮч [5]. В ній, як в більшості низьколегованих високоміцних конструкційних сталях, перетворення аустеніту відбувається з утворенням бейніту та мартенситу.

Надалі розглянемо як умови охолодження металу під впливом ТЦЗ впливають на його механічні властивості.

Для отримання інформації про вплив ТЦЗ на показники статичної міцності та пластичні властивості металу ЗТВ зварних з'єднань використовують стандартні зразки на розтяг, які виготовляються із заздалегідь оброблених по термічному циклу зварювання брусків металу, що досліджується. Це пов'язано з тим, що зазвичай розміри ЗТВ та окремих її складових значно менші ніж розміри зразків, які випробовуються. Тому в даному випадку дослідження щодо змін межі плинності, межі міцності, відносного подовження та відносного звуження, які відбуваються в металі ЗТВ сталей під впливом ТЦЗ, отримані саме з використанням вище зазначеного підходу. При проведенні досліджень використовувались брускочки розміром 13×13×150 мм, які оброблялися по термічному циклу зварювання на установці МСР-75, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [12].

Для моделювання ТЦС зразки нагрівалися струмом, що проходить, до температури 1250 °С (швидкість нагріву 150 °С/с), а потім охолоджува-

лися за заданою програмою. За рахунок регулювання інтенсивності обдування зразків інертним газом швидкість їх охолодження в інтервалі температур 600...500 °С змінювали від 3 до 50 °С/с. Режим нагріву–охолодження зразків контролювався хромельалюмельовою термопарою діаметром 0,5 мм, а швидкість охолодження оцінювалася за результатами обробки осцилограм, запис яких проводили на осцилографі 117/1 в координатах температура – час.

Для випробування на статичний (короткочасний) розтяг із оброблених по ТЦЗ брускочків механічним способом виготовляли зразки типу II відповідно до ГОСТ 6996-96 (по 2 зразки на кожну швидкість охолодження). Випробування виконували відповідно до ГОСТ 6996-66 при температурі 20 °С. Результати досліджень наведено на рис. 2.

Вони свідчать про те, що при охолодженні металу на ділянці перегріву ЗТВ з швидкістю охолодження $w_{6/5}$, яка не перевищує 10 °С/с, він може знеміцнюватися. Це проявляється в тому, що значення його межі плинності зменшуються по відношенню до основного металу на 10...25 %. В діапазоні швидкостей від 3...10 °С/с значення $\sigma_{0,2}$ та σ_B металу ЗТВ стрімко зростають та в подальшому підвищуються досить повільно. Це цілком закономірно, оскільки, як свідчать дані, наведені на рис. 2, структура металу ЗТВ високоміцних мікролегованих конструкційних сталей в широкому діапазоні швидкостей охолодження є стабільною. Пластичні властивості металу ЗТВ цих сталей також дещо зменшуються, але залишаються досить

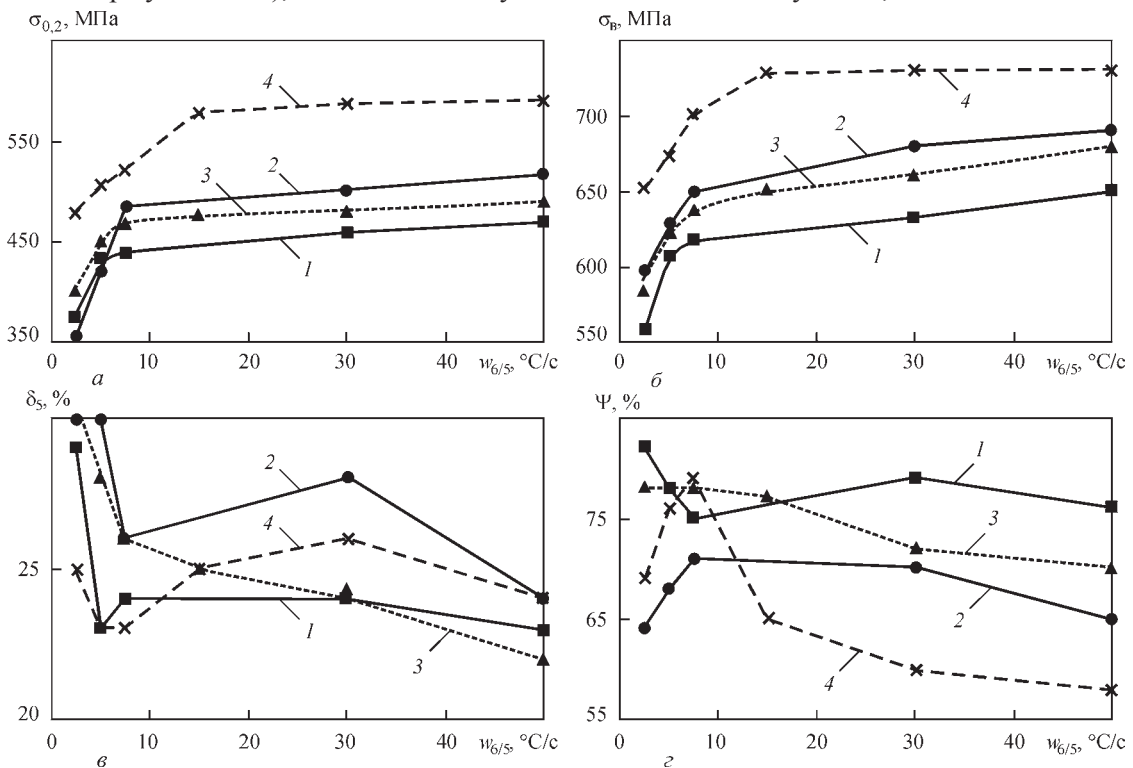


Рис. 2. Вплив швидкості охолодження $w_{6/5}$ на показники межі плинності (а), межі міцності (б), відносного подовження (в) та відносного звуження (з) металу ЗТВ сталей: 06ГБД (1), 09Г2СЮч (2), 06Г2Б (3), 10Г2ФБ (4)

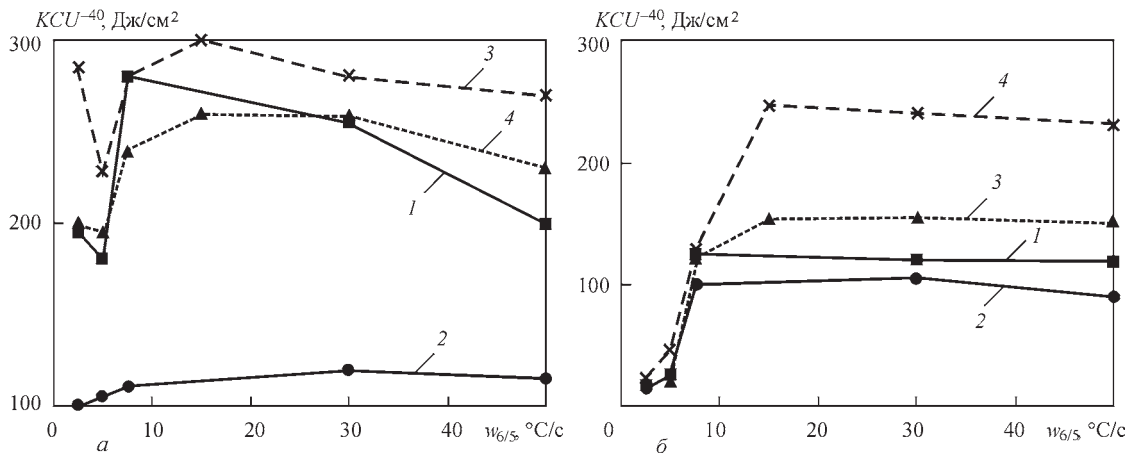


Рис. 3. Вплив швидкості охолодження $w_{6/5}$ на показники ударної в'язкості металу ЗТВ сталей 06ГБД (1), 09Г2СЮч (2), 06Г2Б (3), 10Г2ФБ (4)

високими та стабільними в широкому діапазоні швидкостей охолодження.

Вплив термічних циклів зварювання (ТЦЗ) на показники ударної в'язкості металу ЗТВ конструкційних сталей, що досліджувались, вивчали з використанням «валикової проби» відповідно до ГОСТ 13585-68.

Щоб забезпечити умови охолодження зварних з'єднань з характерною для ручного, механізованого в захисних газах та автоматичного під шаром флюсу дугових процесів зварювання металу різної товщини, а саме в діапазоні від 3,0 до 50 °C/c, наплавлення на пластини товщиною 20 мм виконували дротом суцільного перетину діаметром 4,0 мм під шаром флюсу на режимах, які наведено у табл. 5.

Для визначення ударної в'язкості із «валикової проби» вирізалися заготовки, з яких виготовлялися зразки перерізом 10×10×55 мм (тип VI з круглим надрізом і тип IX з гострим надрізом). Випробування зразків проводили при температурі -40 °C.

Дослідження, результати яких наведено на рис. 3, показали, що за умов охолодження ЗТВ зварних з'єднань з швидкістю $w_{6/5}$ більше ніж 5 °C/c ударна в'язкість металу KCV^{-40} на ділянці перегріву забезпечується на рівні, який суттєво перевищує сучасні вимоги до будівельних металевих конструкцій. При більш уповільненому охолодженні значення KCV^{-40} можуть зменшуватися до критичних позначок.

В цілому виконані дослідження засвідчили, що нові мікрولةговані конструкційні сталі класів Таблиця 5. Режими, на яких виконувалося наплавлення на пластини

$I_{зв}$, А	U_d , В	$v_{зв}$, М/Г	$Q_{зв}$, кДж/см	$w_{8/5}$, °C/c
580...600	34...38	9,8	62,7	3
580...600	34...38	14,7	41,8	6
580...600	34...38	17,3	35,7	10
580...600	34...38	21,7	28,6	20
380...400	30...32	15,2	23,0	30
380...400	30...32	20,1	16,7	50

міцності С350–С490 за механічними властивостями переважають низьколеговані конструкційні сталі класів міцності С350–С390, які були розроблені в СРСР, є більш технологічними і дозволяють забезпечити комплекс властивостей зварним з'єднанням на рівні сучасних світових вимог до металевих будівельних конструкцій. Саме це було поштовхом до того, що з початку нинішнього тисячоліття такі сталі почали в Україні поетапно впроваджуватися у виробництво для виготовлення зварних металевих конструкцій для потреб будівельної галузі в мостобудуванні, машинобудуванні, тощо.

Зокрема, розроблені на основі наведених вище результатів досліджень технологічні процеси дугового зварювання у 2003 р. впроваджені при виготовленні унікальних будівельних споруд при будівництві у м. Броди резервуару для зберігання нафти місткістю 75000 м³ із сталевого прокату 06Г2Б класу міцності С440 (рис. 4).

В подальшому набутий при виконанні даної роботи досвід було використано під час виготовлення металоконструкції резервуарів місткістю 50000 м³ при модернізації резервуарного парку в м. Мозир (Республіка Білорусь) на ділянці магістральних нафтопроводів. Металеві конструкції виготовлені зі сталевого прокату 06ГБ класу міцності С390 товщиною 20...30 мм із застосуванням механізованого зварювання в

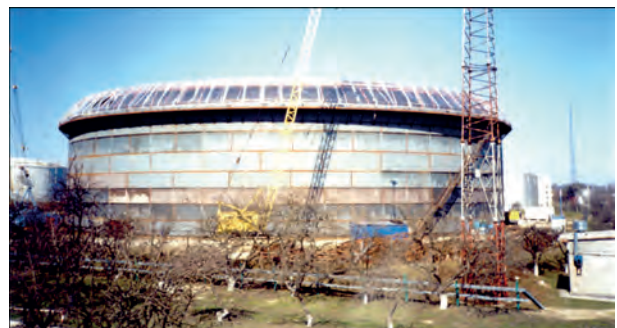


Рис. 4. Резервуар для зберігання нафти місткістю 75000 м³ із сталевого прокату 06Г2Б-440



Рис. 5. Будівництво Подільського мостового переходу у м. Києві, арки якого виготовлено зі сталі 06ГБД класу міцності С390

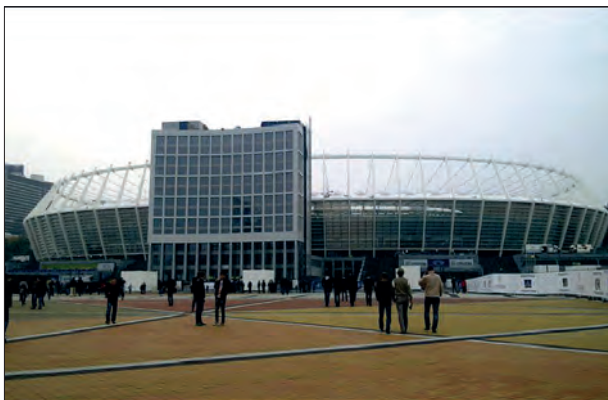


Рис. 6. НСК «Олімпійський» у м. Києві

суміші газів (82% Ar + 18% CO₂) дротом суцільного перетину.

У 2006 р. сталь 06ГБД класу міцності С390 та технології її зварювання застосовано при виготовленні на заводі металоконструкцій ім. І.В. Бабушкіна (м. Дніпро) металевих конструкцій для Подільського мостового переходу через р. Дніпро у м. Києві (рис. 5).

При підготовці до проведення в Україні європейського футбольного чемпіонату ЄВРО-2012 було розроблено та атестовано технології автоматичного зварювання під шаром флюсу, механізованої в захисних газах і ручного дугового зварювання сталі S 355 J2 (аналог сталі 10Г2ФБ класу міцності С355)) товщиною 16...100 мм. У 2010–2011 рр. вони були впроваджені під час виготовлення і при монтажі коробчастих металоконструкцій для навісу над НСК «Олімпійський» (м. Київ) в період його реконструкції. Зварна металоконструкція загальною вагою 40 тис. т складається з 80 нижніх і фасадних колон довжиною від 23 до 25,5 м, вагою від 25 до 30 т кожна, а також балок нижнього і верхнього стиснутого кілець (рис. 6).

Набутий при реконструкції НСК «Олімпійський» досвід сприяв успішному виконанню у 2013 р. нового завдання, а саме, розробці технології зварювання для виготовлення і монтажу металоконструкцій трубчастого перетину із сталі



Рис. 7. Ремонт доменної печі ДП-2 на ВАТ «Меткомбінат Азовсталь» з використанням сталевих прокату 06Г2Б класу міцності С440

10Г2ФБЮ класу міцності С490 для футбольного стадіону на 45 000 глядачів.

Все більш широкого використання нові конструкційні високоміцні сталі знаходять в Україні і при будівництві та капітальному ремонті інженерних споруд металургійних підприємств. Зокрема, сталь марки 06Г2Б класу міцності С440 та розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона зварювальні технології були впроваджені під час ремонту доменної печі ДП-2 на ВАТ «Меткомбінат Азовсталь» (рис. 7), а також на Єнакієвському та Криворізьському металургійних комбінатах.

Висновки

1. На відміну від більшості конструкційних низьколегованих сталей, перетворення аустеніту в мікролегованих ванадієм та ніобієм сталях класу міцності від С350 до С 490 при безперервному охолодженні по термічному циклу зварювання відбувається переважно в бейнітній області.

2. Внаслідок структурних перетворень, які відбуваються в сталях під впливом термічних циклів зварювання, показники статичної міцності металу зони термічного впливу зварних з'єднань зростають, а пластичні властивості зменшуються.

3. Істотне зменшення показників ударної в'язкості в металі зони термічного впливу зварних з'єднань мікролегованих конструкційних сталей спостерігається при $w_{6/5} \leq 5$ °C/с. Із збільшенням швидкості охолодження ударна в'язкість металу зони термічного впливу стрімко зростає, та в деяких сталях майже досягає рівня основного металу.

Список літератури

1. Позняков В.Д., Довженко В.А., Максименко А.А. и др. (2010) Структурные превращения при сварке стали 10Г2ФБ и свойства сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **11**, 12–16.
2. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. и др. (2013) Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД и 06Г2Б. *Там же*, **4**, 9–16.
3. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. (2012) Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S355 J2). *Там же*, **8**, 7–11.
4. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Завдоев А.В. и др. (2016) Свариваемость высокопрочной микролегированной стали S460M. *Там же*, **12**, 23–30.
5. Миходуй Л.И., Кирьян В.И., Позняков В.Д. и др. (2003) Экономнолегированные высокопрочные стали для сварных конструкций, *Там же*, **5**, 36–40.
6. Ufuah E. (2013) Elevated Temperature Mechanical Properties of Butt-Welded Connections Made with High Strength Steel Grades S355 and S460M. *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures International Conference Proceedings, Miskolc, Hungary, April 24–26*, pp. 407–412.
7. Nazarov A., Yakushev E., Shabalov I. et al. (2014) Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium, niobium and vanadium. *Metallurgist*, **7**, 9–10, 911–917.
8. Ragu Nathan S., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Rao A. G. (2015) Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. *Defence Technology*, **11**, 308–317.
9. Show. B.K., Veerababu, R., Balamuralikrishnan, R., Malakondaiah, G. (2010) Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of microalloyed HSLA steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **527**, 1595–1604.
10. Григоренко Г.М., Костин В.А., Орловский В.Ю. (2008) Современные возможности моделирования превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, **3**, 31–34.
11. Seyffarth P. (1982) *Schweiss – Z.T.U. – Schaubilder*. Berlin, VEB Verlag.
12. Саржевский В.А., Сазонов В.Я. (1981) Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР75. *Автоматическая сварка*, **5**, 69–70.

References

1. Zhdanov, S.L., Poznyakov, V.D., Maksimenko, A.A. Dovzhenko, V.A. et al. (2010) Structure and properties of arc-welded joints on steel 10G2FB. *The Paton Welding J.*, 8-12.
2. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.A. et al. (2013) Weldability of sparsely-alloyed steels 06GBD and 06G2B. *Ibid.*, **4**, 8-14.
3. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.A. (2012) Structure and properties of welded joints of steel S390 (S355 J2). *Ibid.*, **8**, 6-10.
4. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Zavdoveev, A.V. et al. (2016) Weldability of high-strength microalloyed steel S460M. *Ibid.*, **12**, 23-30.
5. Mikhoduj, L.I., Kirian, V.I., Poznyakov, V.D. et al. (2003) Sparsely-alloyed high-strength steels for welded structures. *Ibid.*, **5**, 34-37.
6. Ufuah, E. (2013) Elevated temperature mechanical properties of butt-welded connections made with high-strength steel grades S355 and S460M. *In: Proc. of Int. Conf on Design, Fabrication and Economy of Metal Structures (Miskolc, Hungary, April 24-26)*, 407-412.
7. Nazarov, A., Yakushev, E., Shabalov, I. et al. (2014) Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium and vanadium. *Metallurgist*, **7**(9-10), 911-917.
8. Ragu Nathan, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rao, A.G. (2015) Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. *Defense Technology*, **11**, 308-317.
9. Show. B.K., Veerababu, R., Balamuralikrishnan, R., Malakondaiah, G. (2010) Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of microalloyed HSLA steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **527**, 1595-1604.
10. Grigorenko, G.M., Kostin, V.A., Orlovsky, V.Yu. (2008) Modern possibilities for modeling of austenite transformations in low-alloyed steel welds. *The Paton Welding J.*, **3**, 31-34.
11. Seyffarth, P. (1982) *Schweiss – Z.T.U. – Schaubilder* Berlin, VEB Verlag.
12. Sarzhevsky V.A., Sazonov, V.Ya. (1981) Installation for simulation of welding thermal cycles based on machine MCR75. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 69-70 [in Russian].

USE OF STEELS OF STRENGTH CLASS C350-C490 IN THE PRODUCTION OF BUILDING WELDED STRUCTURES

V.D. Poznyakov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The effect of thermal cycles of arc welding on the structure and mechanical properties of metal of the heat-affected-zone of welded joints of microalloyed structural steels of strength class from C350 to C490 was investigated. It was established that as a result of the action of thermal welding cycles, the metal structure of the heat-affected-zone of most microalloyed steels of strength class from C350 to C490, except for 09G2SYuch steel, remains stable bainite in a wide range of cooling rates, and mechanical properties do not change significantly. As a result of welding, at moderate cooling rates the structure of the heat-affected-zone metal in the steel 09G2SYuch can change from bainite to bainite-martensitic and martensitic as the metal cooling rate increases. As a result of that, the values of static strength and impact toughness of the metal are increasing and its ductile properties are reduced. 12 Ref., 5 Tabl., 7 Fig.

Keywords: structural steels, thermal cycle of welding, metal structure, mechanical properties, welded building structures

Надійшла до редакції
17.01.2020