

ВПЛИВ ТЕРМІЧНИХ ЦИКЛІВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ З ГРАНИЦЕЮ ПЛИННОСТІ 390...490 МПа

Р.В. Богодіст, С.Л. Жданов

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: mail.ruslan@ukr.net

У роботі розглянуто закономірності фазово-структурних перетворень в імітованому металі зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань сталей 06ГБД та S460M з границею плинності 390...490 МПа. З використанням комплексу Gleeble-3800 побудовано термокінетичні діаграми перетворення аустеніту в імітованому металі ЗТВ. Металографічні дослідження дали можливість оцінити вплив зміни структурних складових на механічні властивості металу ЗТВ під дією різних термічних циклів зварювання. Встановлено оптимальні діапазони швидкостей охолодження імітованого металу ЗТВ, при яких зберігаються значення показників механічних властивостей на рівні основного металу. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: низьколегована сталь, дугове зварювання, термічний цикл зварювання, механічні властивості, структура, швидкість охолодження, зона термічного впливу

Вступ. Рациональне використання сучасних мікролегованих матеріалів з високими показниками механічних властивостей дозволяє ефективно знижувати метало- та енергоємність, підвищувати надійність і довговічність, розширювати технічні можливості інженерних споруд і вирішувати нові задачі без технічного переозброєння виробництва. Такого ефекту можна досягти використовуючи нові високоміцні сталі з границею плинності більш як 390 МПа [1–6]. Ці сталі містять обмежену кількість вуглецю (до 0,09 мас. %) і таких легуючих елементів, як марганець, ніобій, ванадій тощо.

Для досягнення комплексу їхніх механічних властивостей, що вимагаються, використовують термічну або термомеханічну обробку (контрольовану прокатку). В окремих випадках для підвищення корозійної стійкості в сталі вводять мідь у кількості до 0,5 мас. %. Використання зазначеного високоміцного прокату дозволяє до 80 % знизити загальну металоємність конструкцій у порівнянні з виробами зі сталей Ст.3 та 09Г2С [7].

При виготовленні конструкцій із низьколегованих сталей з границею плинності 390...490 МПа актуальним стає питання вивчення їхньої здатності до зварювання. Відомо, що в процесі зварювання метал зони термічного впливу (ЗТВ) зазнає структурних перетворень, які призводять до зміни механічних властивостей. У зв'язку з цим у статті розглянуто вплив термічних циклів зварювання (ТЦЗ) на структуру та механічні властивості металу ЗТВ зварних з'єднань.

© Р.В. Богодіст, С.Л. Жданов

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Методики проведення досліджень. Для проведення досліджень були відібрані мікролеговані сталі 06ГБД завтовшки 20 мм [9] та термомеханічно зміцнена сталь S460M завтовшки 16 мм [8]. Хімічний склад і механічні властивості досліджуваних сталей наведено в таблиці.

Характер структурних перетворень у металі зварних з'єднань вивчали методом імітації ТЦЗ із використанням комплексу Gleeble-3800 [10], оснащеного швидкодіючим дилатометром. Дослідження виконували з використанням циліндричних зразків діаметром 6 мм та завдовжки 80 мм, виготовлених із листів прокатаних сталей 06ГБД та S460M. Ці зразки нагрівали у вакуумній камері до температури 1200 °C зі швидкістю 150 °C/c, а потім охолоджували в інтервалі температур 600...500 °C з різними швидкостями. Діапазон швидкостей охолодження відповідав практично всім способам зварювання (автоматичне дугове зварювання під шаром флюсу, механізоване дугове зварювання в середовищі захисних газів, ручне дугове зварювання покритими електродами), які використовуються при виготовленні металоконструкцій.

Металографічні дослідження проводили на світловому мікроскопі Neophot-32 при різних збільшеннях (×200, ×500). Мікроструктуру виявляли хімічним травленням у 4 % спиртовому розчині азотної кислоти. Мікротвердість структурних складових вимірювали на твердомірі М-400 фірми Лесо при навантаженні 100 г ($HV_{0,1}$), а інтегральну твердість (HV_1) – при навантаженні 1 кг.

Оцінку механічних властивостей та опору імітованого металу ЗТВ крихкому руйнуванню виконували у відповідності до методики [11]. Згідно з ме-

Хімічний склад і механічні властивості досліджуваних сталей

Сталь	Хімічний склад											Механічні властивості				
	Масова частка елементів, %											σ_T	σ_B	δ_s	ψ	KCV_{-40}
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Cu/Al	S	P	МПа	%		Дж/см ²	
06ГБД	0,07	0,19	1,23	0,22	–	0,13	0,009	0,05	0,22	0,009	0,01	390	490	22	55	320
S460M	0,15	0,23	1,3	0,09	0,019	–	0,05	0,025	0,007	0,013	0,017	490	580	27	58	98

тодікою модельні зразки розмірами 150×12×12 мм, які вирізали з вищевказаних сталей, піддавали нагріванню до температури 1250 °С зі швидкістю 150 °С/с та охолоджували з різними швидкостями в інтервалі 3...25 °С/с. Після дії ТЦЗ із модельних зразків вирізали, а потім випробовували стандартні циліндричні зразки на розтяг та зразки з V-подібним гострим надрізом на ударний згин.

Отримані результати та їх обговорення. Вплив термічних циклів зварювання на структуру та властивості. Аналіз термокінетичної діаграми (рис. 1) і мікроструктур імітованої ЗТВ сталі

06ГБД, що охолоджується з різними швидкостями ($W_{6/5}$) свідчать про те, що у всьому досліджуваному діапазоні 3...70 °С/с на ділянці перегріву присутня феритно-перлітна структура (рис. 2, а). При швидкостях охолодження $W_{6/5} \geq 10,1$ °С/с спостерігаються виділення МАК-фази (мартенситно-аустенітний комплекс), вміст у відсотках якої зростає від 1,2 до 5,72 % у міру зростання швидкості охолодження до $W_{6/5} = 70$ °С/с. Зі зростанням вмісту МАК-фази в структурі твердість підвищується від 140 до 171 НВ, а бал зерна зменшується з 8–9 до 5.

Незважаючи на однотипність структур (рис. 2, б–з), у них спостерігаються певні особливості за формою перлітної складової. Так, при швидкості охолодження $W_{6/5} = 10,1$ °С/с у структурі виявляються тонкі перлітні пластини вздовж меж феритних зерен (рис. 2, б). З підвищенням швидкості охолодження до $W_{6/5} = 27$ °С/с пластини перліту подрібноються, їхня кількість зростає, а також з'являються окремі рівновісні зерна перліту (рис. 2, в). За умови максимальної швидкості охолодження в досліджуваному діапазоні ($W_{6/5} = 70$ °С/с) структура укрупнюється: поряд із пластинчастими виділеннями перліту по границях феритних зерен формуються великі перлітні колонії (рис. 2, з).

Аналіз отриманих у результаті випробувань зразків імітованого металу ЗТВ зварних з'єднань сталі 06ГБД на розтяг (рис. 3) показав, що зі змен-

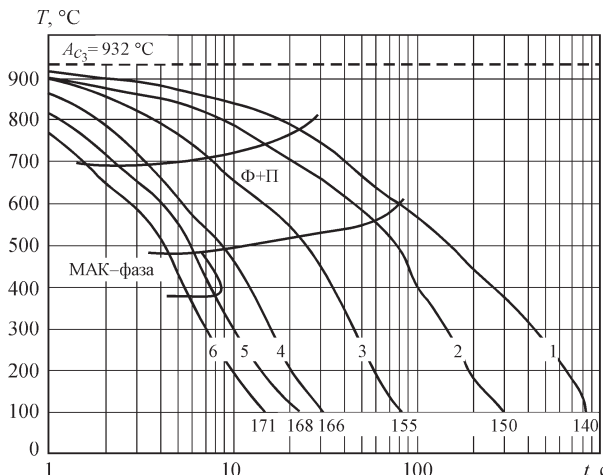


Рис. 1. Термокінетична діаграма перетворення аустеніту сталі 06ГБД при різних швидкостях охолодження $W_{6/5}$: 1 – 3,0; 2 – 5,0; 3 – 10,1; 4 – 27,0; 5 – 56,7; 6 – 70,0 °С/с

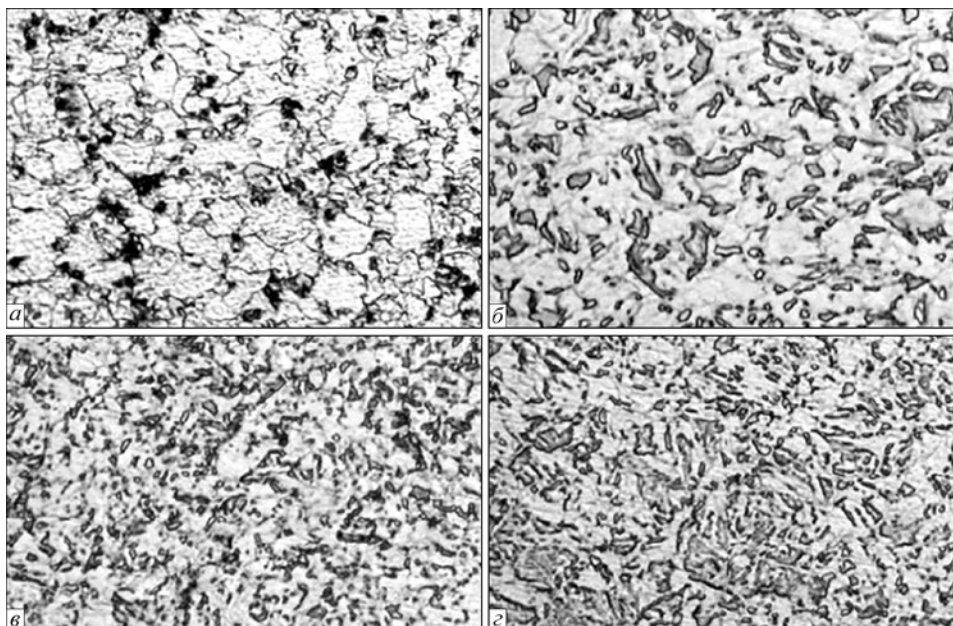


Рис. 2. Мікроструктура зразків сталі 06ГБД при охолодженні з різними швидкостями $W_{6/5}$: а – 3,0; б – 10,1; в – 27; з – 70 °С/с, ×500

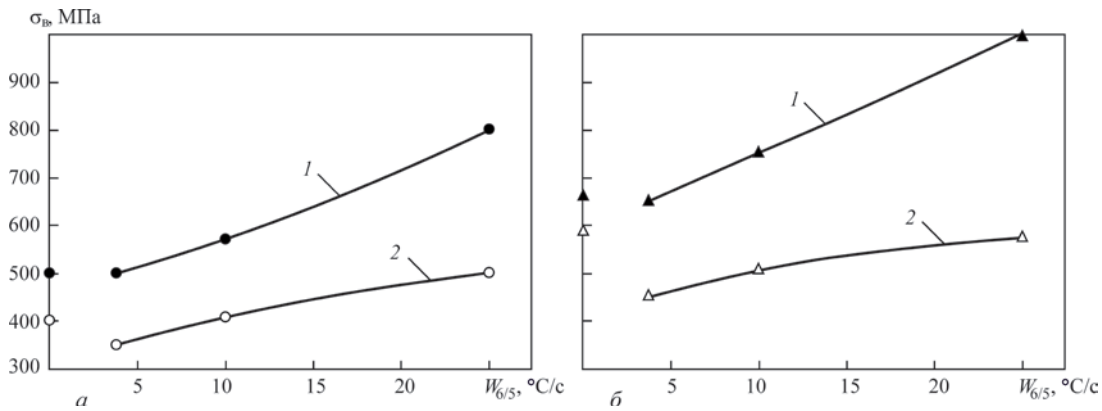


Рис. 3. Вплив швидкості охолодження на зміну показників статичної міцності імітованого металу ЗТВ сталей S460M (1) і 06ГБД (2): границі плинності (а), границі міцності (б)

шенням швидкості охолодження відбувається монотонне зниження показників σ_T і σ_B , що характеризують статичну міцність металу. Найбільш інтенсивно відбувається зниження значень границі плинності. Як свідчать результати механічних випробувань, при швидкості $W_{6/5}$ до 3 °C/c спостерігається зменшення металу ЗТВ, що вирізняється зменшенням на 25...60 МПа показників границі плинності у порівнянні з вихідними даними (рис. 3, а). При таких швидкостях охолодження метал ЗТВ має значення σ_T нижче за величини, встановлені в нормативній документації на сталь. У той же час границя міцності металу ЗТВ у всьому досліджуваному діапазоні швидкостей охолодження не зменшується нижче за значення, що регламентуються технічними умовами на сталь (рис. 3, б).

На високому рівні знаходяться пластичні властивості металу ЗТВ сталі 06ГБД. Незважаючи на незначне зниження показників відносного подовження зі зростанням швидкості охолодження, їхні значення залишаються вищими за 25 % (рис. 4, а). У той же час у досліджуваному діапазоні швидкостей охолодження показники відносного звуження практично не змінювалися (рис. 4, б).

Зі зниженням швидкості охолодження ударна в'язкість металу ЗТВ модельних зразків-імітато-

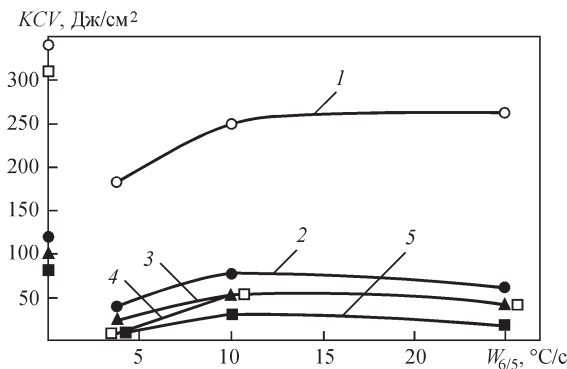


Рис. 5. Вплив швидкості охолодження на ударну в'язкість KCV імітованого металу ЗТВ сталей 06ГБД (1, 4) та S460M (2, 3, 5) при температурах випробувань: +20 °C – 1, 2; –20 °C – 3; –40 °C – 4, 5

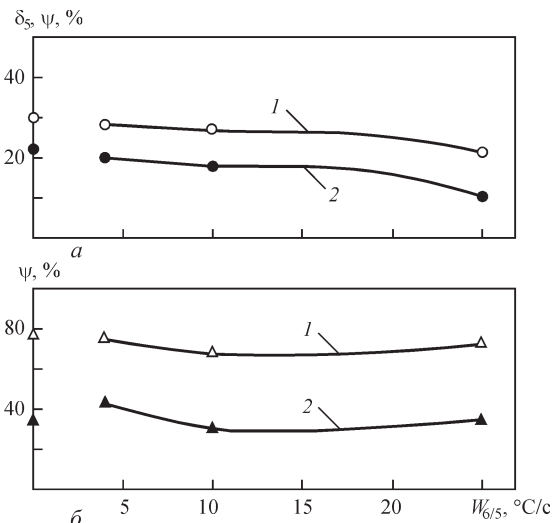


Рис. 4. Залежність показників пластичності: відносного подовження (а) та відносного звуження (б) від зміни швидкості охолодження імітованого металу ЗТВ сталей 06ГБД (1) і S460M (2)

рів сталі 06ГБД зменшується при температурах випробувань, за винятком $T = +20$ °C, де її показники залишаються достатньо високими $KCV_{+20}^{min} = 170$ Дж/см² (рис. 5). При мінусових температурах випробувань за умов $W_{6/5} < 10$ °C/c спостерігаються низькі показники $KCV_{-40} = 18...24$ Дж/см², натомість при $W_{6/5} \geq 10$ °C/c вони приблизно в два

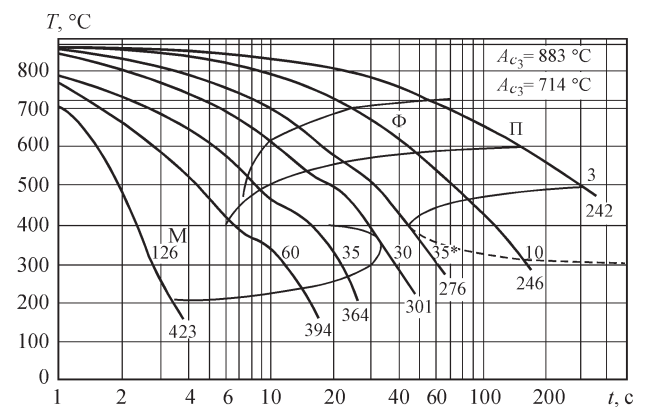


Рис. 6. Термокінетична діаграма перетворення аустеніту сталі S460M. Цифри в кружках – твердість за Вікерсом; 3...126 – швидкості охолодження в інтервалі температур 600...500 °C

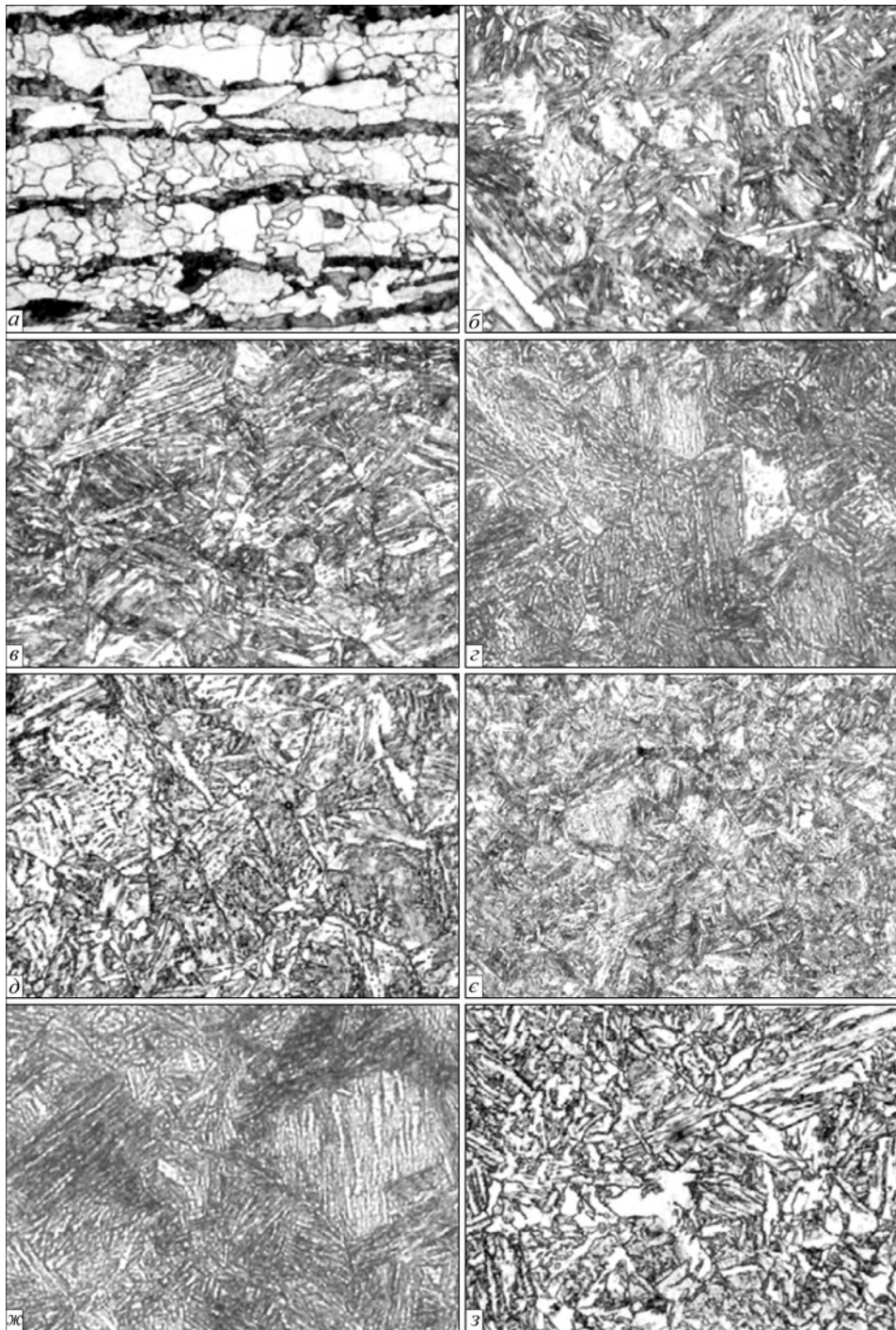


Рис. 7. Мікроструктура основного металу та зразків-імітаторів металу ЗТВ сталі S460M при різних швидкостях охолодження $W_{6/5}$: а – основний метал; б – 3; в – 10; г – 30 (час витримки – 10 с); д – 30 (час витримки – 30 с); е – 35; ж – 60; з – 126 °C/с, $\times 500$

рази підвищуються (рис. 5) та відповідають вимогам нормативної документації на сталь.

Таким чином, встановлено, що комплекс механічних властивостей металу ЗТВ сталі 06ГБД, що вимагається, може бути забезпечений при зварюванні на обмежених тепловкладеннях за умов, коли мінімальні швидкості охолодження зварних з'єднань не нижчі за $W_{6/5} = 10$ °C/с.

Стосовно термомеханічно зміцненої сталі S460M з границею плинності $\sigma_T \geq 490$ МПа, на рис. 6 наведено термокінетичну діаграму пере-

творення аустеніту, яка характеризує зміну мікроструктури під дією процесів нагріву–охолодження з різними $W_{6/5}$ у діапазоні 3...126 °C/с.

Отримані дані досліджень свідчать, що під дією термічного циклу зварювання зі швидкістю охолодження $W_{6/5} = 3$ °C/с мікроструктура зразка-імітатора трансформується від вихідної феритно-перлітної (рис. 7, а) до суміші різноманітних форм фериту (голчастого, полігонального, структурно-вільного) та перліту (рис. 7, б). Підвищення швидкості охолодження зразків-імітаторів до

$W_{6/5} = 10$ °C/c призводить до переважного утворення голчастого фериту (рис. 7, в), а підвищення до $W_{6/5} = 30$ °C/c стимулює появу бейнітних пакетів різної орієнтації та залишкового аустеніту (рис. 7, з, д).

Подальше зростання швидкості охолодження імітованого металу ЗТВ сталі S460M до $W_{6/5} = 35$ °C/c призводить до утворення бейніту різної морфології (верхнього та/або нижнього), залишкового аустеніту та незначної кількості мартенситу (рис. 7, е). Мікротвердість $HV_{0,1}$ структурних складових: верхній бейніт 3300...3360 та нижній бейніт 3630...3750 МПа. Для зразка-імітатора, що охолоджували зі швидкістю $W_{6/5} = 60$ °C/c, характерною є мартенситна структура голчастого типу (рис. 7, ж) з мікротвердістю 3600...4260 МПа. Нарешті, мікроструктура металу ЗТВ, охолодженого з максимальною для даних умов швидкістю $W_{6/5} = 126$ °C/c складається з пакетів мартенситу, що щільно прилягають один до одного, з мікротвердістю 4100...4630 МПа.

Аналіз структурного стану імітованого металу ЗТВ сталі S460M показав, що з підвищенням швидкості охолодження від 5 до 35...40 °C/c відбувається зміна структури від феритно-перлітної до феритно-бейнітної з переважним утворенням голчастого фериту. Подальше підвищення швидкості охолодження вище за 40 °C/c супроводжується зростанням мартенситної складової, у результаті чого може бути зменшена стійкість зварних з'єднань сталі S460M до утворення холодних тріщин.

Тип фазових перетворень, який реалізується в процесі безперервного охолодження, та структурні зміни, що відбуваються в об'ємі металу ЗТВ, призводять до того, що властивості металу ЗТВ суттєво залежать від швидкості його охолодження.

Залежності, що відображають зміну показників статичної міцності та пластичності імітованого металу ЗТВ модельних зразків сталі S460M під дією термічного циклу зварювання, наведено на рис. 3, а, б. Отримані результати свідчать, що зі зростанням швидкості охолодження $W_{6/5}$ у діапазоні 3...25 °C/c відбувається суттєве підвищення показників статичної міцності порівняно з вихідним станом: границя текучості σ_b збільшується з 490 до 910 МПа, а тимчасовий опір розриву σ_b – з 600 до 1000 МПа (рис. 3, а). Водночас зі зростанням швидкості охолодження спостерігається зниження пластичних характеристик металу: показники відносного подовження зменшуються приблизно у два рази, а показники відносного звуження – на 15...20 % відносно вихідного стану (рис. 3, б).

При випробуваннях на ударний згин зразків з гострим V-подібним надрізом встановлено, що ударна в'язкість металу ЗТВ сталі S460M зменшується по відношенню до основного металу (рис. 3, в). Най-

більш суттєве зниження значень KCV , у 4...9 разів, спостерігається в зразках, які охолоджувалися зі швидкістю $W_{6/5} = 3$ °C/c (від 111 до 33 Дж/см² при температурі випробувань 20 °C, від 109 до 15 Дж/см² при температурі 20 °C та від 95 до 10 Дж/см² при температурі 40 °C). Зі зростанням швидкості охолодження до 10 °C/c вони підвищуються, а в подальшому при $W_{6/5} = 25$ °C/c знову знижуються та складають $KCV_{-20} = 30$ Дж/см² і $KCV_{-40} = 20$ Дж/см². Такі зміни механічних властивостей металу ЗТВ сталі S460M обумовлені різними структурними перетвореннями в діапазоні досліджуваних швидкостей охолодження, про що свідчать наведені вище результати металографічних досліджень.

Висновки

Проведеними дослідженнями впливу процесів нагріву-охолодження за термічними циклами зварювання на зміну структури та механічних властивостей імітованого металу ЗТВ зварних з'єднань сталей 06ГБД з $\sigma_T \geq 390$ МПа і S460M з $\sigma_T \geq 490$ МПа встановлені діапазони швидкостей охолодження, при яких зберігаються значення показників статичної міцності, пластичності та ударної в'язкості на рівні значень основного металу. Зазначені вимоги виконуються при $W_{6/5} \geq 10$ °C/c для сталі 06ГБД і в діапазоні $7 \leq W_{6/5} \leq 15$ °C/c – для сталі S460M.

Необхідні характеристики механічних властивостей забезпечуються за рахунок формування феритно-перлітних структур у металі ЗТВ сталі 06ГБД та комплексу феритно-бейнітних структур у сталі S460M.

Отримані дані досліджень можуть бути використані при розробці технології дугового зварювання конструкційних низьколегованих сталей підвищеної міцності.

Вдячності: автори вдячні за допомогу в металографічних дослідженнях д.т.н. В.А. Костіну та к.т.н. В.В. Жукову.

Список літератури

1. Миходуй Л.И., Кирьян В.И., Позняков В.Д., Стрижак П.А., Снисаренко В.В. (2003) Экономнолегированные высокопрочные стали для сварных конструкций. *Автоматическая сварка*, 5, 36–40.
2. Грабин В.Ф., Головкин В.В., Костин В.А., Алексеенко И.И. (2004) Морфологические особенности микроструктуры металла швов низколегированных сталей с ультрамикромасштабным содержанием углерода. *Автоматическая сварка*, 7, 17–22.
3. Позняков В.Д., Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П. и др. (2012) Хладостойкость и сопротивляемость слоистому разрушению сварных соединений стали 06ГБ-390. *Автоматическая сварка*, 3, 45–49.
4. Nazarov, A., Yakushev, E., Shabalov, I. et al. (2014) Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium, niobium and vanadium. *Metallurgist*, 57, 911–917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9821-6>
5. Одесский П.Д., Молодцов А.Ф., Морозов Ю.Д. (2011) Новые эффективные низколегированные стали для строительных металлических конструкций. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, 5, 20–25.

6. Fydrych, D., Tomków, J., Rogalski, G., Łabanowski, J. (2016) Weldability of S460ML high strength low alloy steel in underwater conditions. *Applied Mechanics and Materials*, **838**, 10–17. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.838.10>
7. Билык А.С., Курашев Р.В., Горбатенко В.В. и др. (2013) Применение термомеханически упрочнённого листового проката в сварных металлических конструкциях. *Промышленное строительство и инженерные сооружения*, **4**, 1–4.
8. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. и др. (2013) Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД и 06Г2Б. *Автоматическая сварка*, **4**, 9–15.
9. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Завдовеев А.В. и др. (2016) Свариваемость высокопрочной микролегированной стали S460M. *Автоматическая сварка*, **12**, 23–30. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.12.04>
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. Саржевский В.А., Сазонов В.Я. (1981) Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75. *Автоматическая сварка*, **5**, 69–70.
3. Poznyakov, V.D., Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P., Sineok, A.G., Yashnik, A.N. (2012) Cold resistance and lamellar fracture resistance of welded joints on steel 06GB-390. *The Paton Welding J.*, **3**, 35–39.
4. Nazarov, A., Yakushev, E., Shabalov, I. et al. (2014) Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium, niobium and vanadium. *Metallurgist*, **57**, 911–917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9821-6>
5. Odesskiy, P.D., Molodtsov, A.F., Morozov, Yu. D. (2011) New efficient low-alloy steels for building metal structures. *Montazhnye i spetsialnye raboty v stroitelstve*, **5**, 20–25 [in Russian].
6. Fydrych, D., Tomków, J., Rogalski, G., Łabanowski, J. (2016) Weldability of S460ML high strength low alloy steel in underwater conditions. *Applied Mechanics and Materials*, **838**, 10–17. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.838.10>
7. Bilyk, A.S., Kurashev, R.V., Gorbatenko, V.V. et al. (2013) Application of thermomechanically strengthened rolled sheet in welded metal structures. *Montazhnye i spetsialnye raboty v stroitelstve*, **4**, 1–4 [in Russian].
8. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.A., Sineok, A.G., Gerasimenko, A.M. (2013) Weldability of sparsely-alloyed steels 06GBD and 06G2B. *The Paton Welding J.*, **4**, 8–14.
9. Poznyakov, V.D., Zhdanov S. L., Zavdoveev, A.V. et al. (2016) Weldability of high-strength microalloyed steel S460M. *The Paton Welding J.*, **12**, 21–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.12.04>
10. Grigorenko, G.M., Kostin, V.A., Orlovsky, V.Yu. (2008) Present opportunities of modeling austenite transformations in welds of low-alloy steels. *The Paton Welding J.*, **3**, 31–34.
11. Sarzhevsky, V.A., Sazonov, V.Ya. (1981) Installation for simulation of welding thermal cycles based on the MSR-75 machine. *Automatic welding*, **5**, 69–70 [in Russian].

References

1. Mikhoduj, L.I., Kirian, V.I., Poznyakov, V.D., Strizhak, P.A., Snisarenko, V.V. (2003) Sparsely-alloyed high-strength steels for welded structures. *The Paton Welding J.*, **5**, 34–37.
2. Grabin, V.F., Golovko, V.V., Kostin, V.A., Alekseenko, I.I. (2004) Morphological peculiarities of microstructure of weld metal from low-alloy steels with ultralow content of carbon. *The Paton Welding J.*, **7**, 15–20.

INFLUENCE OF THERMAL CYCLES OF ARC WELDING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF LOW-ALLOY STEELS WITH A YIELD STRENGTH OF 390...490 MPa

R.V. Bohodist, S.L. Zhdanov

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

E-mail: mail.ruslan@ukr.net

The paper examines the regularities of phase-structural transformations in simulated heat-affected zone (HAZ) metal of welded joints of 06GBD and S460M steels with a yield strength of 390...490 MPa. Using the Gleeble-3800 thermal-mechanical simulator, thermo-kinetic diagrams of austenite transformation in the simulated HAZ metal were constructed. Metallographic studies made it possible to assess the influence of structural changes on the mechanical properties of the HAZ metal under various welding thermal cycles. The optimal cooling-rate ranges for the simulated HAZ metal have been established, within which the mechanical property values are maintained at the level of the base metal. 11 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: low-alloy steel, arc welding, welding thermal cycle, mechanical properties, structure, cooling rate, heat-affected zone

ORCID

Богодіст Р.В. – <https://orcid.org/0009-0004-3544-9112>, Жданов С.Л. – <https://orcid.org/0003-3570-895X>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

Р.В. Богодіст

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: mail.ruslan@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Р.В. Богодіст, С.Л. Жданов (2026) Вплив термічних циклів дугового зварювання на структуру та властивості зварних з'єднань низколегованих сталей з границею плинності 390...490 МПа. *Автоматичне зварювання*, **02**, 57–62. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.02.07>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 12.11.2025

Отримано у переглянутому вигляді 30.12.2026

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 11.04.2026