

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ДІЛЯНОК ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ, ЩО НАГРІВАЛИСЯ ДО ТЕМПЕРАТУР ВІД 350 ДО 800 °С

В.Д. Позняков, О.В. Коренєв

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

Під час зварювання в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань середньовуглецевих легованих сталей утворюються дві характерні ділянки із загартованим (розташована на ділянках перегріву, нормалізації та часткової рекристалізації) ЗТВ – високотемпературна ділянка) і відпущеним (розташована переважно на ділянках перекристалізації та синьоламкості ЗТВ – низькотемпературна ділянка) металом. У зварних з'єднаннях, виконаних з використанням ручного дугового та механізованого в захисних газах зварювання дротами малого діаметра, ширина цих ділянок може досягати 2,5 і 8,0 мм відповідно. У технічній літературі добре висвітлено вплив на механічні властивості металу термічних циклів, характерних для високотемпературної ділянки ЗТВ. Значно менше інформації є щодо впливу термічних циклів зварювання на механічні властивості низькотемпературної ділянки ЗТВ. У даній роботі наведено дані щодо протікання процесу нагріву та охолодження металу ЗТВ стикових зварних з'єднань завтовшки 12 мм, що нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °С, та стосовно впливу такого нагріву на механічні властивості (твердість, міцність, пластичність, ударна в'язкість) із середньовуглецевих легованих сталей з різним вмістом легуючих елементів. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: середньовуглецеві леговані сталі, механічні властивості, термічні цикли, легуючі елементи

Вступ. Середньовуглецеві леговані термічно зміцнені сталі високої твердості ($HB > 5000$ МПа) і міцності ($\sigma_b > 1400$ МПа) можуть використовуватися як для виготовлення виробів військового призначення, що зазнають значних ударних впливів, так і для створення особливо навантажених вузлів і механізмів машин цивільного призначення, таких як ковші кар'єрних екскаваторів, кузови великовантажних автомобілів тощо. Необхідний комплекс механічних властивостей, високу твердість, міцність та ударну в'язкість зазначені сталі набувають за рахунок легування марганцем, кремнієм, хромом, молібденом, нікелем, мікролегування бором, титаном, алюмінієм, ванадієм тощо, а також у результаті термічного оброблення, яке полягає у гартуванні та низькотемпературному (при температурі не вище ніж 250 °С) відпуску сталі [1–6].

Більшість виробів, при виготовленні яких використовуються термозміцнені середньовуглецеві леговані сталі високої твердості, є зварними. Зазвичай для зварювання таких виробів використовують дугові процеси. Вони передбачають локальний нагрів сталевого прокату до температур, що перевищують температуру відпуску сталі, а в пришовній зоні наближаються до температури його плавлення. Умовно зону термічного впливу зварних з'єднань можна розбити на дві ділянки: високо- та низькотемпературну. До високотемпературної ділянки ЗТВ відносяться ділянка перегріву (температура коливається в межах 1100...1500 °С), ділянка нормалізації (температура коливається в межах 930...1100 °С) та частково неповної перекристалізації (температура коливається в межах 720...930 °С). На цій ділянці

зварного з'єднання при нагріванні метал перетворюється на аустеніт, а при охолодженні, у залежності від хімічного складу та ступеня переохолодження металу, в ньому відбуваються фазово-структурні перетворення з утворенням фериту–бейніту–мартенситу або змішаних структур. До низькотемпературної ділянки ЗТВ зварних з'єднань відносяться ділянки рекристалізації (температура коливається в межах 450...720 °С) та синьоламкості (температура коливається в межах 200...450 °С). Розміри та відстань від осі шва ділянок, що нагріваються до вказаних температур у зварному з'єднанні, залежать від багатьох факторів. Основними з них є: режим зварювання, товщина металу й тип з'єднання. Для характерних для ручного, штучними електродами та механізованого в захисних газах процесів зварювання ширина високотемпературної ділянки ЗТВ може досягати 2,5 мм, а низькотемпературної – 8,0 мм.

Наразі в технічній літературі достатньо добре висвітлені питання щодо впливу режимів зварювання та умов охолодження зварних з'єднань на структурні перетворення, які відбуваються в металі ділянки перегріву ЗТВ [4–8]. Меншою мірою, але також добре, представлені в наукових публікаціях дані стосовно зазначених факторів на механічні властивості металу [9–12]. Щодо низькотемпературних ділянок ЗТВ, в яких метал нагрівається до температур, більших за температуру A_{c1} , то кількість такої інформації носить обмежений характер і стосується переважно показників твердості металу.

Мета даної роботи полягала в тому, щоб, визначивши координати ділянки відпуску ЗТВ, оцінити

В.Д. Позняков – <https://orcid.org/0000-0001-8561-3526>, О.В. Коренєв – <https://orcid.org/0009-0007-3533-1247>

© В.Д. Позняков, О.В. Коренєв, 2025

Таблиця 1. Хімічний склад середньовуглецевих легованих сталей, що досліджувалися

Маркування сталі	Масова частка елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	B
«1»	0,23	0,25	0,82	0,50	0,90	0,30	0,030	0,004	0,016	0,003
«2»	0,31	0,16	0,74	1,66	2,26	0,30	0,202	0,010	0,016	–
«3»	0,21	0,45	0,92	0,58	0,38	0,20	0,010	0,005	0,023	0,004

перебіг в ній термічних процесів зварювання (нагрів–охолодження металу в залежності від режимів зварювання), відтворити ці процеси на модельних зразках і встановити, як зазначені зміни впливають на механічні властивості відпущеного металу.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили з використанням декількох середньовуглецевих легованих сталей з границею текучості понад 1200 МПа, які відрізняються між собою за хімічним складом (див. табл. 1).

Зварювання стикових з’єднань завтовшки 12 мм виконували механізованим способом у середовищі захисного газу (82 % Ar + 18 % CO₂) дротом діаметром 1,2 мм марки ХОРДА 307 Ті (система легування 08Х20Н9Г7Т) з використанням наступного режиму: сила зварювального струму $I_{зв} = 160...180$ А; напруга на дузі $U_d = 23...25$ В; швидкість зварювання $V_{зв} = 10...12$ м/год.

Розташування ділянки відпуску визначали на підставі вимірювань мікротвердості металу в ЗТВ зварних з’єднань. Крок вимірювань становив 1 мм.

Ударну в’язкість металу ділянки відпуску оцінювали за результатами випробувань на ударний згин стандартних зразків розміром 10×10×55 мм з круглим надрізом типу Менаже, виготовлених зі зварних з’єднань. Випробування зразків виконували за температури 20 °С.

Запис термічного циклу зварювання проводили стосовно трьох ділянок зони відпуску зварних з’єднань, а саме ділянок, які нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °С. Для цього використовували термопару «хромель–алюмель» діаметром 0,5 мм.

Показники міцності ($\sigma_{0,2}$ і σ_B) та пластичності (δ_5 і ψ) визначали за результатами випробувань на розтяг стандартних зразків, які виготовлялися з оброблених у відповідності до характерних для зони відпуску металу ЗТВ з’єднань термічних циклів, зварювання яких виконувалося на наведених вище режимах. Нагрів модельних зразків розмірами 12×12×120 мм виконували на устаткуванні МРС-75 струмом, що проходить через зразок за заданою програмою [13]. Швидкість охолодження зразків регулювали за рахунок їх обдуву повітрям з різною інтенсивністю.

Результати досліджень та обговорення. Заміри мікротвердості металу швів, ЗТВ та сталевого прокату (рис. 1) показали, що твердість металу швів в усіх випадках майже однакова та знаходиться в межах $HB\ 230...260$. Це закономірно, оскільки для зварювання використовувався один і той

же дріт та режими зварювання. Що стосується мікротвердості металу на ділянках ЗТВ і сталі, що розташовані на різних відстанях від шва, то ці показники залежать від хімічного складу сталі. Найвищі показники твердості (приблизно $HB\ 530$) характерні для загартованої ділянки перегріву ЗТВ (розташована на відстані 1 мм від лінії сплавлення зварних з’єднань сталей «2» і «3»). Дещо нижчі показники твердості ($HB\ 450$) має метал на ділянці перегріву ЗТВ зварних з’єднань сталі «1». Твердість ділянки відпуску (розташована в інтервалі 4...9 мм), як і основного металу (розташований в інтервалі 10...13 мм) також найнижча у з’єднань сталі «1». Найвищі, майже на рівні твердості основного металу, показники HB характерні для ділянки відпуску зварних з’єднань сталі «2».

Таким чином, за результатами цих досліджень було встановлено, що в залежності від хімічного складу сталей висока твердість металу, яку він набуває за рахунок термічного оброблення сталі, може зменшуватися в результаті нагріву за термічним циклом зварювання. Чим менша концентрація легуючих елементів у сталі, тим нижчі показники твердості металу на ділянці відпуску ЗТВ.

Дані щодо умов нагріву та охолодження окремих ділянок відпуску металу ЗТВ наведені на рис. 2. Розглянуто три відпущені ділянки, які внаслідок дії на метал тепла від горіння зварювальної дуги нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °С. Для цього термопари монтувалися на відстані 4, 6 і 9 мм від лінії сплавлення. Аналіз отриманих результатів показав, що інтенсивність зменшення температури металу на початковій стадії його охолодження суттєво різниться між собою. Чим вища температура нагріву, тим більша швидкість охолодження. В інтервалі тем-

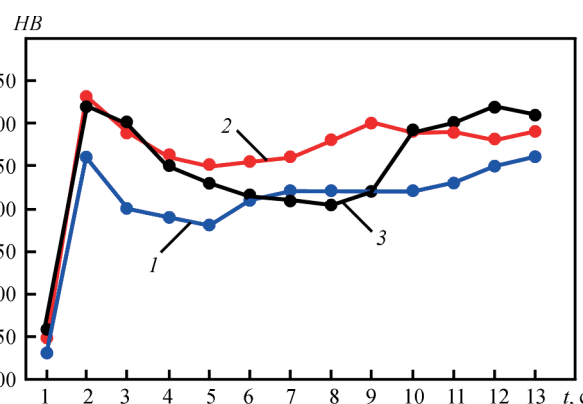


Рис. 1. Показники мікротвердості металу швів, ЗТВ та основного металу стикових зварних з’єднань завтовшки 12 мм сталей: «1» – 1; «2» – 2; «3» – 3

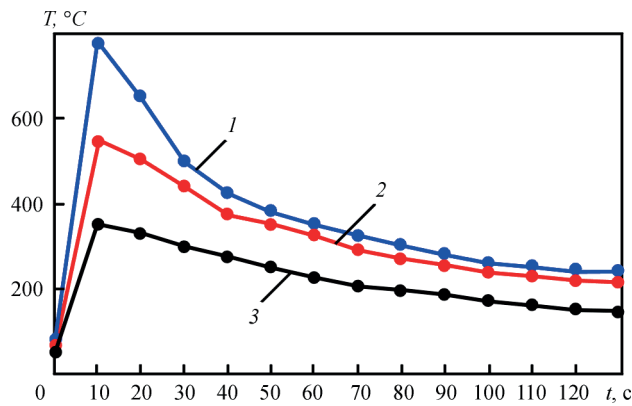


Рис. 2. Термічні цикли зварювання ділянок відпустки ЗТВ стикових зварних з'єднань завтовшки 12 мм, що нагрівалися до температур, °C: 780 – 1; 550 – 2; 350 – 3

ператур 400...300 °C інтенсивність охолодження металу на всіх відпущених ділянках ЗТВ вирівнюється.

Наведені на рис. 2 дані в подальшому були використані при моделюванні термічних циклів зварювання під час оброблення за цими циклами вищезазначених зразків.

Результати випробувань зразків на розтяг (виготовлялися з термічно оброблених модельних зразків) на ударний згин (виготовлялися зі зварних з'єднань) наведені в табл. 2.

Як свідчать наведені в табл. 2 дані, показники міцності ($\sigma_{0,2}$ і σ_b) металу ЗТВ, який нагрівався до температур від 350 до 780 °C, в усіх випадках зменшуються по відношенню до вихідної міцності сталі. Ступінь цих змін залежить від хімічного складу сталі та від температури, до якої метал ЗТВ нагрівався під час зварювання. Чим нижча концентрація легуючих елементів і бору в сталі або вища температура нагріву, тим суттєвіше зменшується міцність металу. Так, $\sigma_{0,2}$ і σ_b металу ЗТВ, який в процесі зварювання нагрівався до температури 780 °C, для зварних з'єднань сталі «1» зменшується по відношенню до основного металу майже на

40 %, а для сталей «2» і «3» – на 20...25 %, що удвічі менше. Найменші зміни показників міцності спостерігаються в металі, який під час зварювання нагрівався до температури 350 °C – зменшується приблизно на 10 % у зварних з'єднаннях сталі «1» і «3» та залишаються майже без змін у з'єднаннях сталі «2».

Що стосується пластичних властивостей (δ_5 і φ) металу, то на відміну від показників міцності, вони у зварних з'єднаннях сталей «1» і «3» незалежно від температури, до якої нагрівався метал, зростають на 30...50 % і майже не змінюються у з'єднаннях сталі «2».

Щодо показників ударної в'язкості, то ці показники металу суттєво залежать як від температури, до якої метал нагрівався під час зварювання, так і від температур, при яких відбувалося випробування зразків. Найсуттєвіші зміни показників *KCU* спостерігаються в металі, який випробувався при температурі 20 °C. У зразках, в яких надріз виконувався на ділянках, де метал нагрівався до температур 550 та 780 °C, показники ударної в'язкості зросли в 1,3...2,2 рази. Найвищі значення характерні для зразків, виготовлених зі зварних з'єднань сталі «1» з надрізом, розташованим у зоні, де метал нагрівався до температури 780 °C. Що стосується результатів випробування зразків, в яких надріз виконувався по металу, що в процесі зварювання нагрівався до температури 350 °C, то їх ударна в'язкість виявилася нижчою по відношенню до основного металу. Як зазначалося вище, дана температура відноситься до температурного діапазону, в якому відбувається синьоламкість металу з характерним для цього явища зменшенням показників його ударної в'язкості. Слід зазначити, що зменшення *KCU* характерне як для зразків, які випробувалися при температурі 20 °C, так і для тих, які випробувалися при температурі –40 °C.

Таблиця 2. Механічні властивості середньовуглецевих легуваних сталей, які досліджувалися, та металу ділянок ЗТВ, що нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °C

Маркування сталі	Температура нагріву, °C	HB	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	φ	KCU, Дж/см ²	
			МПа		%		+20 °C	–40 °C
«1»	0	450	1447	1690	11,0	47,2	93	85
	350	420	1294	1497	21,0	63,0	89	76
	550	380	937	1044	20,0	69,1	176	173
	780	400	892	981	23,2	68,5	208	183
«2»	0	490	1475	1835	14,1	46,1	61	59
	350	500	1409	1773	13,6	45,4	50	37
	550	450	1378	1620	13,9	46,4	85	57
	780	490	1210	1463	14,8	47,0	98	62
«3»	0	520	1542	1844	11,5	44,3	52	51
	350	500	1402	1594	14,6	61,3	36	32
	550	430	1389	1520	14,9	60,0	74	52
	780	420	1242	1383	15,0	57,2	83	55

Висновки

Результати досліджень щодо впливу термічних циклів зварювання на механічні властивості металу низькотемпературних ділянок ЗТВ зварних з'єднань різних за хімічним складом середньовуглецевих легованих сталей високої твердості (HB 500) показали наступне:

1. Висока твердість металу, яку він набуває за рахунок термічного оброблення сталі в процесі виготовлення прокату, може зменшуватися в результаті нагріву металу за характерними для низькотемпературних ділянок ЗТВ термічними циклами. Чим менша концентрація легуючих і мікролеуючих елементів у сталі, тим нижчі показники твердості металу на ділянці відпуску ЗТВ.

2. Міцність металу ділянок ЗТВ зварних з'єднань термозміцнених середньовуглецевих легованих сталей, що нагрівався до температур 350...780 °С, зменшується, а пластичність збільшується по відношенню до основного металу.

3. Ударна в'язкість металу ділянок ЗТВ зварних з'єднань термозміцнених середньовуглецевих легованих сталей, що нагрівався до температур 550...780 °С, по відношенню до основного металу зростає, а в разі нагріву до температури 350 °С – зменшується. Останнє пов'язано з тим, що температура 350 °С, входить у діапазон температур сеньоламкості сталей, які досліджувалися.

Список літератури/References

1. Tekin Özdemir (2020) Mechanical and microstructural analysis of armor steel welded joints. *Intern. J. of Engineering Research and Development UMAGD*, 12(1), 166–175. DOI: <https://doi.org/10.29137/umagd.488104>
2. Konat, Ł., Białobrzaska, B., Białek, P. (2017) Effect of welding process on microstructural and mechanical characteristics of Hardox 600 steel. *Metals*, 7(9), 349. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/met7090349>
3. Gaivoronskyi, O.A., Poznyakov, V.D., Zavdoveyev, A.V., Klapatyuk, A.V., Denisenko, A.M. (2023) Prevention of cold cracking in armour steel welding. *The Paton Welding J.*, 5, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.01>
4. Oskwarek, M. (2006) Structural features and susceptibility to cracking of welded joints of Hardox 400 and Hardox 500 steels.

In: *Proc. of the IV Students' Science Conf.: Human-Civilisation-Future, Wroclaw, Poland, 22–24 May 2006*, Vol. 2, 115–120.

5. Cabrilo, A., Geric, K. (2016) Weldability of high hardness armor steel. *Advanced Materials Research*, 1138, 79–84. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1138.79>
6. Kuzmnikova, L. (2013) *An investigation of the weldability of high hardness armor steel*. Faculty of Engineering, University of Wollongong. <http://ro.uow.edu.au/theses/3853>
7. Shchudro, A., Laukhin, D., Pozniakov, V. (2020) Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels. *Key Engineering Materials*, 844, 146–154. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.146>
8. Максимов С.Ю., Прилипко О.О., Берднікова О.М., Алексєнко Т.О., Половецький С.В., Ю.А. Шепєлюк (2021) Контроль параметрів металевої кристалічної решітки зварних з'єднань, виконаних під водою. *Металлофізика та новітні технології*, 43(5), 713–723. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.05.0713>
9. Максимов, С.Ю., Прилипко, О.О., Берднікова, О.М., Алексєнко, Т.О. et al. (2021) Controlling the parameters of the metal crystal lattice of the welded joints made underwater. *Металлофізика та Новітні Технології*, 43(5), 713–723 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.05.0713>
9. Позняков В.Д., Гайворонский А.А., Костин В.А., Дураченко В.В., Костин Ю.Н. (2017) Особенности превращения аустенита и механические свойства металла в зоне термического влияния соединений стали марки 71 при дуговой сварке. *Механіка та машинобудування*, 1, 254–260.
10. Poznyakov, V.D., Gajvoronskij, A.A., Kostin, V.A., Durachenko, V.V., Kostin, Yu.N. (2017) Features of austenite transformation and mechanical metal properties in the area of thermal influence of joints of 71 grade steel in arc welding. *Механіка та Машинобудування*, 1, 254–260 [in Russian].
10. Zavdoveev, A., Poznyakov, V., Baudin, T., Rogante, M. et al. (2021) Effect of nutritional values on the processing properties and microstructure of HSLA rod processed by different technologies. *Materials Today Communications*, 2, 102598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102598>
11. Konat, Ł., Białobrzaska, B., Białek, P. (2017) Effect of welding process on microstructural and mechanical characteristics of Hardox 600 steel. *Metals*, 7(9), 349. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7090349>
12. Özdemir, T. (2020) Mechanical and microstructural analysis of armor steel welded joints. *Intern. J. of Engineering Research and Development*, 12(1), 166–175. DOI: <https://doi.org/10.29137/umagd.488104>
13. Саржевский В.А., Сазонов В.Я. (1981) Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75. *Автоматическая сварка*, 5, 69–70.
13. Sarzhevsky, V.A., Sazonov, V.Ya. (1981) Installation for simulating thermal cycles of welding based on the MCS-75 machine. *Автоматическая Сварка*, 5, 69–70 [in Russian].

MECHANICAL PROPERTIES OF METAL IN AREAS OF WELDED JOINTS OF MEDIUM-CARBON ALLOY STEELS HEATED TO TEMPERATURES FROM 350 TO 800 °C

V.D. Poznyakov, O.V. Korieniev

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: korennew@ukr.net

During welding, two characteristic areas are formed in the heat-affected zone (HAZ) of welded joints of medium-carbon alloy steels with hardened (located in the HAZ areas of overheating, normalization and partial recrystallization – high-temperature area) and tempered (located mainly in the HAZ areas of recrystallization and blue brittleness – low-temperature area) metal. In welded joints made using manual arc and mechanized gas-shielded welding with small-diameter wires, the width of these areas can reach 2.5 and 8 mm, respectively. The technical literature is well-illustrated with regard to the influence of thermal cycles, characteristic for the high-temperature area of the HAZ, on the mechanical properties of the metal. There is much less information on the influence of thermal cycles of welding on the mechanical properties of the low-temperature area of the HAZ. This paper presents the data on the course of the heating and cooling process of the HAZ metal of butt welded joints 12 mm thick, which were heated to temperatures of 780, 550 and 350 °C, and on the effect of such heating on the mechanical properties (hardness, strength, ductility, impact toughness) of medium-carbon alloy steels with different content of alloying elements. 13 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

Keywords: medium-carbon alloy steels, mechanical properties, thermal cycles, alloying elements

Отримано 02.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 01.10.2025

Прийнято 13.10.2025