

# ВПЛИВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВІДПУСКУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ 30X2H2MФ

О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, О.М. Берднікова, Т.О. Алексеєнко, О.С. Шишкевич

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Наведено результати досліджень впливу низькотемпературного відпуску на зміни структури, фізико-механічні властивості металу ЗТВ та тріщиностійкість зварних з'єднань високоміцної середньовуглецевої легованої сталі 30X2H2MФ. Показано, що застосування низькотемпературного відпуску конче необхідно при зварюванні виробів низьколегованими матеріалами, що сприяє істотному підвищенню тріщиностійкості зварних з'єднань. При зварюванні з'єднань високолегованими матеріалами в загартованому металі ЗТВ формується порівняно більш пластична та менш напружена структура, максимальний рівень напружень в якій нижчий, від того що може бути досягнуто після термічного відпуску зварного з'єднання з низьколегованим швом. Тому рівень тріщиностійкості зварних з'єднань і так достатньо високий, і застосовувати для цього низькотемпературний відпуск нема потреби. Це є зайва технологічна операція, яка істотно не впливає на забезпечення надійності при експлуатації виробів, а лише збільшує їх вартість. Бібліогр. 13, табл. 4, рис. 6

*Ключові слова:* високоміцна сталь, зварні з'єднання, низькотемпературний відпуск, структура, властивості, тріщиностійкість

Термічний відпуск відповідальних виробів з високоміцних легованих сталей, які попередньо піддають гартуванню, є визнаною технологічною операцією. При відпуску в металі протікають дифузійні процеси перерозподілу вуглецю в структурі та дегазації загартованого металу, що значно підвищує його здатність до мікропластичного деформування під дією зовнішнього навантаження [1–3]. Це сприяє суттєвому підвищенню тріщиностійкості відповідальних виробів при експлуатації, що і є головною метою застосування термічного відпуску.

Аналогічні позитивні зміни при термічному відпуску відбуваються і в структурі загартованого металу ЗТВ та шві зварних з'єднань [4–6]. Крім того, при дегазації суттєво зменшується рівень водню в металі зварного з'єднання, яким він насичується при зварюванні. Зазвичай, при виготовленні металокопункцій з високоміцних легованих сталей, при зварюванні яких застосовувалися низьколеговані матеріали, виконують низькотемпературний відпуск. Після зварювання, не пізніше 24 год., їх піддають відпуску при температурі 200...250 °С на протязі не менше 3 год.

Але доцільність виконання термічного відпуску з'єднань, при зварюванні яких були застосовані високолеговані матеріали, сьогодні залишається дискусійним питанням. По-перше, термічна обробка зварних з'єднань з високолегованим швом, внаслідок дифузії вуглецю може призвести до утворення крихких прошарків в зоні сплавлення [4–6]. По-друге, в загартовано-

му металі ЗТВ зварного з'єднання з високолегованим швом, внаслідок дії фізико-металургійних процесів, безпосередньо вже при зварюванні формується більш пластична і менш напружена структура [7, 8]. І в третій, високолегований метал має високу здатність до розчинення водню [9]. Тому при охолодженні зварного з'єднання його дифузія з високолегованого наплавленого металу в ЗТВ буде протікати, в порівнянні з низьколегованим, значно повільніше. Це обумовлює суттєво нижчий вміст водню в металі ЗТВ з'єднань при зварюванні високолегованим матеріалом і додатково знижувати його вміст ще немає ніякої потреби. Крім цього, слід також враховувати, що термічний відпуск зварних металокопункцій є вартісною технологічною операцією, вимагає застосування складного обладнання і значних енергозатрат. Інколи матеріальні витрати на виконання термічного відпуску складають до 50 % вартості виготовлення зварної металокопункції.

Враховуючи вище наведене, можна з високим ступенем вірогідності припустити, що виконувати низькотемпературний відпуск (НТВ) металокопункцій, при зварюванні яких використовували високолеговані матеріали, скоріше всього недоцільно. Але щоб довести цей висновок, необхідно було провести спеціальні порівняльні дослідження змін параметрів структури загартованого металу ЗТВ та тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцної сталі з низько- та високолегованими швами до та після НТВ. В цьому і полягала мета виконаних досліджень, результати яких наведено нижче.

О.А. Гайворонський – <https://orcid.org/0000-0002-5922-5541>, В.Д. Позняков – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>, О.М. Берднікова – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>, Т.О. Алексеєнко – <https://orcid.org/0000-0001-8492-753X>

© О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, О.М. Берднікова, Т.О. Алексеєнко, О.С. Шишкевич, 2020

**Методика досліджень.** В якості об'єкту досліджень були використані модельні зразки та зварні з'єднання високоміцної середньовуглецевої легованої сталі типу 30X2H2MФ. На модельних зразках визначали вплив НТВ на зміну фізико-механічних властивостей загартованого металу ЗТВ. При цьому використовувалася сталь марки 30X2H2MДФ наступного складу, мас. %: 0,36 С, 1,32 Si, 0,81 Mn, 1,65 Cr, 2,34 Ni 0,50 Mo, 0,21 V. А при порівняльних дослідженнях змін в структурі загартованого металу ЗТВ використовували зварні з'єднання, які після зварювання не піддавали НТВ. При цьому використовували сталь марки 30X2H2MДФ аналогічного складу до наведеного вище, але вміст вуглецю в ній був ближче до нижньої границі легування ( 0,31 %С). У всіх випадках НТВ, в разі застосування його, виконували при температурі 230 °С на протязі 3 год. через 15...20 год. після імітації термодформаційного циклу на модельних зразках або після зварювання з'єднань.

Імітацію термодформаційних циклів дугового зварювання з використанням модельних зразків виконували на установці МСР-75 [10]. При цьому використовували модельні зразки двох типів – перетином 12×12 мм та 20×10 мм. Перші зразки – для визначення показників міцності ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ), пластичності ( $\delta_5$ ,  $\psi$ ) та ударної в'язкості ( $KCU_{+20}$ ), другі – для визначення критичного коефіцієнту інтенсивності напружень ( $K_{1C}$ ) загартованого металу ЗТВ. Відповідно до прийнятого методу імітації максимальна температура нагріву модельних зразків складала 1250 °С, швидкість нагріву – 180...200 °С/с (час нагріву 6...7 с). Зразки після нагріву одразу охолоджувалися зі швидкостями від 4 до 20 °С/с ( $w_{65}$ ), які є найбільш характерними для умов дугового зварювання багат шарових з'єднань. У центральній частині зразків формувалась однорідна за структурою ділянка металу шириною 40 мм. Потім з модельних зразків виготовляли спеціальні зразки для випробувань при статичному розтягу та ударному вигині відповідно до ГОСТ 1497 та ГОСТ 9454, або статичному вигині відповідно до ГОСТ 25-506.

Для визначення коефіцієнту  $K_{1C}$  послідовність експериментів була наступна. Після імітації термодформаційного циклу дугового зварювання в центральній частині модельних зразків підготовлювали надріз, з вершини якого вирощували втомні тріщини глибиною 3 мм. Після цього зразки випробували при статичному навантаженні вигином. При випробуваннях визначали величину критичного навантаження при розвитку магистральної тріщини та підраховували показник критичного коефіцієнту інтенсивності напружень  $K_{1C}$  згідно до методу механіки руйнування [11].

Зразки стикових зварних з'єднань підготовлювали наступним чином. Вони були товщиною 10 або 20 мм, мали V-подібну розробку, які зварювали механізованим способом в суміші захисних газів (82 % Ar+18 % CO<sub>2</sub>) двома матеріалами. При зварюванні одних зразків використовували дріт Св-10ГСМТ, а інших – дріт Св-08Х20Н9Г7Т. В обох випадках діаметр дротів дорівнював 1,2 мм. Режими зварювання були однакові, а саме: зварювальний струм 160...180 А, напруга на дузі 26...28 В, швидкість зварювання 12...15 м/ч (погонна енергія 8...10 кДж/см). В разі зварювання низьколегованим дротом, для уникнення вірогідності утворення холодних тріщин в металі ЗТВ з'єднань, застосовували попередній підігрів металу до температури 250 °С. При використанні високолегованого дроту зварювання зразків виконували без попереднього підігріву. При цьому температура металу при багат шаровому зварюванні зразків не перевищувала 30...50 °С, для досягнення чого зразки охолоджувалися на повітрі після накладення кожного шару шва.

Тріщиностійкість зварних з'єднань визначали при їх випробуваннях на опірність утворенню тріщин втоми при циклічному навантаженні вигином на установці УМП-02 у відповідності до загально прийнятих методів [12]. Напруження циклу при навантаженні зварних з'єднань складало 60 МПа з частотою 14 Гц. За критерій оцінки при проведенні іспитів приймали критичну кількість циклів навантаження, при яких в зварному з'єднанні утворюється тріщина втоми довжиною 2...3 мм.

Для досліджень структурних змін в металі зварних з'єднань використовували стандартні методи оптичної та електронної металографії. Для оптичної металографії використовували мікроскоп «Neophot-32» та твердомір М-400. Параметри тонкої структури та щільність дислокацій в загартованому металі ЗТВ досліджували на трансмісійному електронному мікроскопі (ТЕМ) JEM-200СХ фірми «LEOL». В подальшому, використовуючи експериментально виявлені параметри структури, за методом аналітичної оцінки розраховували локальні внутрішні напруження ( $\tau_{л.вн}$ ) [13].

**Результати досліджень та їх аналіз.** На першому етапі досліджень визначили вплив НТВ на зміну фізико-механічних властивостей загартованого металу ЗТВ при випробуваннях модельних зразків. Визначені показники механічних властивостей та в'язкості руйнування загартованого металу ЗТВ в залежності від швидкості його охолодження узагальнено в табл. 1 та табл. 2.

Якщо порівняти отримані результати іспитів, які наведено в табл. 1 видно, що після НТВ показники тимчасової міцності металу ЗТВ знижуються до 10 % (від 1490...1805 до 1420...1640 МПа), а межа плинності металу практично не змінюється.

Таблиця 1. Вплив НТВ на механічні властивості металу ЗТВ сталі 30X2H2MФ

Наявність НТВ	$w_{6/5}, \text{ }^\circ\text{C/c}$	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$KCU_{+20}, \text{ Дж/см}^2$
Ні/Так	Сталь	1460	1780	11,1	48,6	80
	5	1262/1250	1490/1420	12,7/12,8	55,0/55,0	62,1/64,3
	15	1445/1430	1705/1580	11,2/12,1	48,3/50,3	54,6/58,0
	20	1502/1480	1805/1640	10,6/11,8	47,3/49,8	48,7/52,9

ся і знаходиться на рівні 1250...1480 МПа. При цьому показники пластичності загартованого металу при статичному навантаженні  $\delta_5$  і  $\psi$  та в'язкості руйнування при ударі  $KCU_{+20}$  при збільшенні швидкості охолодження поступово підвищуються приблизно відповідно на 5,3 і 11,3 % та 8,6 %. Більш суттєво, від 14 до 61 % в залежності від швидкості охолодження, підвищуються показники критичного коефіцієнту розвитку тріщин  $K_{1C}$  (табл. 2). Після НТВ вони вирівнюються за величиною, незалежно від швидкості охолодження металу при зварюванні, і знаходяться в межах від 96,8 до 100,9 МПа $\sqrt{\text{м}}$ . При цьому суттєво, більш ніж в 2 рази, збільшується частка в'язкої складової на поверхні зламів зразків, руйнування яких в обох випадках характеризується переважно крихким внутрішньозеренним типом (рис. 1), а в разі відсутності НТВ наявністю також міжзеренного крихкого руйнування з вторинними тріщинами по границям зерен (рис. 1, а).

Проведені випробування довели, що при НТВ зварних з'єднань загартований метал ЗТВ поліпшує свої пластичні властивості. Це повинно відобразитися і на підвищенні тріщиностійкості зварних з'єднань, що було визначено на другому етапі досліджень. Для випробувань при цикліч-

ному навантаженні вигином були відібрані зразки зварних з'єднань сталі 30X2H2MФ, при зварюванні яких були використані дроти Св-10ГСМТ та Св-08Х20Н9Г7Т. Випробуванням піддавали стикові зварні з'єднання товщиною 20 мм з V-подібною розробкою, зварювання яких виконували з повним проваром (підварювання кореня шву із зворотної сторони). Умови зварювання та іспитів зразків наведено вище. Узагальнені результати випробувань представлено на рис. 2.

Як видно, НТВ сприяє підвищенню тріщиностійкості зварних з'єднань сталі 30X2H2MФ як з низьколегованим, так і з високолегованим швом. Але початковий рівень тріщиностійкості та ступінь впливу НТВ суттєво відрізняється в залежності від легування наплавленого металу. При зварюванні низьколегованим дротом Св-10ГСМТ опірність зварних з'єднань утворенню тріщин втоми без застосування НТВ практично в 2,73 рази нижча, ніж при зварюванні дротом Св-08Х20Н9Г7Т. Порівняльна кількість циклів навантаження до утворення тріщин втоми відповідно складає 150 та 410 тис. циклів. Слід зауважити, що зварювання зразків сталі низьколегованим дротом виконувалося при застосуванні попереднього підігріву до температури 250  $^\circ\text{C}$ , а високолегованим дротом без попереднього підігріву. При цьому швидкість охолодження в металі ЗТВ відповідно становила 3...5 та 20...25  $^\circ\text{C/c}$ . Тобто в металі ЗТВ зварного з'єднання з високолегованим дротом умови формування гартівної структури були більш жорсткіші.

Після НТВ опірність утворенню тріщин втоми зварних з'єднань з низьколегованим швом зростає більш ніж в 2,5 рази (від 150 до 380 тис. циклів), а

Таблиця 2. Вплив НТВ на опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ сталі 30X2H2MФ

Наявність НТВ	Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{1C}, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$		
	$w_{6/5} = 4,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$	12,0	20
Ні	87,8	69,7	60,0
Так	100,9	100,1	96,8

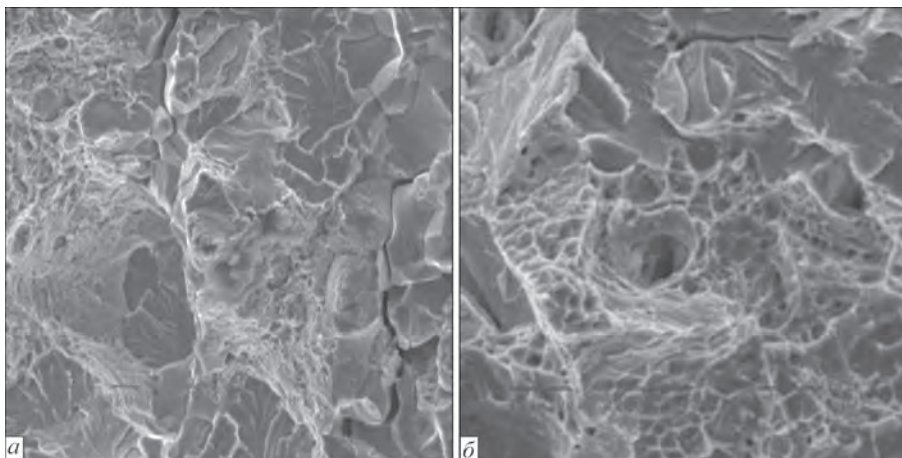


Рис. 1. Характерна поверхня зламу металу ЗТВ сталі 30X2H2MФ ( $w_{6/5} = 12,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ) в зоні розвитку магістральної тріщини без (а) та при наявності НТВ (б): а –  $\times 1010$ ; б –  $\times 2020$ ;



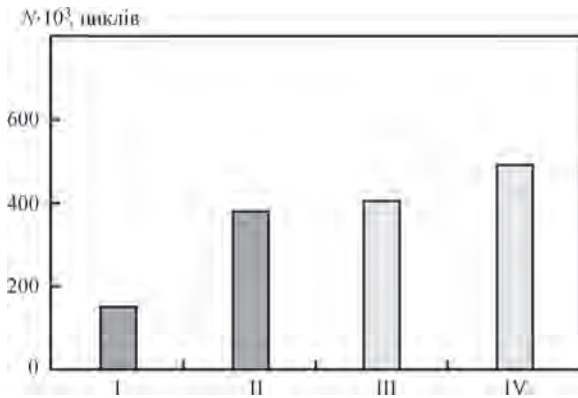


Рис. 2. Опірність утворенню тріщин втоми стикових з'єднань сталі 30X2H2MF при зварюванні дротом Св-10ГСМТ (I, II) та Св-08X20H9Г7Т (III, IV) без (I, III) та при наявності НТВ (II, IV) з'єднань з високолегованим швом всього на 19,5 % (від 410 до 490 тис. циклів). При цьому слід відмітити, що після НТВ кількість циклів навантаження до утворення тріщини втоми для зварного з'єднання з низьколегованим швом не перевищує той рівень, що мають зварні з'єднання з високолегованим швом навіть за умови їх зварювання без попереднього підігріву і НТВ. Очевидно, що встановлені зміни в рівнях тріщиностійкості відбулися в результаті позитивних змін в структурі металу зварних з'єднань, по-перше, при зварюванні в разі використання високолегованого зварювально-

го матеріалу, а по-друге, безпосередньо при виконанні НТВ. Дослідження в цьому напрямку були метою третього етапу досліджень.

Узагальнені результати досліджень впливу НТВ на зміну структурного стану шва та навколошовної ділянки ЗТВ зварних з'єднань сталі 30X2H2MF наведені в табл. 3 та табл. 4, а на рис. 3–6 приведені характерні структури металу зварних з'єднань.

Дослідження мікроструктури металу зварних з'єднань з низьколегованим швом методами оптичної металографії показали, що в металі шва формується структура зернистого бейніту ( $B_3$ ) з розміром кристалітів  $h_{кр} = 40...150$  мкм і мікротвердістю  $HV_{0,1} = 2450...2640$  МПа (рис. 3, а). Структура металу навколошовної ділянки ЗТВ (ділянка великого зерна) на відстані 700 мкм від лінії сплавлення (ЛС) представлена виключно мартенситом з розміром зерен  $D_3 = 20...50$  мкм і мікротвердістю 5140...5720 МПа (рис. 3, в). Більш детальні дослідження методом ТЕМ дозволили виявити, що це є мартенсит гартування (рис. 4, а, б) та частково мартенсит відпуску (рис. 4, в), з розміром рейок  $h_p = 0,4...0,8$  мкм, щільність дислокацій  $\rho$  в якому становить від  $9 \cdot 10^{10}$  до  $1,6 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

Після НТВ фазовий склад, розміри кристалітів в металі шва та зерен в металі ЗТВ практично не змінюються. Мікротвердість структурних скла-



Рис. 3. Мікроструктура металу з'єднання сталі 30X2H2MF при зварюванні дротом Св-10ГСМТ: а – центральна ділянка металу шва ( $\times 500$ ); б – зона сплавлення ( $\times 200$ ); в – навколошовна ділянка ЗТВ на відстані до 700 мкм від лінії сплавлення ( $\times 500$ )

Таблиця 3. Структурні параметри металу зварних з'єднань сталі 30X2H2MF при зварюванні дротом Св-10ГСМТ

Ділянка	Наявність НТВ	Параметри структури					
		$V_d, \%$	$D_3$ (для шву $h_{кр}$ ), мкм	$HV_{0,1}$ , МПа	$h_p$ , мкм	$\rho$ , см <sup>-2</sup>	$\tau_{л.вн}$ , МПа
Шов	Ні	$B_3, 100 \%$	40...150	2450...2640	-	-	-
	Так	$B_3, 100 \%$	60...160	2450...2640	-	-	-
ЗТВ	Ні	$M, 100 \%$	2...50	510...5720	0,4...0,8	$9 \cdot 10^{10}...1,6 \cdot 10^{11}$	1867...2988
	Так	$M, 100 \%$	20...50	4880...5420	0,4...0,8	$8 \cdot 10^{10}...1 \cdot 10^{11}$	1474...1867

Таблиця 4. Структурні параметри металу зварних з'єднань сталі 30X2H2MF при зварюванні дротом Св-08X20H9Г7Т

Ділянка	Наявність НТВ	Параметри структури					
		$V_d, \%$	$D_3$ (для шву $h_{кр}$ ), мкм	$HV_{0,1}$ , МПа	$h_p$ , мкм	$\rho$ , см <sup>-2</sup>	$\tau_{л.вн}$ , МПа
Шов	Ні	$A+\Phi, 97+3 \%$	7...30	2210...2300	-	-	-
	Так	$A+\Phi, 97+3 \%$	7...30	2210...2300	-	-	-
ЗТВ	Ні	$БН, 2...5 \%$	25...55	4210	0,4...0,6	$5...6 \cdot 10^{10}$	924...1109
		$M, 95...98 \%$		4880...5090		$8...9 \cdot 10^{10}$	1474...1600
	Так	$БН, 2...5 \%$	25...60	4210	0,4...0,6	$4...5 \cdot 10^{10}$	739...924
		$M, 95...98 \%$		4420...4880		$7...8 \cdot 10^{10}$	1294...1474

дових в металі шва також не змінюється. Але, на відміну від шва, в навколошовній ділянці ЗТВ мікротвердість мартенситу знижується приблизно на 9 % – до 4880...5420 МПа, а щільність дислокацій в ньому зменшується до  $8 \cdot 10^{10} \dots 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при більш рівномірному їх розподілі (рис. 4, *з-е*). При цьому максимальний рівень локальних структурних напружень ( $\tau_{\text{л.вн}}$ ), який підраховується в порівнянні з теоретичною міцністю металу, знижується до 40 % – від 2988 до 1867 МПа. Таке зниження рівня локальних напружень суттєво сприяє спроможності загартованого металу до мікропластичного деформування і його опірності до утворення та розвитку тріщин під дією зовнішнього навантаження значно підвищується. Тому при зварюванні з'єднань сталі 30Х2Н2МФ низьколегованим дротом Св-10ГСМТ застосування низькотемпературного відпуску конче необхідно.

В з'єднаннях сталі 30Х2Н2МФ, зварювання яких виконували високолегованим дротом Св-08Х20Н9Г7Т, в центральній частині металу шва формується аустенітно-феритна структура (А+Ф), в якій об'ємна частка фериту не перевищує 3 %. Розмір кристалітів становить 7...30 мкм, мікротвердість структурних складових знаходиться в межах 2210...2300 МПа (рис. 5, *а*). Біля лінії сплавлення розмір кристалітів та мікротвердість збільшуються відповідно до 6...50 мкм та 2450...2640 МПа (рис. 5, *б*).

Структура металу навколошовної ділянки ЗТВ, глибина якої становить до 300 мкм, є переважно мартенситна (95...98 %) з невеликою часткою бейніту (2...5 %), розмір зерен 25...55 мкм (рис. 5, *в*). Без низького відпуску зварних з'єднань мікротвердість бейніту становить 4210 МПа, мартенситу 4880...5090 МПа. За морфологією це є нижній бейніт (рис. 6, *а*) та рейковий дислокаційний мартенсит відпуску з розміром рейок 04...0,6 мкм (рис. 6, *б, в*). Щільність дислокацій в структурній складовій бейніту, без застосування низького відпуску, становить  $(5 \dots 6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , мартенситу –  $(8 \dots 9) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Слід зазначити, що ці величини щільності дислокацій в складових структури навколошовної ділянки ЗТВ зварного з'єднання з високолегованим швом значно нижчі, ніж при зварюванні дротом Св-10ГСМТ. Ці показники нижчі навіть від тих, що були отримані після НТВ зварних з'єднань з низьколегованим швом. Це пов'язано з особливостями впливу термодформаційних процесів у високолегованому металі шва при охолодженні з'єднань на структурно-фазові перетворення в металі ЗТВ. При цьому перетворення зміщуються в область більш високих температур з формуванням проміжної структури бейніту, а при утворенні мартенситу відбуваються процеси його відпуску [8].

Після НТВ фазовий склад, розміри кристалітів та мікротвердість структурних складових

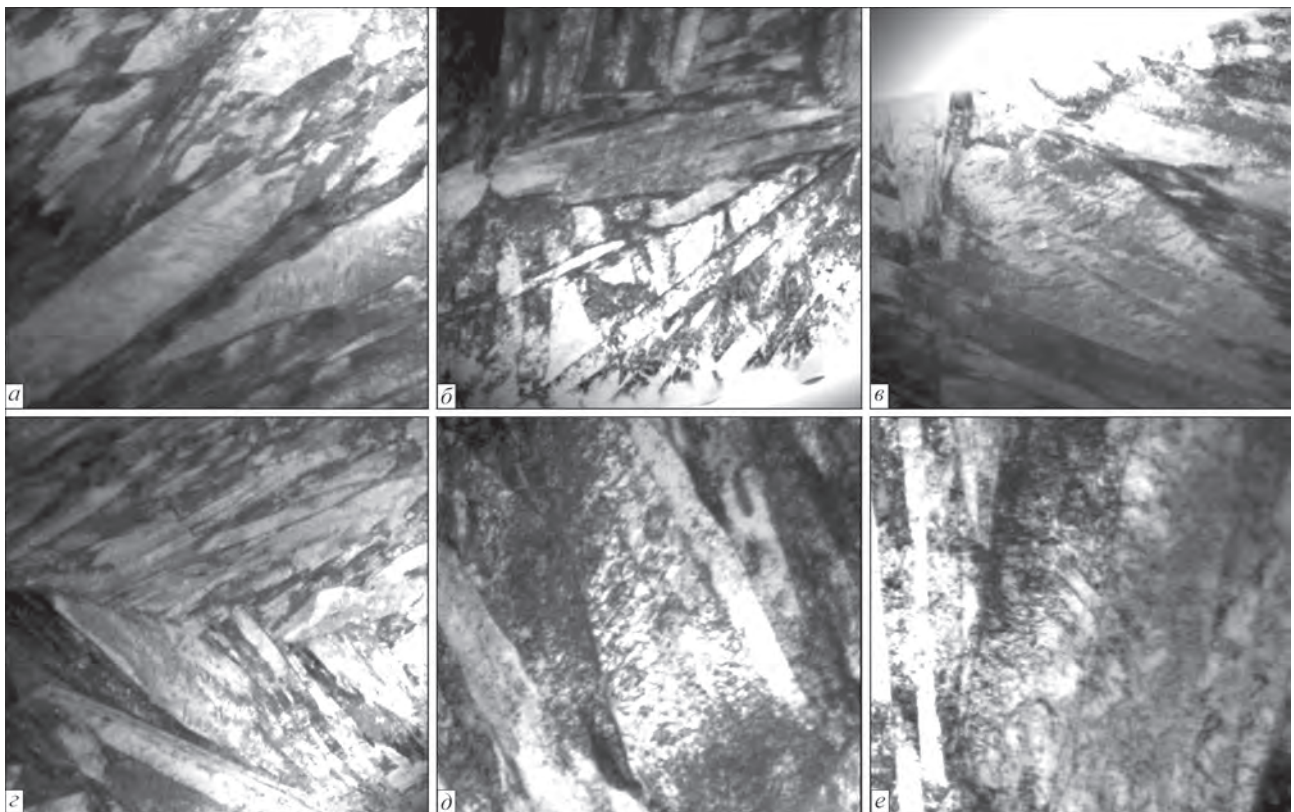


Рис. 4. Тонка структура металу навколошовної ділянки ЗТВ зварних з'єднань сталі 30Х2Н2МФ (дріт Св-10ГСМТ) без (*а – в*) та при наявності НТВ (*з–е*): *а* ( $\times 22000$ ), *б* ( $\times 25000$ ), *з* ( $\times 35000$ ) – мартенсит гартування; *в* ( $\times 22000$ ), *д* ( $\times 52000$ ), *е* ( $\times 35000$ ) – мартенсит відпуску





Рис. 5. Мікроструктура металу з'єднання сталі 30X2H2MФ при зварюванні дротом Св-08Х20Н9Г7Т: а – центральна ділянка металу шва ( $\times 500$ ); б – зона сплавлення ( $\times 200$ ); в – навколошовна ділянка ЗТВ на відстані до 300 мкм від лінії сплавлення ( $\times 1000$ )

вих у високолегованому металі шва та розміри зерен в металі ЗТВ, як і в зварних з'єднаннях з низьколегованим швом, також практично не змінюються. Але спостерігаються зміни в наступних параметрах структури металу навколошовної ділянки ЗТВ. Так, мікротвердість нижнього бейніту не змінюється, а щільність дислокацій в ньому знижується до  $(4...5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (рис. 6, з). Мікротвердість складової мартенситу знижується на 5 % – до 4420...4880 МПа, щільність дислокацій в ньому зменшується до  $(7...8) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (рис. 6, д, е). При цьому максимальний рівень  $\tau_{\text{л.вн}}$  в бейніті та мартенситі відповідно знижується на 17 % (від 1109 до 924 МПа) та 8 % (від 1600 до 1474 МПа).

Якщо порівняти отримані дані, то видно, що вплив НТВ на структуру з'єднань, зварювання

яких виконувалися дротом Св-08Х20Н9Г7Т не такий значний, як для з'єднань з низьколегованим швом (дріт Св-10ГСМТ). Якщо в зварних з'єднаннях з низьколегованим швом після відпуску максимальний рівень структурних напружень в основної складової мартенситу знижується до 40 %, то в з'єднаннях з високолегованим швом – всього на 8 %. При цьому в початковому стані, без НТВ, різниця в рівнях структурних напружень складає до 1,9 разів (відповідно 2988 та 1600 МПа, див. табл. 3 та 4).

Отримані дані щодо змін параметрів структури добре корелюють з результатами випробувань зварних з'єднань втомному руйнуванню. Тобто, при зварюванні з'єднань сталі 30X2H2MФ високолегованими матеріалами в загартованому металі ЗТВ вже в процесі зварювання формується більш

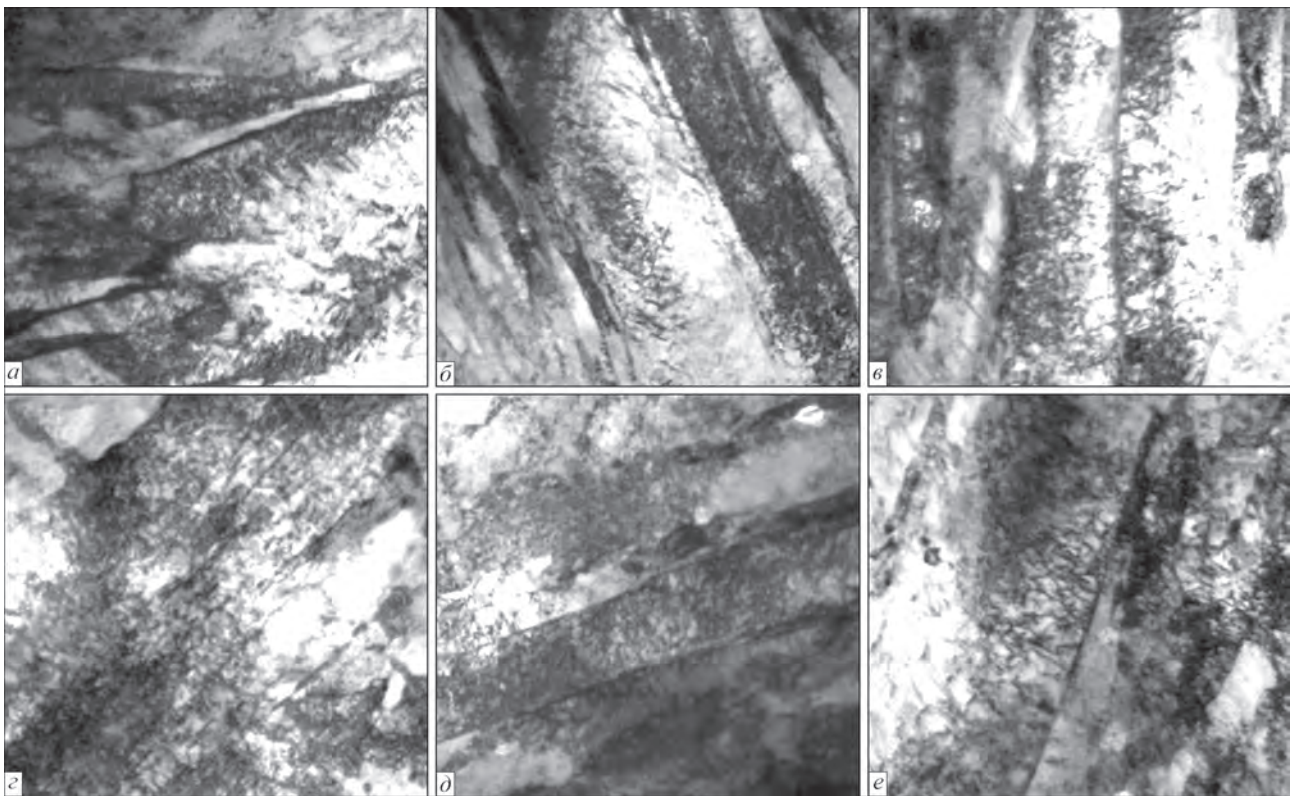


Рис. 6. Тонка структура металу навколошовної ділянки ЗТВ зварних з'єднань сталі 30X2H2MФ (дріт Св-08Х20Н9Г7Т) без (а–в) та при наявності НТВ (з–е): а – ( $\times 52000$ ), з – ( $\times 52000$ ) – нижній бейніт; б – ( $\times 35000$ ), в – ( $\times 52000$ ), д – ( $\times 35000$ ), е – ( $\times 52000$ ) – мартенсит відпуску

пластична та менш напружена структура, ніж яка може бути отримана після НТВ зварного з'єднання з низьколегованим швом. Тому тріщиностійкість зварних з'єднань цієї сталі при зварюванні високолегованими матеріалами знаходиться на високому рівні навіть і без додаткового термічного оброблення. НТВ для таких з'єднань сприяє незначному додатковому підвищенню тріщиностійкості, але воно не є визначальним. Тому застосування НТВ для виробів з середньовуглецевої легованої сталі 30X2H2MФ за умов їх зварювання високолегованими матеріалами не буде істотно вирішальним з точки зору забезпечення надійності зварних з'єднань при експлуатації, і його застосування є недоцільним. Цей висновок може бути поширений на всі сталі даного класу. При застосуванні для відповідальних виробів сталей інших класів необхідне проведення додаткових досліджень.

### Висновки

1. В результаті низькотемпературного відпуску зварних з'єднань сталі 30X2H2MФ відбуваються позитивні зміни параметрів тонкої структури в загартованому металі ЗТВ. При цьому в металі ЗТВ зварних з'єднань, зварювання яких виконується низьколегованими матеріалами, більш активно протікають процеси самовідпуску мартенситу, а максимальний рівень локальних структурних напружень знижується до 40 %. Таке зниження локальних напружень суттєво сприяє спроможності загартованого металу до мікропластичного деформування під дією зовнішнього навантаження. В результаті цього опірність утворенню тріщин втомі з'єднань підвищується більш ніж в 2,5 рази. Тому при зварюванні з'єднань сталі 30X2H2MФ низьколегованим дротом Св-10ГСМТ застосування низькотемпературного відпуску конче необхідно.

2. При зварюванні з'єднань сталі 30X2H2MФ високолегованими матеріалами в загартованому металі ЗТВ формується порівняно більш пластична та менш напружена структура мартенситу відпуску з невеликою кількістю нижнього бейніту. Максимальний рівень напружень в такій структурі на 17 % нижчий, від того що може бути отриманий після НТВ зварного з'єднання з низьколегованим швом. Тріщиностійкість зварних з'єднань при зварюванні високолегованими матеріалами знаходиться на достатньо високому рівні і не потребує додаткового підвищення. Тому нема ніякої потреби піддавати низькотемпературному відпуску зварні металоконструкції виробів зі сталі 30X2H2MФ за умов їх зварювання високолегованими матеріалами. Це є зайва технологічна операція, яка істотно не впливає на забезпечення надійності при експлуатації виробів, а лише збільшує їх вартість.

### Список літератури

1. Бернштейн М.Л. (1968) *Термомеханическая обработка металлов и сплавов* (в 2-х томах). Москва, Металлургия.
2. Лахтин Ю.М. (1983) *Металловедение и термическая обработка металлов*. Москва, Металлургия.
3. Филлипов Г.А., Саррак В.И. (1980) Локальное распределение водорода и внутренние микронапряжения в структуре закаленной стали. *Физика металлов и материаловедение*, **49**, 121–125.
4. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. (1978) *Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей*. Киев, Наукова думка.
5. Єфіменко М.Г., Радзівілова Н.О. (2003) *Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань*. Харків, НТУ ХПІ.
6. Анохов А.Е., Корольков П.М. (2006) *Сварка и термическая обработка в энергетике*. Київ, Екотехнологія.
7. Макаров Э.Л. (1981) *Холодные трещины при сварке легированных сталей*. Москва, Машиностроение.
8. Гордонный В.Г., Гайворонский А.А., Саржевский В.А., Лебедев Ю.М. (1992) Влияние типа металла шва на структуру, свойства и сопротивляемость соединений высокопрочных закаливающихся сталей образованию холодных трещин. *Автоматическая сварка*, **11-12**, 13–16.
9. Козлов Р.А. (1969) *Водород при сварке корпусных сталей*. Ленинград, Судостроение.
10. Позняков В.Д., Костин В.А., Гайворонский А.А. и др. (2015) Влияние термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения и свойства металла ЗТВ среднеуглеродистой легированной стали типа 30X2H2MФ. *Автоматическая сварка*, **2**, 8–15.
11. (1972) *Новые методы оценки сопротивляемости металлов хрупкому разрушению*. Пер. с англ. Роботнов Ю.Н. (ред.). Москва, Мир.
12. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Труфьяков В.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
13. Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Позняков В.Д. и др. (2009) Структурный критерий оценки прочности, пластичности, трещиностойкости металлов, сплавов, композиционных материалов и их сварных соединений. *Зб. праць IV Міжнародної конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій»*, сс. 447–451.

### References

1. Bernshtejn, M.L. (1968) *Thermomechanical treatment of metals and alloys*. In: 2 Vol. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Lakhtin, Yu.M. (1983) *Metal science and heat treatment of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Fillipov, G.A., Sarrak, V.I. (1980) Local distribution of hydrogen and internal microstresses in structure of hardened steel. *Fizika Metallov i Materialovedenie*, **49**, 121–125 [in Russian].
4. Grabin, V.F., Denisenko, A.V. (1978) *Metal science of low- and medium-alloyed steels*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Efimenko, M.G., Radzivilova, N.O. (2003) *Metal science and heat treatment of welded joints*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
6. Anokhov, A.E., Korolkov, P.M. (2006) *Welding and heat treatment in power engineering*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
7. Makarov, E.L. (1981) *Cold cracks in welding of alloyed steels*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Gordony, V.G., Gajvoronsky, A.A., Sargevsky, V.A., Lebedev, Yu.M. (1992) Influence of type of weld metal on structure, properties and resistance of joints of high-strength hardening steels to cold cracking. *Avtomatich. Svarka*, **11-12**, 13–16 [in Russian].
9. Kozlov, R.A. (1969) *Hydrogen in welding of hull plate*. Leningrad, Sudostroenie [in Russian].
10. Poznyakov, V.A., Kostin, V.A., Gajvoronsky, A.A. et al. (2015) Effect of welding thermal cycle on structure-phase transformations and properties of HAZ metal of alloyed 30Kh2N2MF type medium-carbon steel. *The Paton Welding J.*, **2**, 7–13.
11. (1972) *New methods for evaluation of brittle fracture resistance of metals*. Ed. by Yu.N. Robotnov. Moscow, Mir [in Russian].
12. (1990) *Strength of welded joints under alternating loads*. Ed. by V.I. Trufyakov. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
13. Markashova, L.I., Grigorenko, G.M., Poznyakov, V.D. et al. (2009) Structural criterion for evaluation of strength, ductility, crack resistance of metals, alloys, composite materials and their welded joints. In: *Proc. of 4th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Materials and Strength of Structures*, 447–451.



## INFLUENCE OF LOW-TEMPERATURE TEMPERED STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH STEEL 30Kh2N2MF

O.A. Gaivoronsky, V.D. Poznyakov, O.M. Berdnikova, T.O. Alekseenko, O.S. Shyshkevych

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 results of investigations of influence of low-temperature tempering on structural changes, physical and mechanical properties of HAZ metal and crack resistance of welded joints of a high-strength medium-carbon alloy steel 30Kh2N2MF are given. It is shown that the use of a low-temperature tempering is absolutely necessary during welding of products with low-alloy materials, which significantly increases the crack resistance of welded joints. During welding of joints with high-alloy materials in the hardened metal, in the tempered HAZ metal a relatively more ductile and less stressed structure is formed, in which the maximum level of stresses is lower than that which can be achieved after thermal tempering of welded joint with a low-alloy weld. Therefore, the level of crack resistance of welded joints is sufficiently high in any case and there is no need to use low-temperature tempering for it. This is an unnecessary technological operation that does not significantly affect the reliability during operation of products, but only increases their cost. 13 Ref., 4 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: high-strength steel, welded joints, low-temperature tempering, structure, properties, crack resistance*

Надійшла до редакції  
12.05.2020

### Захисний шолом зварювальника Vizor Connect від Fronius

*Інтелектуальний засіб професійного захисту,  
що забезпечує максимальну зручність під час роботи*

**Vizor Connect — перший у світі зварювальний шолом, який здатен обмінюватися даними із джерелом живлення через Bluetooth. Це означає, що скло у ньому затемнюється ще до того, як запалиться зварювальна дуга. Цей шолом усуває проблему інтерференції зовнішнього світла та забезпечує надійне затемнення навіть у складних умовах зварювання. Тому ця модель забезпечує водночас і високий рівень захисту, і зручність під час роботи.**

За допомогою технології Fronius PreTrigger джерело живлення через Bluetooth надсилає сигнал зварювальному шолому в той самий момент, коли зварювальник натискає кнопку увімкнення на зварювальному пальнику. Відповідно, затемнення скла шолома відбувається до того, як станеться запалювання зварювальної дуги. Це дає змогу захистити очі зварювальника від раптових спалахів світла, які раніше могли з'явитися, поки скло шолома ще не затемнене. Таким чином, шолом забезпечує кращий захист зору від світла під час зварювання і сприяє меншій втомлюваності зварювальника.



Касета для захисту від осліплюючого світла залишається на місці навіть за найнижчих значень струму, доки горить зварювальна дуга, навіть якщо дуга прихована чи незручно розташована. Такого результату вдається досягти завдяки тому, що захисний шолом швидко реагує на сигнали, які отримує від підключеного джерела струму. Відповідно, зварювальник краще захищений від впливу небезпечних факторів у процесі виконання робіт. Ступінь захисту залежить від методу зварювання й автоматично змінюється в діапазоні від DIN 5 до DIN 12. Відповідно, рівень затемнення завжди ідеально адаптується до інтенсивності зварювальної дуги. Зварювальник також може вибрати ручний режим роботи та регулювати рівень затемнення відповідно до індивідуальних потреб.



Інша важлива перевага захисного шолома Vizor Connect – його здатність відфільтрувати інтерференцію зовнішнього світла. Звичайні зварювальні шоломи іноді затемнюються не тоді, коли треба, реагуючи на відбивання світла, спрацювання світлових індикаторів або на спалахи інших зварювальних дуг. Але зі зварювальним шоломом Vizor Connect можна про це забути. Цей шолом забезпечує ідеальний захист під час всіх етапів зварювальних робіт, включно з підготовчими процедурами та процесами після зварювання, зокрема й під час шліфування швів. Коли зварювальник розриває з'єднання по Bluetooth між шоломом та джерелом живлення, Vizor Connect функціонує як звичайний захисний шолом. Коли скло шолома не затемнене, воно, завдяки спеціально розробленому фільтру УФ- та інфрачервоного випромінювання, забезпечує чіткий огляд з рівнем яскравості 2,5, а також сприйняття кольорів без спотворень. Касета для захисту від осліплюючого світла з висічкою для носа надає зварювальнику поле огляду без жодних перешкод і забезпечує додатковий комфорт під час роботи. Спеціальна форма, застосована для шолома, майже у шість раз збільшує поле огляду зварювальника, а також дає змогу зменшити вагу шолома.

Зварювальний шолом є важливою частиною індивідуального захисного спорядження. Він захищає очі та обличчя зварювальника від шкідливого впливу УФ-випромінювання.

Сучасний дизайн шолома Vizor Connect від Fronius відображає його функціональність і високотехнологічність. Форма висічки для носа забезпечує зварювальнику відсутність перешкод у полі огляду.