

ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ 15X2M2ФБС (ПЗ) ТА X10CrMoVNb91 (P91)

В.Ю. Скульський¹, М.О. Німко¹, А.Р. Гаврик¹, І.Г. Осипенко¹, О.В. Вавілов², О.Г. Кантор²,
Л.П. Рубашка²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²АТ «Укренергомашини». 61037, м. Харків, просп. Героїв Харкова, 199. E-mail: office@ukrenergymachines.com

В рамках актуальної на сьогодні проблеми реконструкції й відновлення устаткування теплових енергоблоків ТЕС/ТЕЦ проведено роботу зі створення основ зварювання корпусних елементів парової турбіни з низьколегованої сталі 15X2M2ФБС (ПЗ) з патрубками з високохромистої мартенситної сталі X10CrMoVNb91 з 9 % Cr (P91). Наведено результати визначення теплового режиму зварювання таких комбінованих з'єднань для запобігання уповільненому руйнуванню. На основі вивчення впливу різних режимів високого відпуску на ударну в'язкість металу швів і твердість загартованих при зварюванні ділянок зварних з'єднань обрано режими термічної обробки залежно від типу електродного матеріалу. Показано, що результуючі механічні властивості зварних з'єднань відповідають встановленим при виконанні роботи вимогам. Бібліогр. 12, табл. 5, рис. 9.

Ключові слова: сталі теплостійкі, низьколегована сталь, високохромиста мартенситна сталь, комбіновані зварні з'єднання, холодні тріщини, високий відпуск, механічні властивості

Вступ. Як свідчать інформаційні джерела, на сьогодні котельне устаткування енергоблоків ТЕС/ТЕЦ знаходиться в незадовільному стані. До його загальної характеристики відносять моральну застарілість проектних технологій, значне зношення обладнання (наприклад, перевищення «межі фізичного зношення у 200 тис. годин» приблизно у 80 % енергоблоків), обмеження робочих параметрів теплоносія з причини недостатньої теплостійкості сталей, проблеми очищення від викидів забруднюючих речовин, включаючи забезпечення чинних вимог до емісії парникового газу тощо [1].

З урахуванням існуючих проблем в енергетичній галузі [1, 2] та економічних можливостей України доцільним, крім будівництва нових енергоблоків, є проведення своєчасних ремонтів і реконструкції устаткування з використанням прогресивних технологічних рішень і вдосконалених конструкційних матеріалів. Стосовно вузлів, що працюють під впливом високих температур і тиску, можна використовувати нові модифікації високохромистих сталей з більш високими тривалою міцністю і опором корозії в робочих умовах, ніж традиційні низьколеговані сталі. На сучасному етапі найвірогіднішим матеріалом-кандидатом для робіт з відновлення і реконструкції котлоагрегатів може бути сталь з 9 % Cr типу P91 (X10CrMoVNb91). Ця сталь, а також її нові модифікації проходять дослідження і знаходять широке застосування у світовій практиці при виготовленні високотемпературних компонентів устаткування теплових енергоблоків [3, 4]. Перевагами використання таких сталей є можли-

вість збільшення робочих параметрів теплоносія (до температури 600...620 °С, тиску до 31 МПа), зменшення маси конструкцій при забезпеченні їхньої підвищеної надійності при експлуатації.

У запропонованій роботі на прикладі модернізації енергетичного устаткування наведено результати розробки технології зварювання трубних елементів (патрубок) зі сталі P91 з корпусом парової турбіни з низьколегованої сталі ПЗ (15X2M-2ФБС). Роботу виконано у співпраці з АТ «Укренергомашини» (колишній АТ «Турбоатом»).

Матеріали і методи досліджень. Хімічний склад застосовуваних сталей наведено у табл. 1. Для зварювання їх комбінованого з'єднання обрано електроди з типом легування наплавленого металу, близького до складу кожної сталі (табл. 2). Перед використанням електроди прожарювали за режимом, рекомендованим виробником (Böhler Thyssen Schweisstechnik), при 300...350 °С, 2 год. Кількість дифузійного водню $H_{\text{диф}}$ визначали спиртовим аналізом з використанням «олівцевих» проб електродного металу, наплавленого у мідний кокіль [5]. Для електродів Thermanit Chromo 9V $H_{\text{диф}}$ становило 0,117...0,5, для Thermanit P24 – 0,582...1,9 см³/100 г. Враховуючи схильність сталей до загартування, оцінювали вплив термічного режиму зварювання (попереднього підігріву) на запобігання уповільненому руйнуванню, для чого використовували традиційні методи випробувань – Implant та зварювання стикових жорстких з'єднань типу Tekken з асиметричною У-подібною розробкою кромки у контрольній зоні (ДСТУ EN ISO 17642-2, ДСТУ EN ISO 17642-3 [6, 7]). Зразки

Скульський В. Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-4766-5355>, Німко М. О. – <https://orcid.org/0000-0002-9672-4921>,

Гаврик А. Р. – <https://orcid.org/0000-0002-0793-2754>, Осипенко І. Г. <https://orcid.org/0000-0002-9969-7375>

© В.Ю. Скульський, М.О. Німко, А.Р. Гаврик, І.Г. Осипенко, О.В. Вавілов, О.Г. Кантор, Л.П. Рубашка, 2022

Implant (діаметром 8 мм) на кінці робочої частини, що приварюється до пластини, мали спіральний концентратор напружень у вигляді канавки V-подібного профілю завглибшки 0,5 мм з кутом розкриття 40° і радіусом заокруглення у вершині 0,1 мм (відповідно до ДСТУ EN ISO 17642-3). При випробуваннях Implant температуру попереднього під-

дгріву вимірювали потенціометром і термопарою типу ХА (у захисній керамічній оболонці), пропущеною через отвір у опірній пластині й привареною до зразка за допомогою конденсаторної розрядної машини [8]. При випробуваннях Tekken і зварюванні контрольних стикових з'єднань застосовували контактну термопару цього ж типу з по-

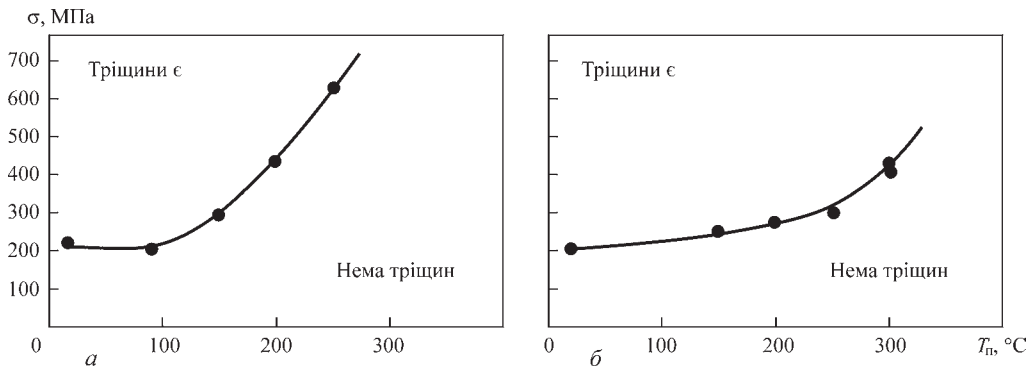


Рис. 1. Вплив температури попереднього підгріву при випробуваннях Implant на критичні напруження, що викликають уповільнене руйнування зварних з'єднань: *a* – сталь ПЗ, електроди Thermanit P24; *б* – сталь P91, електроди Thermanit Chromo 9V

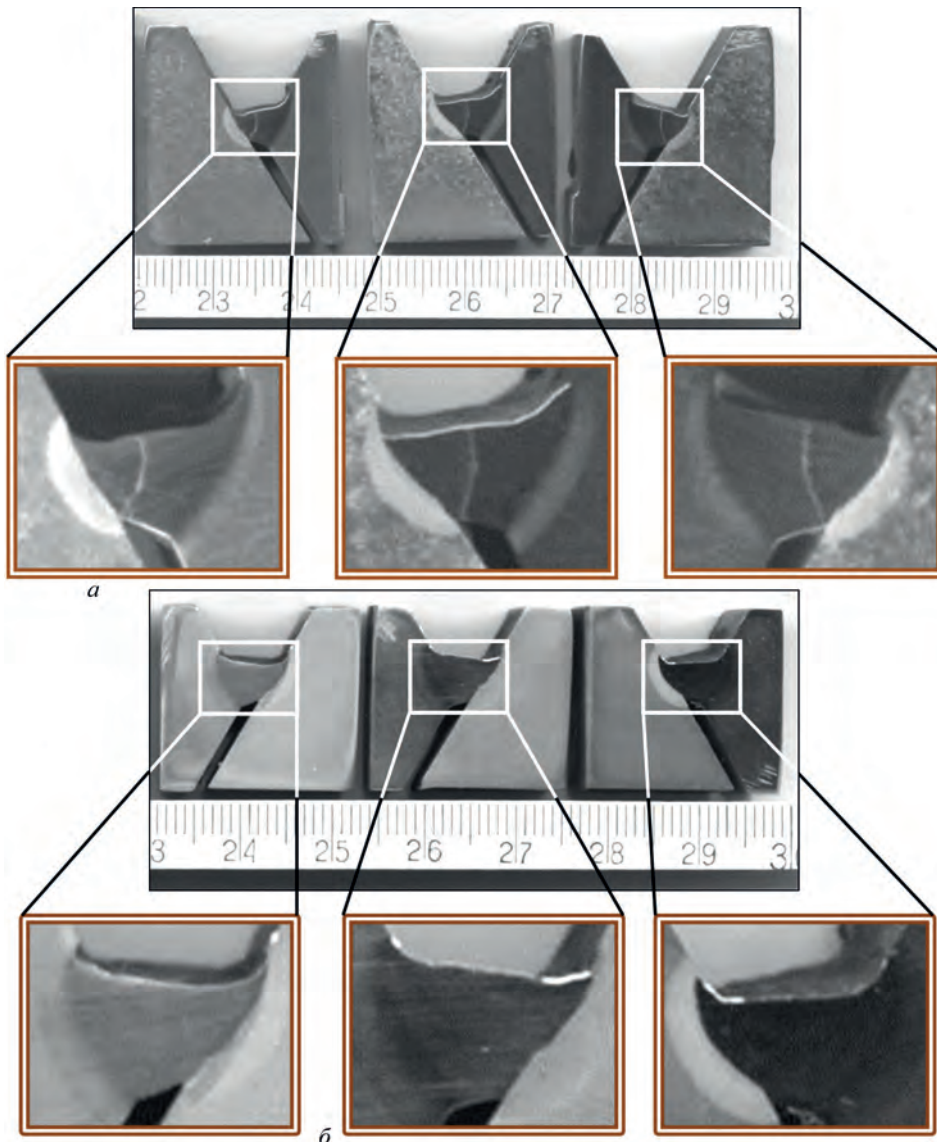


Рис. 2. Поперечні шліфи, вирізані зі з'єднань Tekken: *a* – електрод Thermanit P24; $T_n = 150$ °C (тріщини ϵ); *б* – електрод Thermanit Chromo 9V; $T_n = 175$ °C (тріщин нема)

тенціометром КСП 4. Механічні властивості визначали відповідно до положень чинних стандартів щодо випробувань на статичне розтягування (металу шва і зварних з'єднань відповідно ДСТУ EN ISO 5178:2015, ДСТУ EN ISO 4136:2014), ударні випробування швів (ДСТУ EN ISO 9016:2019) та статичний згин зварних з'єднань (ДСТУ EN ISO 5173:2019). Твердість за методом Віккерса вимірювали при навантаженні 5 кг. Для оцінювання тривалої міцності (металу швів і зварних з'єднань) використовували зразки, виготовлені згідно з ДСТУ ISO 204:2019. Зразки для випробувань виготовляли зі стикових комбінованих з'єднань сталей ПЗ+P91 завтовшки 20 мм зі скосом кромок 30°. Зварювання виконували обома типами досліджуваних електродів на таких режимах: для кореневих проходів – струм $I_{зв} = 95...105$ А, напруга $U_d = 24$ В, швидкість зварювання $v_{зв} \sim 5$ м/год; для заповнюючих проходів – $I_{зв} = 130...140$ А, $U_d = 24$ В, $v_{зв} \sim 16...20$ м/год; попередній підігрів, прийнятий за результатами експериментів (див. далі) становив 200...230 °С. Металографічні дослідження мікроструктур проводили з використанням світлового мікроскопа «Neophot-32».

Результати та їх аналіз. При проведенні роботи головним завданням було забезпечення як стійкості зварних з'єднань проти уповільненого руйну-

вання (холодних тріщин), що завжди вимагається при зварюванні гартівних сталей, так і ударної в'язкості металу швів не нижче 51 Дж/см² (41 Дж [6]) при їхній міцності не нижче основного металу.

Як відомо, головним технологічним чинником протидії уповільненому руйнуванню, крім обмеження концентрації дифузійного водню, що потрапляє у шов, є термічний режим зварювання. Останній, у свою чергу, регулюється попереднім/супутнім підігрівом металу в зоні з'єднання. На рис. 1 наведено результати кількісної оцінки впливу попереднього підігріву на стійкість досліджуваних сталей проти цього виду руйнування, отримані за випробуваннями Implant. Критерієм є максимальні – критичні – напруження, перевищення яких веде до ушкодження з'єднання.

З результатів випробувань з'єднань сталі ПЗ видно, що підігрів приблизно до 100 °С не впливає на опір руйнуванню. Критичні напруження залишаються на тому ж рівні як і при зварюванні без підігріву. Проте при підігріві до 150 °С і вище опір тріщиноутворенню різко зростає. Це підтверджує доцільність зварювання сталі ПЗ з підігрівом більше 150 °С.

У з'єднань мартенситної сталі P91 інтенсивність зростання стійкості проти тріщин відбувається при температурі вище 200 °С. Однак у за-

Таблиця 1. Хімічний склад застосовуваних у роботі теплостійких сталей, мас. %

Сталь	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Nb
ПЗ	0,115	0,468	0,67	0,023	0,027	1,95	0,16	1,12	0,32	0,072
P91	0,085	0,33	0,43	0,015	0,013	8,85	0,12	1,0	0,25	0,069

Таблиця 2. Хімічний склад електродного металу, мас. %

Марка електрода	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Ti
Thermanit Chromo 9V	0,12	0,1	0,55	<0,001	0,010	9,0	0,75	0,98	0,25	0,038	0,006
Thermanit P24	0,11	0,1	0,33	<0,001	0,011	2,6	0,01	0,90	0,20	0,028	0,002

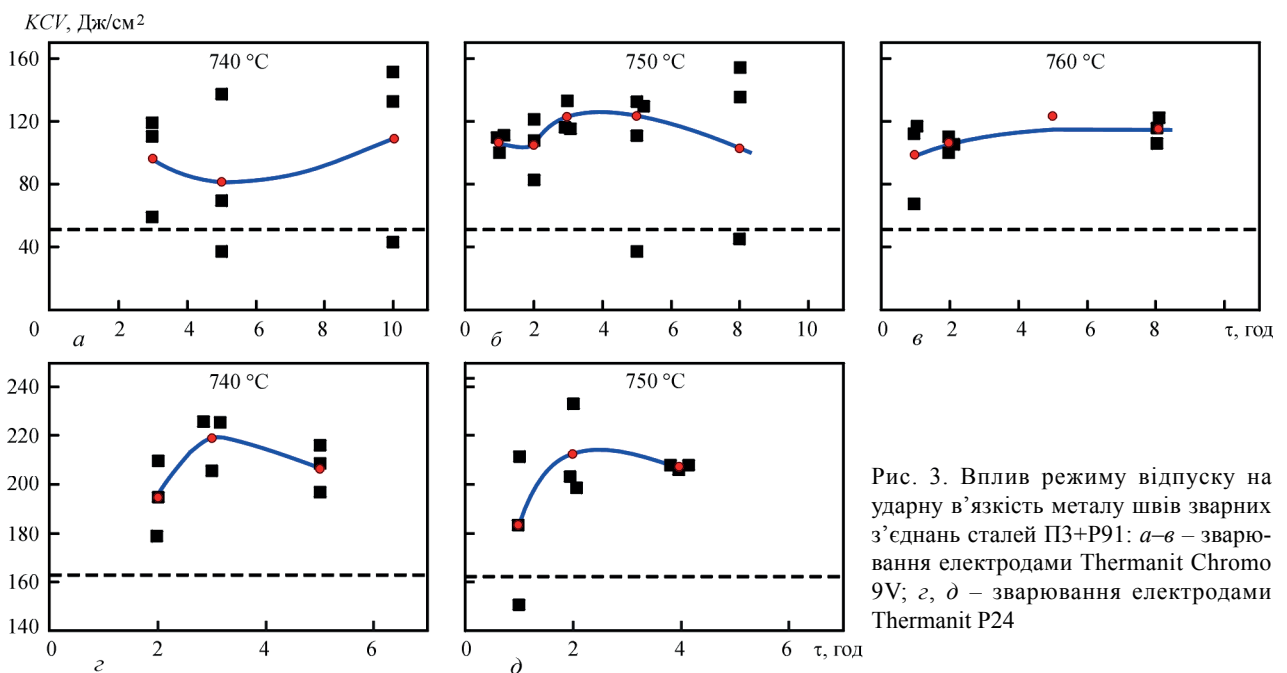


Рис. 3. Вплив режиму відпуску на ударну в'язкість металу швів зварних з'єднань сталей ПЗ+P91: а–в – зварювання електродами Thermanit Chromo 9V; з, д – зварювання електродами Thermanit P24

значених умовах ці з'єднання витримують менші критичні напруження, ніж з'єднання сталі ПЗ, тобто мартенситна складнолегована хромиста сталь має більш високу схильність до уповільненого руйнування, ніж сталь ПЗ. Враховуючи цей факт, при отриманні комбінованих з'єднань обох сталей слід застосовувати термічний режим, який зменшує ризик появи тріщин саме при зварюванні хромистої сталі. Як видно з результатів випробувань Implant (рис. 1, б), це може бути підігрів до 200...250 °С.

Оскільки випробування Implant дозволяють навантажувати зварні з'єднання до напружень, які можуть не відповідати напруженням в реальних з'єднаннях і значно їх перевищувати, проведено перевірку стійкості проти уповільненого руйнування з використанням технологічних проб – стикових з'єднань Tekken. Для кожного термічного режиму застосовували по два комбінованих з'єднання сталей P91+ПЗ, в яких кожна сталь мала один та два скоси кромки (враховуючи асиметричну У-подібну конфігурацію кромки у стику). Після зварювання перед подальшим контролем з'єднання витримували не менше 24 год. Наявність тріщин визначали візуально при огляді поверхні стику та обстеженні на світловому мікроскопі поперечних темплетів, вирізаних зі з'єднання, прошліфованих і протравлених хімічним способом для виявлення макроструктури (рис. 2). Отримані дані наведено в табл. 3.

Узагальнюючи результати випробувань технологічної міцності, можна вважати достатнім підігрів і підтримання між проходами температури 175...250 °С. При зварюванні з'єднань великого перерізу і за умов інтенсивного тепловідведення температуру підігріву слід збільшувати (до 250...300 °С) для попередження її зменшення в зоні зварювання нижче зазначеного мінімального рівня.

При зварюванні гартівних сталей основним технологічним прийомом регулювання механічних властивостей, структурного і напруженого стану є відпуск. Однак ця операція стає проблемною при термічній обробці комбінованих з'єднань сталей з суттєвими відмінностями у легуванні, коли для кожної з них рекомендовано різні режими і особливо при відсутності співпадінь в інтервалах температур рекомендованого відпуску. У таких випадках технологія отримання з'єднань значно ускладнюється – необхідним стає викори-

стання металів проміжного складу (зварювального металу або вставок інших сталей) і термічна обробка у кілька етапів. Це питання буде розглянуто в окремій публікації.

За літературними і довідковими даними, відпуск сталі ПЗ можна проводити при 730...750 °С, сталі P91 – при 750...760 °С (згідно з [10] можливим є більш широкий діапазон – 740...780 °С). За рекомендаціями виробника електродів (Böhler Thyssen), найбільш сприятливими для металу швів типу Thermanit P24 є 740 °С і Thermanit Chromo 9V – 760 °С. Для всіх матеріалів у комбінованому з'єднанні інтервал близьких температур відпуску становить 740...750 °С.

Остаточний режим термічної обробки вимагав уточнення, враховуючи такі умови: 1) відпуск при більш високій температурі дає більшу гарантію отримання необхідних властивостей і за більш короткий час; 2) збільшення температури відпуску для металу з обмеженою максимальною температурою нагрівання може призвести до більшого його знеміцнення; 3) відома «інертність» швів типу P91 щодо зростання пластичності й ударної в'язкості вимагає застосування більш високих температур, відпуск при знижених температурах стримує вихід на необхідний рівень цих показників і може вимагати збільшення тривалості відпуску.

З цього приводу проведено дослідження впливу режимів термічної обробки на ударну в'язкість металу швів, твердість металу в зоні з'єднання і результативні механічні властивості. Враховуючи попередній досвід і літературні дані, відпуск проводили з різною витримкою при температурах 740, 750 і 760 °С, меншу температуру не використовували з причини можливого одержання незадовільних результатів для швів типу P91.

Першочерговою задачею було забезпечення роботи удару більш проблемних мартенситних хромистих швів не менше критеріального значення – 41 Дж ($KCV = 51 \text{ Дж/см}^2$). Враховували також вплив режиму відпуску на приближення твердості металу ЗТВ до початкової твердості основного металу, що було прийнято за приблизний критерій досягнення однорідності структурного стану і механічних властивостей металу навколошовної зони.

Отримані результати випробувань наведено на рис. 3–6. На рис. 3 штриховими лініями показано цільові рівні ударної в'язкості – регламенто-

Таблиця 3. Результати зварювання стикових комбінованих проб Tekken зі сталей ПЗ+P91

Температура підігріву T_n , °С	Шов (9 % Cr) Thermanit Chromo 9V	Шов (2,5 % Cr) Thermanit P24
	Наявність тріщин	
150	Є*	Нема
175	Нема	—»—
200	—»—	—»—

*Тріщина в шві.

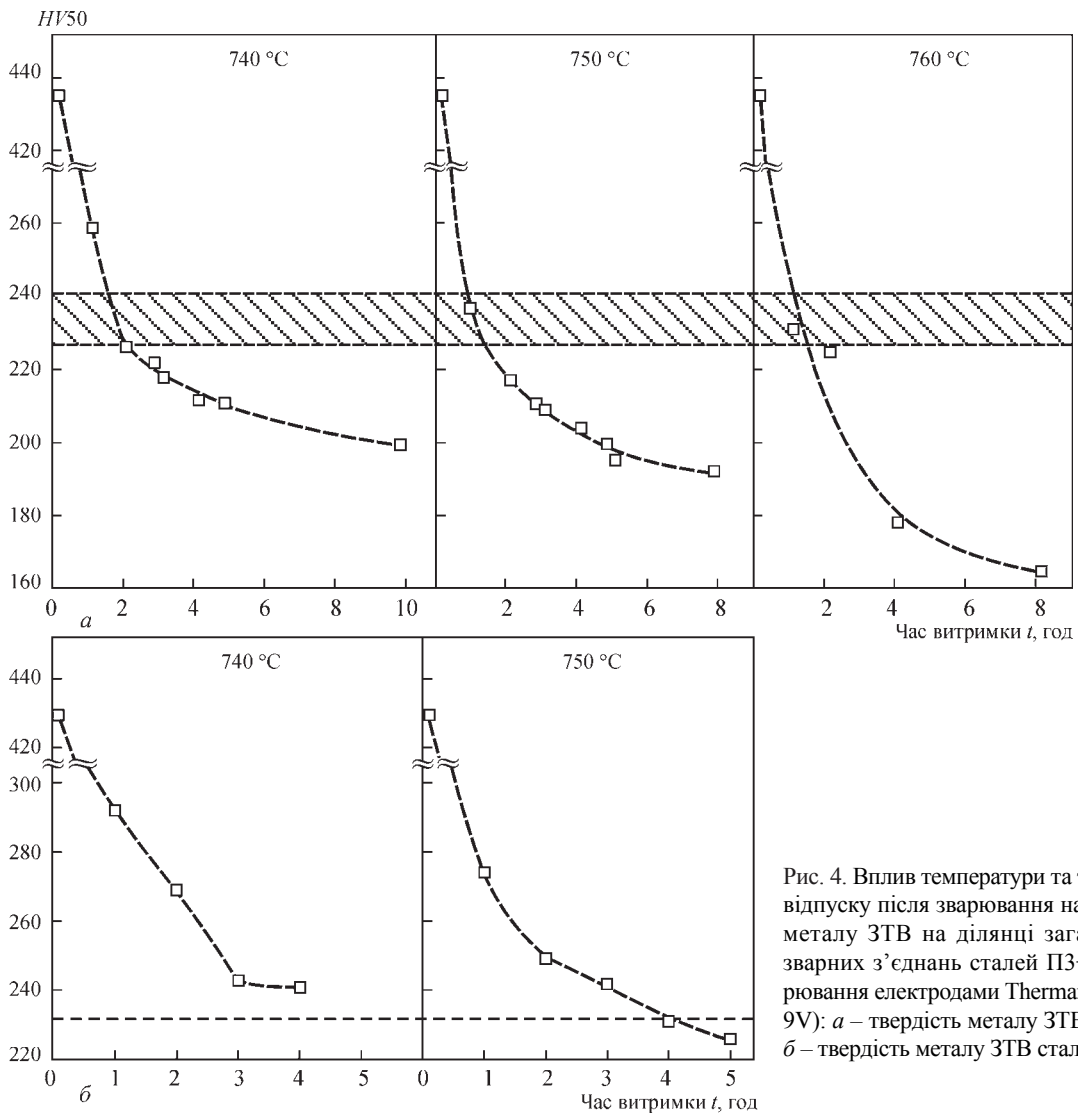


Рис. 4. Вплив температури та тривалості відпуску після зварювання на твердість металу ЗТВ на ділянці загартовування зварних з'єднань сталей ПЗ+Р91 (зварювання електродами Thermanit Chromo 9V): а – твердість металу ЗТВ сталі ПЗ; б – твердість металу ЗТВ сталі Р91

ваний мінімум для мартенситних швів з 9 % Cr (рис.3, а–в) і усереднений рівень, який, за даними виробника електродів, зазвичай забезпечують шви типу Р24 (рис. 4, з, д).

Виходячи з одержаних закономірностей, у зміні ударної в'язкості сприятливими режимами можна вважати:

1) для з'єднань, виконаних електродами Thermanit Chromo 9V:

- 740 °C, 2...3 год;
- 750 °C, 1...2 год;
- 760 °C, 1 год;

2) для з'єднань, виконаних електродами Thermanit P24:

- 740 °C, 2 год;
- 750 °C, 1 год.

Для зазначених режимів отримані середні значення KCV перевищують цільовий рівень для обох типів швів. Між тим для швів з 9 % Cr, оброблених при 740 °C, спостерігається підвищений розкид результатів випробувань і можливість зниження окремих значень KCV до мінімального рівня (див. рис. 3, а). Однак в цілому, враховуючи інформацію

про допустимість зниження роботи удару для хромистих швів до 27 Дж (або KCV до 34 Дж/см²) [11, 12], такі результати можна вважати прийнятними.

Як видно з рис. 4, 5, досліджувані сталі виявляють різну чутливість до відпускового нагрівання, що простежується за характером зміни твердості загартованого металу ЗТВ. Так, в сталі ПЗ при всіх температурах твердість різко падає і досягає рівня основного металу (240...225 HV) приблизно за 1...1,5 год. При мінімальній температурі (740 °C) витримка більше 3...4 год веде до помітного зменшення твердості нижче цього рівня. Більш суттєве зменшення відбувається з переходом до відпуску при 750 і 760 °C, починаючи з витримки більше 2 год. Загартовані ділянки в сталі Р91 відпускаються менш інтенсивно. При використаних режимах твердість поступово знижується до рівня, близького до початкової твердості основного металу (233 HV), залишаючись дещо більшою, як видно з даних, отриманих при 740 °C. Суттєвого зменшення після тривалих витримок (4...5 год) при більш високих температурах (750, 760 °C) не зафіксовано. Характер зміни

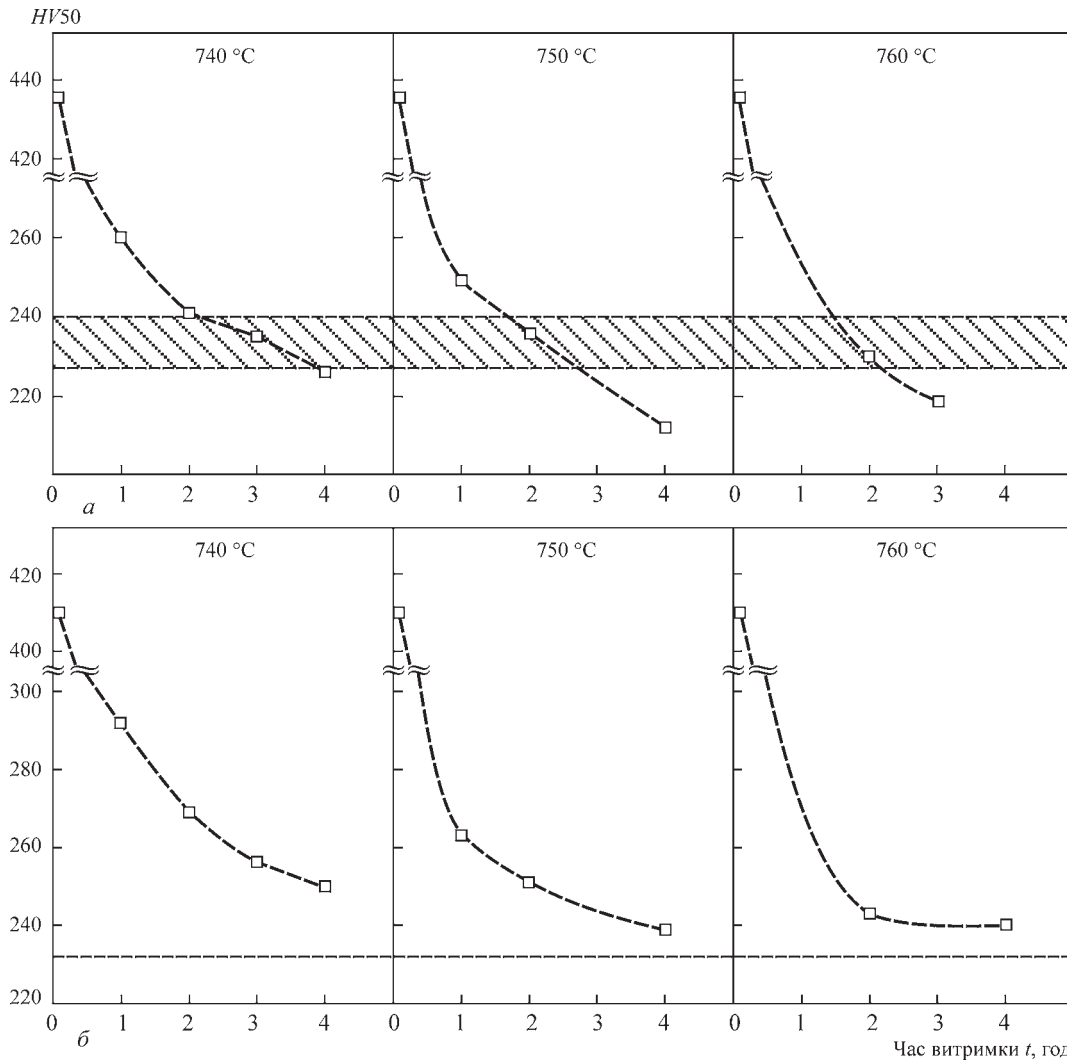


Рис. 5. Вплив температури та тривалості відпуску після зварювання на твердість металу ЗТВ на ділянці загартування зварних з'єднань сталей ПЗ+Р91 (зварювання електродами Thermanit P24): а – твердість металу ЗТВ сталі ПЗ; б – твердість металу ЗТВ сталі Р91

твердості металу швів при різних режимах, близький до зміни твердості металу ЗТВ (рис. 6).

Слід зазначити, що практика відпуску зварних з'єднань окремих теплостійких гартівних сталей передбачає використання температур на 20...40 °С нижчих за температуру відпуску сталі при її вироб-

ництві. Метою цього заходу є запобігання додаткових структурних змін і можливого зниження початкових міцнісних характеристик основного металу. За таких умов твердість металу ЗТВ буде більш високою, ніж у сталі в стані постачання. Крім того, згідно зі стандартом ДСТУ EN ISO 15614-1 твер-

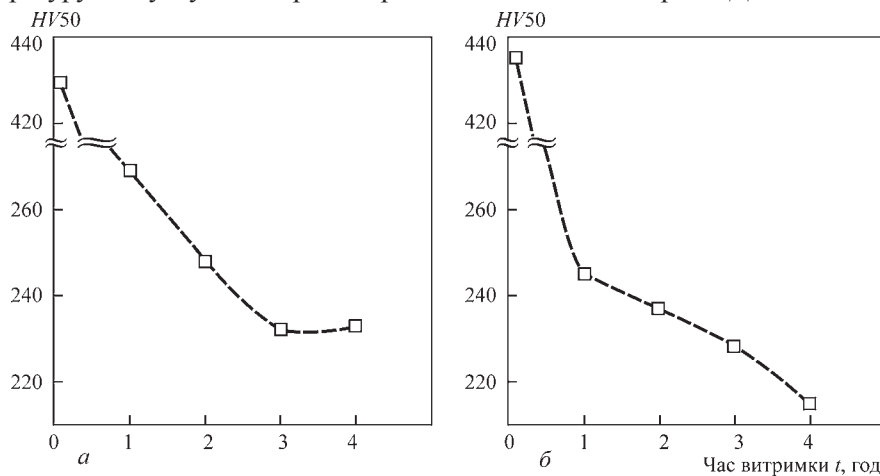


Рис. 6. Вплив тривалості відпуску при 740 °С на твердість металу швів зварних з'єднань сталей ПЗ+Р91, зварених різними електродами: а – електроди Thermanit Chromo 9V з 9 % Cr; б – електроди Thermanit P24 з 2,25 Cr %

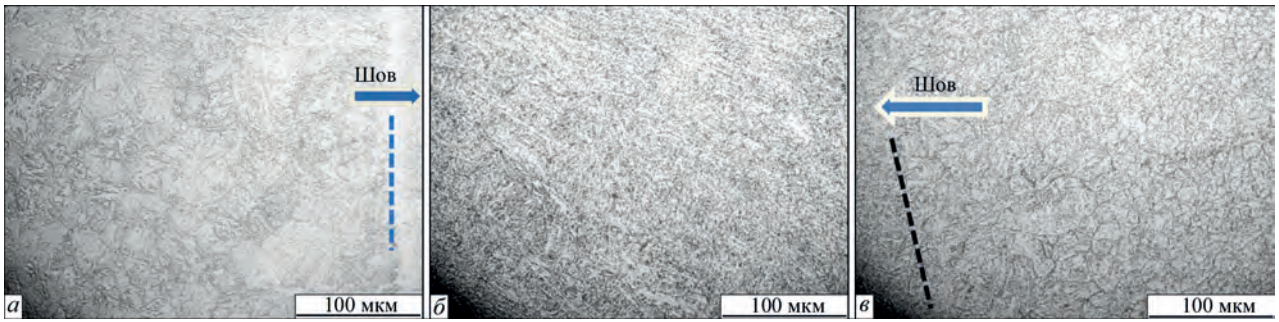


Рис. 7. Мікроструктура з'єднання, звареного електродами Thermanit Chromo 9V: а – ЗТВ і ділянка сплавлення ПЗ/шов; б – метал шва; в – метал ЗТВ і ділянка сплавлення Р91/шов

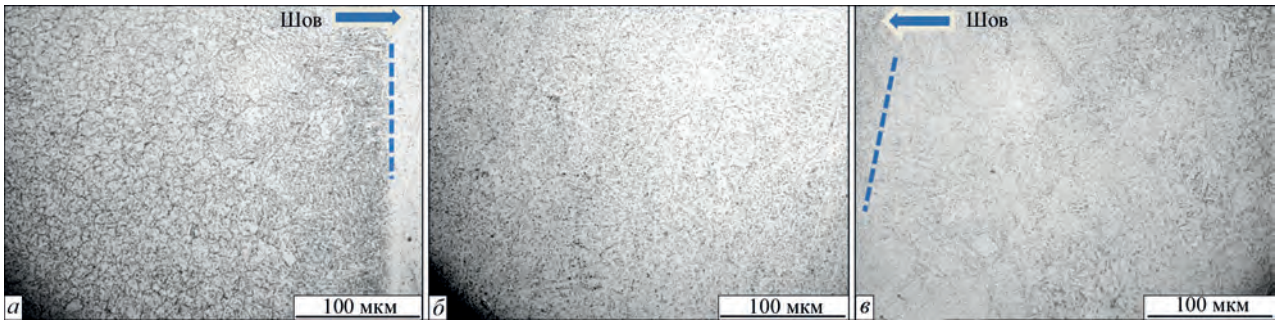


Рис. 8. Мікроструктура з'єднання (×400), звареного електродами Thermanit P24: а – ЗТВ і ділянка сплавлення Р91/шов; б – метал шва; в – метал ЗТВ і ділянка сплавлення шов ПЗ/шов

дість металу зварних з'єднань мартенситних хромистих сталей не повинна перевищувати 350 HV. Тобто більш високу твердість металу ЗТВ збоку сталі Р91, що спостерігається при зниженій температурі відпуску (як при 740 °С), не слід вважати бракувальною характеристикою.

З урахуванням умов забезпечення необхідного рівня ударної в'язкості швів, обмеження перегріву основного металу і металу в зоні зварного з'єднання обрано такі режими відпуску комбінованого сполучення ПЗ+Р91: при зварюванні електродами Thermanit Chromo 9V – 740 °С, 3 год, електродами Thermanit P24V – 740 °С, 2 год.

Перевірка визначених технологічних заходів полягала в оцінці якості й механічних властивос-

тей контрольних стикових з'єднань, одержаних із застосуванням обох типів обраних електродів. Зварювання виконували з попереднім підігрівом

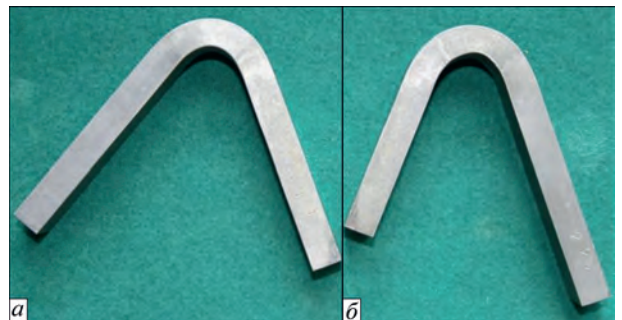


Рис. 9. Зразки зварних з'єднань після випробувань на статичний згин при 20 °С: а – шов Thermanit Chromo 9V; б – шов Thermanit P24

Таблиця. 4. Механічні властивості комбінованих зварних з'єднань

Марка електрода	T _{випр} , °С	Метал шва*					Зварне з'єднання		
		σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	δ, %	Ψ, %	KCV, Дж/см ²	σ _в , МПа	Місце руйнування	
Thermanit Chromo 9V	20	601,0	729,0	20,0	64,8	110,1	617,4	Метал ЗТВ ПЗ	
		602,5 (601,8)**	725,3 (727,2)	17,0 (18,5)	40,2* (64,8)	119,7 59,1 (96,3)			613,7 (615,6)
Thermanit Chromo 9V	570	376,9	407,9	20,3	79,8	–	353,6	Метал ЗТВ Р91	
		345,9 (361,4)	394,0 (401,0)	24,7 (22,5)	82,7 (81,3)	–	366,9 (360,3)	Метал ЗТВ Р91	
Thermanit P24	20	621,7	714,7	21,0	67,6	178,9	666,0	Метал ЗТВ ПЗ	
		618,5 (620,1)	718,6 (716,7)	19,7 (20,4)	69,7 (68,7)	209,0 193,8 (193,9)			669,5 (667,8)
Thermanit P24	570	409,9	447,5	19,3	79,8	–	396,2	Метал ЗТВ Р91	
		411,2 (410,6)	454,4 (451,0)	21,7 (20,5)	81,2 (80,5)	–	383,7 (390,0)	Метал ЗТВ Р91	

*Розрив у края робочої зони.

**В дужках наведено середнє значення.

Таблиця 5. Результати випробувань на тривалу міцність композитних зварних з'єднань сталей ПЗ+Р91

Тип зразка	Межа тривалої міцності (МПа) та місце руйнування				
	за 10 ³ год	Місце руйнування	за 10 ⁴ год	Місце руйнування	за 10 ⁵ год
Наплавлений метал Thermanit P24	193	-	147	-	112
Зварне з'єднання, шов Thermanit P24	147	Метал ЗТВ ПЗ	94	ЗТВ ПЗ	60
Наплавлений метал Thermanit Chromo 9V	209	-	187	-	167
Зварне з'єднання, шов Thermanit Chromo 9V	152	Метал ЗТВ ПЗ	87	ЗТВ ПЗ	50

200 °С і міжпрохідною температурою до 230 °С, відпуск – за означеними вище режимами. Якість оцінювали візуально і металографічним обстеженням поперечних мікрошліфів. Результати візуального контролю і металографічного аналізу підтвердили відсутність тріщин у зварних з'єднаннях. Пор, шлакових включень, несплавлень не виявлено (рис. 7, 8). В стані після відпуску шви обох типів мали твердість на рівні 230 HV.

Механічні властивості швів і зварних з'єднань після короткочасних випробувань на розтягування і ударний згин наведено в табл. 4. Випробування поперечних зразків на розтягування показали, що при кімнатній і робочій температурах міцність швів була вище міцності основного металу – всі зразки були зруйновані по металу ЗТВ. При статичному згині на кут 120° (рис. 9) дефекти у з'єднаннях не виникали.

Для максимальної температури експлуатації (570 °С) одержано значення межі тривалої міцності металу швів і зварних з'єднань шляхом прямих випробувань для періодів у 10³ і 10⁴ год і методом апроксимації – для 10⁵ год (табл. 5). У всіх випадках випробувань поперечних зразків зі зварних з'єднань руйнування відбувалось у металі ЗТВ низьколегованої сталі ПЗ. Метал швів мав значно вищий опір тривалому руйнуванню, ніж основний метал.

Висновки

1. Показано, що запобігання уповільненому руйнуванню комбінованих з'єднань сталей ПЗ+Р91 при зварюванні електродами Thermanit Chromo 9V або Thermanit P24 може бути досягнене при попередньому підігріві не нижче 175 °С.

2. На основі проведених досліджень рекомендовано такі режими високого відпуску залежно від застосованого типу зварювальних електродів: 740 °С, 3 год (електроди Thermanit Chromo 9V) і 740 °С, 2 год (електроди Thermanit P24).

3. Зварюванням контрольних комбінованих з'єднань підтверджено, що використання запропонованих термічних режимів зварювання і високого відпуску забезпечує відсутність холодних тріщин, відносно однорідну структуру відпуску з твердістю 220...240 HV попередньо загартованих ділянок з'єднань, високу ударну в'язкість металу швів (у середньому 98 Дж/см² для швів Thermanit Chromo 9V і 190 Дж/см² для швів Thermanit P24) і їхню більш високу короткочасну (при 20 °С) і тривалу міцність (при 570 °С), ніж у основного металу.

4. Розроблений процес зварювання прийнято АТ «Укренергомашина» для практичного застосування.

Список літератури

1. Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку (2016). 12-та Міжнародна науково-практична конференція. Збірка наукових праць. Київ.
2. Teslenko O.I., Gorskyi V.V., Maliarenko O.Ye. (2020) Аналіз тенденцій та напрямів розвитку теплової енергетики в Україні. *The problems of general energy*, 1, 60 38–46.
3. Liratzis, T., Forno, M., Piombino, C. et al. (2010) Acciai martensitici al 9Cr–1Mo–Nb–V: proprietà, soldabilità e controlli. *Riv. Ital. Saldatura*, 2, Marzo/Aprile, 161–168.
4. Ahmet Shibli (2014) *Coal Power Plant Materials and life Assesment. Developments and Applications*. Woodhead Publishing.
5. Козлов Р.А. (1986) *Сварка теплоустойчивых сталей*. Ленинград, Машиностроение.
6. Sawhill, J.M., Dix, A.W., Sawage, W.F. (1974) Modifild Implant Test for Studying Delayed Cracking. *Weld. J.*, 35, 12, 554–560.
7. Гривняк И. (1984) *Свариваемость сталей*. Москва, Машиностроение.
8. Skulsky, V.Yu., Strizhius, G.H., Nimko, M.A. et al. (2019) Delayed fracture resistance of welded joints of rotor steel 25Kh2NVFA after welding reheating. *The Paton Welding J.*, 2, 7–12.
9. Brózda, J. (2004) Stale zarowitrymale nowej generacji, ich spawalność i własności złączny spawanych. Część IV. *Stal E911. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 4, 49–54.
10. *Технические данные* (1993) *Werkstoffblatt 435 R*. Ausgabe März. Mannesmannröhren-Werke AG, Düsseldorf.
11. Skulsky, V.Yu., Tsaryuk, A.K., Gavrik, A.R. et al. (2016) Selection of modes of high-temperature tempering of heat-resistant steel welded joints made by electrodes thermanit MTS616. *The Paton Welding J.*, 9, 47–50.
12. Мохила П., Фолдынова К. (2014) Влияние послесварочной термической обработки на механические свойства сварных соединений стали P92, выполненных дуговой сваркой под флюсом. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 4, 36–39.

References

1. (2016) Coal thermal power engineering: Ways of reconstruction and development. *In: Proc. of Int. Sci.-Pract. Conf. Kyiv*.
2. Teslenko, O.I., Gorskyi, V.V., Maliarenko, O.Ye. (2020) Analysis of tendencies and directions of development thermal power engineering. *The problems of general energy*, 1(60), 38–46 [in Ukrainian].
3. Liratzis, T., Forno, M., Piombino, C. et al. (2010) Acciai martensitici al 9Cr–1Mo–Nb–V: proprietà, soldabilità e controlli. *Riv. Ital. Saldatura*, 2, Marzo/Aprile, 161–168.
4. Ahmet Shibli (2014) *Coal Power Plant Materials and life Assesment. Developments and Applications*. Woodhead Publishing.
5. Kozlov, R.A. (1986) *Welding of heat-resistant steels*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
6. Sawhill, J.M., Dix, A.W., Sawage, W.F. (1974) Modifild implant test for studying delayed cracking. *Weld. J.*, 35, 12, 554–560.
7. Hrivnak, I. (1984) *Weldability of steels*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

8. Skulsky, V.Yu., Strizhius, G.H., Nimko, M.A. et al. (2019) Delayed fracture resistance of welded joints of rotor steel 25Kh2NVFA after welding reheating. *The Paton Welding J.*, **2**, 7–12.
9. Brózda, J. (2004) Stale żarowitrymale nowej generacji, ich spawalność i własności złączny spawanych. Część IV. Stal E911. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **4**, 49–54.
10. (1993) *Specification*. Werkstoffblatt 435 R. Ausgabe März. Mannesmannröhren-Werke AG, Düsseldorf.
11. Skulsky, V.Yu., Tsaryuk, A.K., Gavrik, A.R. et al. (2016) Selection of modes of high-temperature tempering of heat-resistant steel welded joints made by electrodes Thermanit MTS616. *The Paton Welding J.*, **9**, 47–50.
12. Mokhila, P., Foldynova, K. (2014) Effect of postweld heat treatment on mechanical properties of R92 steel welded joints performed by submerged-arc welding. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **4**, 36–39 [in Russian].

PECULIARITIES OF WELDING JOINTS OF 15KH2M2FBS (P3) AND X10CrMoVNb91 (P91) STEELS

V.Yu. Skulskyi¹, M.O. Nimko¹, A.R. Gavryk¹, I.G. Osypenko¹, O.V. Vavilov², O.G. Kantor², L.P. Rubashka²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²JSC «Ukrenergymachines». 199 Heroyiv Kharkova Ave., 61037, Kharkiv. E-mail: office@ukrenergymachines.com

Within the framework of currently urgent problem of reconstruction and restoration of equipment of thermal power units of TPP, work has been performed on development of basic technology of welding body elements of a steam turbine from low-alloyed 15Kh2M2FBS (P3) steel to branchpipes from high-chromium martensitic X10CrMoVNb91 steel with 9 % Cr (P91). The paper gives the results of determination of the thermal mode of welding such combined joints to prevent delayed fracture. Proceeding from study of the influence of different modes of high-temperature tempering on impact toughness of weld metal and hardness of welded joint areas hardened during welding, heat treatment modes were selected, depending on electrode material type. It is shown that the resultant mechanical properties of welded joints correspond to the requirements specified during work performance. 12 Ref., 5 Tabl., 9 Fig.

Keywords: heat-resistant steels, low-alloy steel, high-chromium martensitic steel, combined welded joints, cold cracks, high-temperature tempering, mechanical properties

Надійшла до редакції 05.02.2022

РОЗРОБЛЕНО В УКРАЇНІ

Електронно-променевий 3D-друк металевим дротом

Металевий 3D-друк дозволяє більше не вибирати між високою точністю, структурою металу без дефектів і високою продуктивністю. Нові запатентовані рішення засновані на ексклюзивній здатності газорозрядної електронно-променевої гармати генерувати порожнистий конічний електронний промінь, забезпечуючи унікальні фізичні умови для точно контрольованого осадження металу та формування необхідної металевої структури у виготовленій металевій деталі. 3D-друк має набір технічних, технологічних і комерційних переваг, які допомагають йому вирізнятися з-поміж будь-яких інших у адитивному виробництві (більш детально про технологію 3D-друку можна прочитати в журналі «Автоматичне зварювання» №9, 2022).

<https://xbeam3d.com/>

