

МАЛОГАБАРИТНА ТЕХНОЛОГІЧНА ПРОБА ДЛЯ ОЦІНКИ СХИЛЬНОСТІ МЕТАЛУ ШВІВ ДО УТВОРЕННЯ ХОЛОДНИХ ТРІЩИН

Л.С. Захаров, А.Р. Гаврик

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: leza45@gmail.com

Розроблено новий тест на зварюваність, який дозволяє експериментально визначити критичну температуру попереднього підігріву, необхідну для запобігання утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Нова геометрія зварного блоку дозволяє поєднати згинальні напруження з нормальними поперечними та поздовжніми, що підвищує жорсткість випробування. Конструкція запропонованої проби має меншу металомісткість і дозволяє неодноразове її використання. Із застосуванням нового тесту досліджено зварюваність гартівних сталей з різним ступенем легування. Результати випробувань узгоджуються з результатами, отриманими в інших дослідженнях зварюваності сталей, і рекомендовані для умов виробництва. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: зварні з'єднання, холодні тріщини, зварювальні тести

Вступ. Найнебезпечнішим дефектом зварних з'єднань є холодні тріщини, що мають місце при зварюванні гартівних сталей. Їх утворення є наслідком дії комплексу факторів, в яких одними із головних є структурні напруження, що виникають у результаті мартенситного чи бейнітного перетворення, і наявність водню в металі. Появи холодних тріщин може також сприяти утворення сегрегаційних прошарків, неметалевих включень і т.п.

На процес утворення холодних тріщин суттєво впливають режими зварювання, оскільки від режиму зварювання залежить ширина зони термічного впливу (ЗТВ), швидкість охолодження шва і ЗТВ, рівень післязварювальних напружень. Для оцінки схильності металу зварного з'єднання до утворення холодних тріщин використовують різноманітні технологічні проби. Такі технологічні проби мають переваги перед повномасштабними випробуваннями зварних конструкцій, насамперед, за рахунок меншої металоємності та вартості [1]. Дослідження з розробки методів оцінки схильності зварних швів до холодного розтріскування розпочалися ще в тридцятих роках минулого століття та тривають донині [2–6].

Технологічні проби відрізняються конструкціями, розмірами, умовами і технологією зварювання, способом виявлення наявності чи відсутності тріщин, показниками стійкості проти тріщин. Кожна проба передбачає інтенсивний розвиток одного або декількох факторів, що обумовлюють утворення холодних тріщин. Такими факторами можуть бути: концентрація водню; прискорене охолодження з метою підвищення ступеня

загартування; підвищений рівень напружень. Проблеми різних конструкцій мають різну ефективність оцінки схильності матеріалів до утворення холодних тріщин.

У світовій практиці досліджень зварюваності сталей і сплавів відома велика кількість проб для оцінки їх схильності до утворення холодних тріщин [7]. Більшість тестів, як і методів розрахункової оцінки опору холодним тріщинам, були розроблені та апробовані на класичних високомісних низьколегованих сталях. Однак останнім часом все ширше застосовуються високолеговані мартенситні сталі, які часто значно відрізняються за реакцією на навантаження, що виникають під час зварювання.

Основною особливістю високохромистих мартенситних сталей є те, що їх багатофазний склад перебуває на стику аустенітних, феритних і мартенситних структур. Це обумовлює значні труднощі їх зварювання, оскільки в залежності від температури та тривалості нагрівання та швидкості охолодження аустеніт і мартенсит можуть мати «гарні» та «погані» модифікації: рейковий або пластинчастий мартенсит; залишковий, реверсний або алотриоморфний і відманштеттовий аустеніт і т.д. У багатьох випадках при контролі на зварюваність необхідно застосовувати різні варіанти жорсткості тестів.

Наприклад, дослідження [8] вказує на те, що при тестуванні зварного шва модифікованої мартенситної сталі 9Cr-1Mo необхідна більша жорсткість, ніж у стандартних тестів. Навпаки, у разі мартенситно-аустенітного металу шва, який має

вищу пластичність, холодні тріщини спостерігаються при нижчій жорсткості з'єднання [9]. Аналогічну тенденцію показало застосування витратних зварювальних матеріалів Cr-Ni типу [10].

Випробування на холодні тріщини дають якісні (тріщина/відсутність тріщин) або кількісні результати (визначення параметрів випробувань для зварних швів без тріщин) для досліджуваних комбінацій базового матеріалу, присадкового матеріалу та параметрів зварювання. Крім зазначених критеріїв, важливо брати до уваги трудомісткість механічної підготовки заготовок для проб, металомісткість і можливість їх подальшого використання. Розроблено багато різних методів випробувань для визначення потенційного ризику появи тріщин шляхом створення особливих умов закріплення зварного шва, як наведено в численних оглядах з цього питання [11].

Основна частина лабораторних випробувань складається з тієї чи іншої окремої форми кутового або стикового зварного шва, підвищення жорсткості яких забезпечується або жорсткістю самих випробувальних зразків, або за допомогою анкерних швів, болтів, кондукторів та інших утримуючих пристосувань або їх поєднанням [12]. У той же час встановлено [13], що для достовірної оцінки впливу тих чи інших факторів на утворення тріщин у зварних з'єднаннях та вибір оптимальної процедури зварювання конструкцій у процесі виробництва, при тестуванні має бути додана інтенсивність обмеження при згинанні. Однак наявність лабораторних проб, які максимально відповідають вірогідності появи холодних тріщин завдяки тому, що шви одночасно піддаються не тільки розтягуванню, алей згину, дуже обмежена.

Додаткове вимірювання згинальних напружень разом із нормальними поперечними та поздовж-

німи на тривимірному випробувальному стенді ВАРМ 2-MN [14] показало помітне підвищення згинального моменту за обмеженням кутової деформації, особливо в критичній кореневій зоні, із супутнім ризиком появи тріщин. Встановлено значення, які в декілька разів перевищують аналогічні параметри щільного тесту [15]. Це свідчить про те, що напруження вигину при зварюванні зростають і викликають вищі локальні залишкові напруження. На жаль, складна конструкція обмежує широке використання такої проби.

Достатньо інформативним є CJC-тест [16], в якому напружено-деформований стан з'єднань регулюється спеціальним пристроєм, що дозволяє поєднувати кутове напруження з поперечним (рис. 1). Суттєвою вадою цього тесту є велика металомісткість і необхідність застосування складного кондуктора.

Малогабаритним тестом, в якому при зварюванні фіксуються згинальні напруження, є тест WIC [1], який використовується при зварюванні трубопроводів із високоміцних сталей (рис. 2). Змінюючи висоту ребра жорсткості базової плити, можна моделювати високі інтенсивності вигину зварних швів. Інтенсивність обмеження в поперечному напрямку зварювання може бути змінена в залежності від довжини анкерних швів між зразком WIC і базовою плитою [7]. Як показала практика, тест є достатньо інформативним, однак слід зазначити високу металомісткість, суттєві витрати на монтаж блоку, складну фіксацію зазору між пластинами та одноразове використання блоку.

Мета роботи – розробити спрощену конструкцію проби для оцінки схильності металу швів до утворення холодних тріщин.

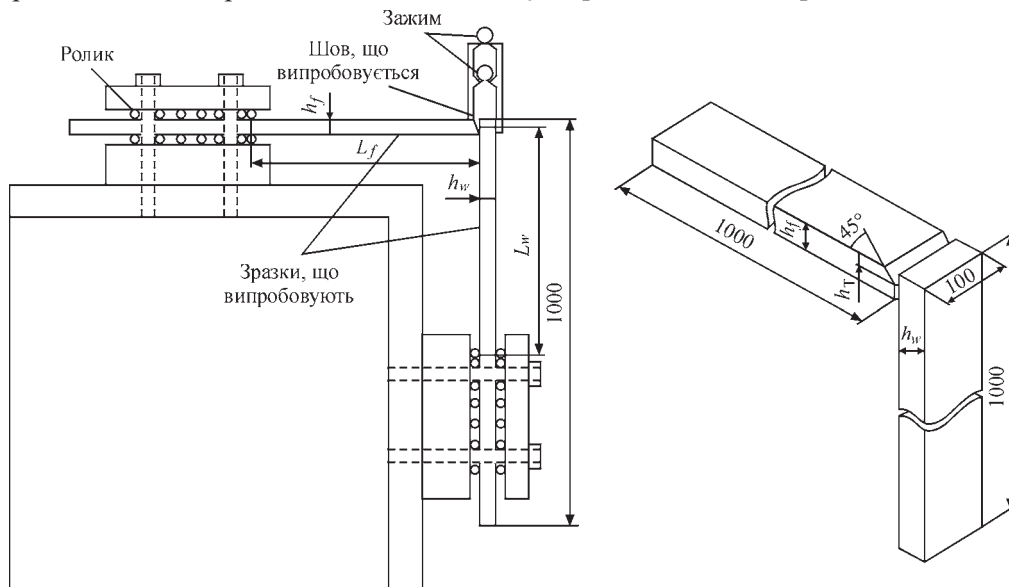


Рис. 1. Конструкція CJC-тесту

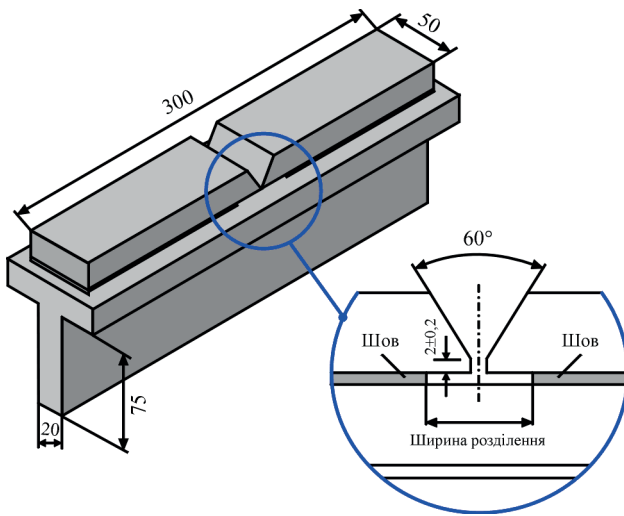


Рис. 2. Конструкція WIC-тесту

Розробка конструкції спрощеного технологічного тесту та його практичне застосування.

Нами проведено дослідження з розробки економічної малогабаритної технологічної проби на схильність зварного шва до утворення холодних тріщин. Для фіксації згинального моменту обидві пластини закріплені вертикально. Це дозволяє поєднати згинальні напруження з нормальними поперечними та поздовжніми. Тестові пластини завтовшки 20 мм фіксуються за допомогою анкерних болтів або кондуктора (рис. 3, 4). Пази для тестування розташовуються в торцях пластин (рис. 1, 2). Геометрія пазів може обиратися за потребою – *Y*, *V*, *U*-подібна та інші. Нами обрано *V*-подібне розроблення, оскільки тріщини в ЗТВ сучасних мартенситних сталей практично відсутні.

Зазвичай довжина контрольного шва в малогабаритних тестах обирається в межах 50...100 мм. Обрано довжину 85 мм, оскільки, як встановлено [17], у цьому випадку в зварному шві забезпечуються найвищі як поздовжні, так і поперечні залишкові напруження. Ширина щілини між пластинами фіксується вкладишем діаметром 2 мм на відстані від поверхні 15 мм (рис. 1). При необхідності жорсткість тесту можна регулювати за раху-

нок зміни відстані фіксуючого вкладиша від кореневої зони. При виготовленні тестового блоку на анкерних болтах розробку крайок можна робити по його периметру, що дозволяє використати один блок чотири рази. При застосуванні кондуктора (рис. 4) при фіксованій ширині тестових пластин можна необмежено збільшувати їх довжину, що також дає можливість багаторазового використання одного тестового блоку.

Конструкція тестового з'єднання дозволяє виключити необхідність складної обробки крайок, як, наприклад, у пробі Tekken, що особливо важливо при великій товщині зварювальних матеріалів. Крім того, значно спрощується вирізка темплетів для металографічного аналізу. При цьому метал зразків майже повністю зберігається для подальшого використання при багаторазових випробуваннях.

Вимоги до виготовлення зразків і процедури, які слід виконувати при використанні розробленого спрощеного технологічного тесту (СТТ), встановлено за рекомендаціями ДСТУ EN ISO 17642-2:2019 [18].

Тест застосовується переважно, але не виключно, для мартенситних легованих і високолегованих сталей при дуговому зварюванні покритими електродами та напівавтоматичному зварюванні в захисному газі суцільним і порошковим дротом. Пластини з'єднують болтами діаметром 12 мм. Крутний момент, що прикладається до болтів, 100 ± 5 Нм. Зварювання виконують у нижньому положенні, наявність тріщин у зразках контролюють візуально або з допомогою лупи при збільшенні $\times 2 \dots 4$. Також відсутність тріщин може бути підтверджена при обстеженні поперечних мікروشліфів за збільшенням приблизно $\times 100 \dots 200$.

На основі запропонованого тесту проведено експерименти з оцінки схильності до холодних тріщин зварних з'єднань мартенситних сталей 25X2MНФА, 15X5M та X10CrMoVNb91 (P91) завтовшки 20 мм. Зварювання виконували електрода-

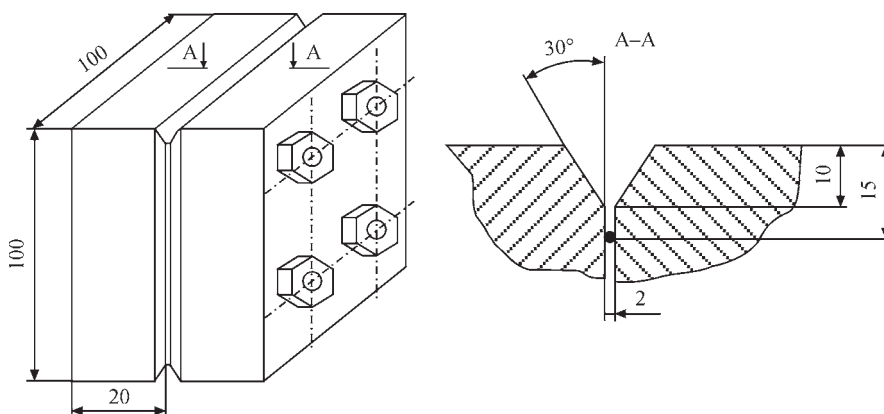


Рис. 3. Конструкція розробленої проби

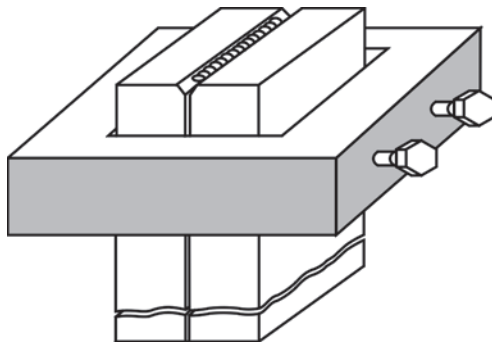


Рис. 4. Конструкція проби з кондуктором ми діаметром 3 мм. Хімічний склад матеріалів наведено в таблиці.

Зварювання виконували на постійному струмі зворотної полярності. Джерело зварювального струму – ВДУ-505. Струм зварювання – 100 А. Перед початком зварювання електроди прожарювали в печі при температурі 300 °С 2 години.

Попередній підігрів пластин перед зварюванням робили в муфельній електропечі типу СНОЛ. Хімічний склад застосованих матеріалів

Номер варіанту	Марка матеріалу	Масова доля елементів, %						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V/Nb
1	Сталь 25X2НМФА	0,24	0,17	0,50	2,20	1,50	0,50	0,2 V
	Електроди Therpanit P 24 (EZ CrMo2VNb B42H5)	0,11	0,24	0,62	2,52	–	0,98	0,24 V
2	Сталь 15X5М	0,11	0,4	0,6	4,8	0,6	0,34	–
	Електроди ЦЛ-17 (Е 10Х5МФ)	0,07	0,45	0,90	4,5	–	0,65	0,25 V
3	Сталь 10Х9МФБ (Р91)	0,10	0,3	0,6	8,9	0,63	0,85	0,06 Nb
	Електроди АНЛ-8 (Е9018-В9)	0,09	0,13	0,72	9,15	0,52	0,83	0,05 Nb

Далі блок переміщали на зварювальний стіл, а дві попередньо приварені хромель-алюмелеві термопари приєднували до пари приладів КСП-4, призначених для реєстрації температурно-часових діаграм. Зварювання починали при досягненні запланованої температури зразка. Тестові блоки зварювали без попереднього нагріву та з попереднім нагріванням з кроком 50 °С. Блоки, зварені без попереднього нагріву, повністю розтріскалися при тестуванні всіх трьох марок сталей (рис. 5).

Дослідження, проведені із застосуванням запропонованого тесту, показали, що в зварних з'єднаннях зварюваних сталей тріщини утворюються виключно в металі шва. Тріщини в ЗТВ відсутні при всіх параметрах тестування.

У залежності від марок сталей встановлено нижню критичну температуру попереднього нагріву для запобігання холодним тріщинам:

при зварюванні сталі 25X2НМФА – 150 °С;

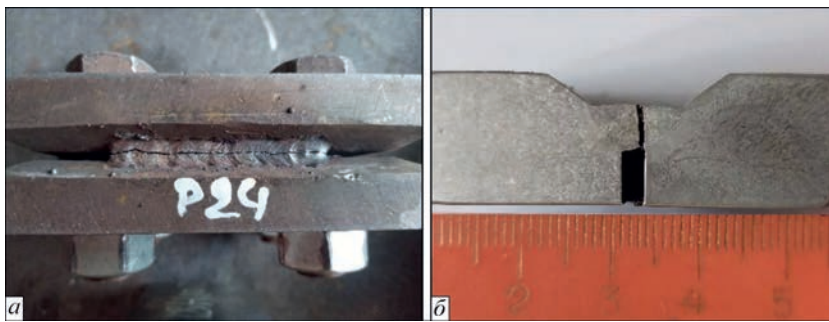


Рис. 5. Холодна тріщина у зразку при зварюванні без підігріву: вид зверху (а), поперечний переріз (б)

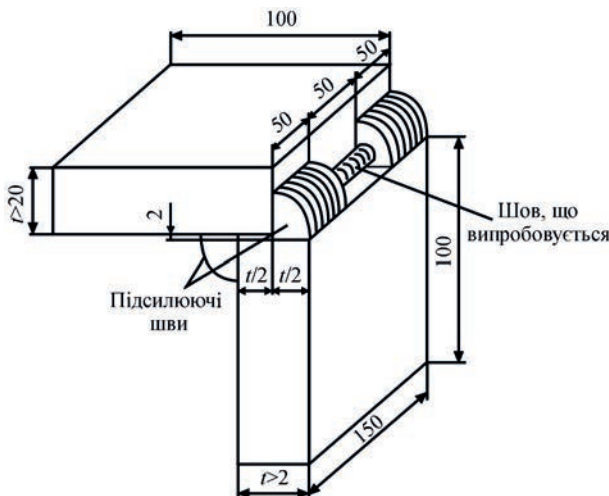


Рис. 6. Конструкція кутової проби



при зварюванні сталі 15X5M – 300 °С;
при зварюванні сталі Р 91 – 200 °С.

Критична температура попереднього підігріву, отримана при зварюванні сталі Р91, добре корелюється з результатом тестування цієї сталі тестом G-BOP (200°C) [19], який вважається найжорсткішим серед лабораторних тестів у дослідженнях. Там же відзначається, що при застосуванні тесту Tekken отримано нижчу критичну температуру –150°C. Аналогічні результати отримано в [20].

Для перевірки інформативності запропонованого тесту зробили напівмаштабне тестування підвищеної жорсткості. Пластини сталі Р91 завтовшки 45 мм зварювали під кутом 90° із зазором 2 мм (рис. 6). Це дозволило виключити необхідність складної обробки крайок, що особливо важливо при великій товщині зварюваних матеріалів. Крім того, значно спрощується вирізка швів і підготовка темплетів для металографічного аналізу, при цьому метал зразків майже повністю зберігається для подальшого використання.

Тестовий шов накладався після виконання анкерних швів із внутрішньої та зовнішніх сторін. Оцінка тріщиностійкості проводилася за критичною температурою попереднього підігріву. Проведене тестування показало, що тріщини в контрольному шві, як і при використанні запропонованої проби, відсутні при температурі підігріву 200°C.

Розглянуті підходи до випробувань схильності до холодних тріщин увійшли у дослідницьку практику, а отримані окремі результати використані при створенні технологічних процесів зварювання елементів котельного, турбінного, гідроенергетичного устаткування з гартівних бейнітних і мартенситних сталей.

Висновки

Запропоновано конструкцію малогабаритної спрощеної технологічної проби для випробування на схильність металу швів до холодних тріщин. Проба дозволяє поєднати згинальні напруження з нормальними поперечними та поздовжніми, що забезпечує високу жорсткість дослідних зварних з'єднань. Особливістю проби є мала металомісткість і можливість її неодноразового використання. Визначені за допомогою розробленого методу теплові умови зварювання гартівних теплостійких сталей з бейнітною та мартенситною структурою рекомендовано для виготовлення зварних вузлів енергетичного устаткування.

Список літератури/References

1. North, T.H., Rothwell, A.B., Glover, A.G., Pick, R.J. (1982) Weldability of High Strength Line Pipe Steels. *Welding J.*, 61(8), 243–257.
2. Swinden, T., Reeve, L. (1938) Metallurgical Aspects of the Welding of Low Alloy Structural Steels. *Trans. Inst. Welding*, 1, 7–18.
3. Leder, P.L.J. (1948) Factors Influencing the Weldability of High Tensile Alloy Steels, and a New Weld Cracking Test. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 159(1), 173–190.
4. Kurji, R., Coniglio, N., Griggs, J., Ghomashchi, R. (2017) Modified WIC test: an efficient and effective tool for evaluating pipeline girth weldability. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(4), 287–299. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1232674>
5. Schaupp, T., Schroeder, N., Schroepfer, D., Kannengiesser, T. (2021) Hydrogen-Assisted Cracking in GMA Welding of High-Strength Structural Steel – A New Look into This Issue at Narrow Groove. *Metals*, 11(6), 904. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11060904>
6. Bourgeois, D., Alexandrov, B. (2022) Hydrogen-Assisted Cracking Fracture Analysis using High-Speed Camera and Delayed Hydrogen Cracking Test. *J. of Failure Analysis and Prevention*, 22, 385–389. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01308-2>
7. Kannengiesser, T., Boellinghaus, T. (2013) Cold cracking tests – an overview of present technologies and applications. *Welding in the World*, 57(1), 3–37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-012-0001-7>
8. Karthikeyan, J., Varadharajan, R., Pitchaimuthu, K. (2015) Investigation of Hydrogen Assisted Crack in Welding by using Y-Groove Test. *International j. of engineering research and technology*, 4(10), IJERTV4IS100187. DOI: <https://dx.doi.org/10.17577/ijertv4is100187>
9. Kasuya, T., Hashiba, Y., Inoue, H., Nose, T., Ito, K., Enoki, M. (2012) Cold cracking susceptibility of austenitic and martensitic weld metals. *Welding in the World*, 56(9), 76–84. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321383>
10. Zenitani, S., Hayakawa, N., Yamamoto, J., Hiraoka, K., Morikage, Y., Kubo, T., Amano, K. (2007) Development of new low transformation temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(6), 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329307X213675>
11. Kurji, R., Coniglio, N. (2015) Towards the establishment of weldability test standards for hydrogen-assisted cold cracking. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12), 1581–1597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6555-3>
12. Макаров Э.Л. (1981) *Холодные трещины при сварке легированных сталей*. М., Машиностроение.
Makarov, E.L. (1981) Cold cracks in welding of alloyed steels. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
13. Masubuchi, K., Ich, N.T. (1970) Computer analysis of degree of constraint of practical butt joints. *Welding J.*, 49(4), 166.
14. Lausch, T., Kannengiesser, T., Schmitz-Niederer, M. (2013) Multi-axial load analysis of thick-walled component welds made of 13CrMoV9-10. *J. of materials processing technology*, 213(7), 1234–1240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.008>
15. Schroepfer, D., Kromm, A., Kannengiesser, T. (2017) Optimization of welding loads with narrow groove and application of modified spray arc process. *Welding in the World*, 61, 1077–1087. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0484-3>
16. Ueda, Y., Nishimura, I., Iiyama, H., Chiba, N. (1977) Effects of intensity of bending restraint on lamellar tearing and root cracking in corner joint. *J. of the Japan welding society*, 46(7), 408–415. DOI: https://doi.org/10.2207/qjws1943.46.7_408
17. Sun, J., Hensel, J., Nitschke-Pagel, T., Dilger, K. (2019) Influence of restraint conditions on welding residual stresses in H-type cracking test specimens. *Materials*, 12(17), 2700. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12172700>
18. ДСТУ EN ISO 17642-2:2019. Испытания разрушительные сварных соединений металлических материалов. Испытания на устойчивость к образованию холодных трещин в сварных соединениях. Дуговая сварка. Часть 2. Испытания на самозакрепленных образцах (EN ISO 17642-2:2005, IDT; ISO 17642-2:2005, IDT)

- EN ISO 17642-2:2005 Destructive tests on welds in metallic materials Cold cracking tests for weldments Arc welding processes Part 2: Self-restraint tests (ISO 17642-2:2005)
19. Chakraborty, G., Rejeesh, R., Ramana, O.V., Albert, S.K. (2020) Evaluation of hydrogen-assisted cracking susceptibility in modified 9cr-1mo steel welds. *Welding in the World*, **64**, 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00812-2>
20. Albert, S.K., Ramasubbu, V., Sundar Raj, S.I., Bhaduri, A.A. (2011) Hydrogen-assisted cracking susceptibility of modified 9Cr-1 Mo steel and its weld metal. *Welding in the World*, **55**, 66–74. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321309>

DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED PROCESS TEST FOR THE EVALUATION OF COLD CRACK FORMATION IN WELDED JOINTS

L.S. Zakharov, A.R. Havryk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: leza45@gmail.com

A new weldability test has been developed that allows us to experimentally determine the critical preheating temperature required to prevent cold cracks in welded joints. The new geometry of the welded block allows combining bending stresses with normal transverse and longitudinal stresses, which increases the rigidity of the test. The design of the proposed test has a lower metal consumption and allows for its repeated use. The weldability of hardenable steels with different degrees of alloying was studied using the new test. The test results are consistent with those obtained in other studies of steel weldability and are recommended for production conditions. 20 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: welded joints, cold cracks, welding tests

Отримано 01.01.2024

Отримано у переглянутому вигляді 04.12.2024

Прийнято 13.01.2025

ЕНДОСКОП З ПІДСВІЧУВАННЯМ USB/micro USB/Type-C для смартфона 2 м (X00755)



Ендоскоп — пристрій, за допомогою якого ви зможете проникнути всередину та переглянути дрібні елементи у важкодоступних місцях: труби, механізми, кабелі, плати. Такий інструмент знадобиться у роботі з сантехнікою, електрикою та для ремонту побутової техніки.

Камера ендоскопа показує зображення на 70°. Додатково біля камери заходиться ліхтар, який полегшує процес роботи з темними та глибокими механізмами. За допомогою пульта на кабелі ви регулюєте промінь та яскравість світла.

Ендоскоп має три види перехідників. Під'єднати ендоскоп можливо до будь-якого пристрою: телефона, комп'ютера чи планшета. Завдяки тому, що кабель інструмента має змінний перехідник, його можна використовувати з USB, TYPE-C та IMac девайсами.

Щоби під'єднати пристрій до телефона, оберіть потрібний перехідник та під'єднайте до вашого смартфона. Далі підтвердіть з'єднання через вікно, що з'явиться на екрані. У результаті відкриється додаток «Камера» або одна зі спеціальних програм.

Формат фото – jpeg, формат відео – avi, матеріал – метал, водостійкий, розмір – 2 м × 5,5 мм, колір – чорний.

