

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.927

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226126

До 50-річчя галузевої лабораторії наплавлення

© Лещинський Л.К.¹, Матвієнко В.М.², Іванов В.П.³, Степнов К.К.⁴,
Возьянов Е.І.⁵, Карауланов О.В.⁶

ТЕХНОЛОГІЯ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ВАЛКІВ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ КОМПОЗИЦІЯМИ ПІДВИЩЕНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ

Наведено результати аналізу шляхів підвищення тріщиностійкості наплавлених композицій при зміцненні валків гарячої прокатки. Показано, що запобігти утворенню кільцевих магістральних тріщин дозволяє технологія формування шарів з швів з непрямої траєкторією укладання (зигзагоподібних або синусоїдальних) і асиметричною зміною траєкторії в кожному наступному шарі. При поширенні тріщин в таких швах відбувається їх взаємне перетинання з подальшим галуженням і уповільненням. Разом з тим, періодична зміна траєкторії швів супроводжується розорієнтацією кристалічної структури, що сприяє уповільненню тріщини. Підвищити опір розтріскуванню дозволяє зміна напрямку наплавлення, а отже напрямку росту дендритів в металі суміжних шарів багатошарової композиції, що наплавляється на валки гарячої прокатки. Показано, що при такій зміні, з метою зменшення ймовірності утворення дефектів в першому шарі (підшару), наплавлення здійснюється по гвинтовій лінії з максимально можливим кроком, при якому забезпечується надійне перекриття суміжних швів. У поєднанні з гальмуванням на межі однорідних, тим більше різнорідних швів змінного складу, така технологія наплавлення забезпечує підвищення тріщиностійкості композиції. Показано, що такі різнорідні багатошарові композиції характеризуються підвищеним значенням ударної в'язкості і коефіцієнту інтенсивності напружень. Для реалізації узгодженої зміни вектора швидкості наплавлення і змінного хімічного складу швів розроблена і освоєна модернізована система управління установкою для наплавлення валків.

Ключові слова: валки гарячої прокатки, наплавлення, вектор швидкості, непрямої лінійність, багатошаровість, змінний хімічний склад швів, різнорідність, система управління траєкторією, межі швів, гальмування тріщини, ударна в'язкість, коефіцієнт інтенсивності напружень.

L.K. Leshchinskiy, V.M. Matvienko, V.P. Ivanov, K.K. Stepnov, E.I. Vozyanov, O.V. Karaulanov. Technology and equipment for hot rolls surfacing with increased crack resistance compositions. The results of the analysis of ways to increase the crack resistance of deposited compositions at hardening of hot rolling rolls are presented. It has been shown that the technology of forming layers from seams with a non-straight laying (zigzag or sinusoidal) and an asymmetric change in the path in each subsequent layer makes it possible to prevent the formation of circular main cracks. With the propagation of cracks in such seams, their mutual intersection occurs, followed by branching and slowing

¹ д-р техн. наук, професор, Бостон, США

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, matviyenkovn@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁴ інженер, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁵ головний зварювальник, ПРАТ «МК «Азовсталь», м. Маріуполь

⁶ головний зварювальник, ООО «МЕТИНВЕСТ-МРМЗ», м. Маріуполь

down. Along with it, the periodic change in the trajectory of the welds is accompanied by a disorientation of the crystal structure, which helps to slow down the crack. Changing the direction of surfacing, and hence the direction of dendrite growth, in the metal of adjacent layers of a multilayer composition being deposited on hot rolling rolls, makes it possible to increase the resistance to cracking. It has been shown that with such a change, in order to reduce the possibility of defect formation in the first layer (sublayer), surfacing is carried out along a helical line with the maximum possible pitch, thus ensuring reliable overlap of adjacent seams. In combination with braking at the boundaries of homogeneous, especially dissimilar welds of variable composition, this surfacing technology provides an increase in the fracture toughness of the composition. It has been shown that such heterogeneous multi-layer compositions are characterized by increased impact toughness and stress intensity factor. To implement the coordinated change in the velocity vector of surfacing and variable chemical composition of the welds, a modernized control system for the installation for surfacing rolls has been developed and mastered.

Keywords: hot rolling rolls, surfacing, velocity vector, non-straightness, multi-layering, welds of variable chemical composition, heterogeneity, trajectory control system, weld boundaries, crack retardation, impact strength, stress intensity factor.

Постановка проблеми. Високі вимоги до тріщиностійкості робочого шару валків гарячої прокатки пов'язані з прагненням збільшити їх ресурс за рахунок підвищення опору розтріскування і запобігання руйнуванню. Ці вимоги треба враховувати при розробці як технології наплавлення, так і системи управління обладнанням наплавної установки. Оскільки значні труднощі викликає проектування і застосування універсальної технології наплавлення тріщиностійких композицій, необхідно використовувати такі способи гальмування тріщини, які визначаються реальними умовами роботи валка прокатного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від розмірів, маси і величини зносу прокатних валків технологія, що запропонують, повинна забезпечити високу продуктивність і безперервність процесу наплавлення. У той же час, якщо за умовами роботи величина зносу валка має допустиму межу, кількість шарів може бути мінімальною, що сприяє обмеженню тепловкладення в виріб і зниженню рівня залишкових зварювальних напружень. При оцінці тріщиностійкості наплавлених композицій найважливіше значення має напрямок розвитку тріщини по відношенню до межі шарів, а також швів в кожному шарі [1, 2]. На відміну від тріщини, яка поширюється вздовж межі шарів (Crack-propagation), можлива зупинка тріщини (Crack-arrester), орієнтованої в напрямку, перпендикулярному межі шарів багат шарової композиції. Робота поширення тріщини в таких композиціях залежить від схеми формування кожного наплавленого шару, де роль бар'єрів, що гальмують тріщину, грають межі не тільки між різнорідними, але і однорідними швами, а також між шарами. При перетині межі шарів знижується швидкість втомної тріщини (fatigue crack retardation), внаслідок чого змінюється її напрямок (Crack deflection) і починається розгалуження первинної тріщини з утворенням сітки дрібних вторинних тріщин (Crack-delamination). Реалізація цих положень, які забезпечують підвищення тріщиностійкості, повинна здійснюватися шляхом вибору матеріалів, технології та системи управління обладнанням для наплавлення валків.

Технічна доцільність вдосконалення технології наплавлення прокатних валків, розробка та впровадження сучасної технології і системи управління наплавною установкою, як і пов'язані з цим витрати, залежать від їх відповідності рівню функціональних властивостей застосовуваних наплавних матеріалів. Тільки в разі такої відповідності можна забезпечити істотне збільшення ресурсу валків. З огляду на умови роботи валків гарячої прокатки наплавні матеріали, що застосовуються, поряд з опором зносу і термоутомленню руйнуванню повинні забезпечувати мінімальне погіршення цих характеристик при повторному нагріванні в зонах перекриття суміжних швів (валиків). Тому вибір наплавних матеріалів, навіть при значному збільшенні вартості, здійснюється, виходячи з необхідності знизити інтенсивність розтріскування, тим більше зародження магістральних кільцевих тріщин (рис. 1), а також зменшити виборчий знос поверхні. Для обґрунтування такого вибору доцільно порівняти два близьких за складом матеріали. Перший отриманий при напавленні валків гарячої прокатки порошковим дротом ВЕЛТЕК-470 (%): 0,15 С, 0,9 Мn, 0,6 Si, 13,0 Cr, 2,1 Ni, 0,21 Nb, 0,25 V, який забезпечує в стані

наплавлення твердість до 40–48 HRC. Після відпустки ударна в'язкість, пластичність і міцність металу досягають значень: $KCV = 0,60$ МДж/м², $\psi = 53\%$, $\sigma_b = 660$ МПа, твердість 30 HRC. У той же час, застосування набагато більш дорогого порошкового дроту SK 742-SK дозволяє отримати в складі шва (%): 0,04 С, 1,3 Мн, 0,4 Si, 13,5 Cr, 3,3 Ni, 1,3 Мо, 0,1 Nb, 0,15 V, 0,08 N; твердість 42–44 HRC. Наплавлений метал після відпустки відрізняється значно більш високою ударною в'язкістю ($KCV = 1,0$ МДж/м²) і пластичністю ($\psi = 68\%$). Дуже низький вміст вуглецю в наплавленому шарі призводить до зменшення випадання карбідів на межі зерен при кристалізації ванни, а також при повторному нагріванні затверділого металу. На додаток до цього, введення до складу азоту призводить до утворення дисперсних нітридних сполук, які не випадають на межі зерен і рівномірно розподілені в структурі. Це дозволяє підвищити опір зародженню тріщин при циклічних тепловмінах [3].

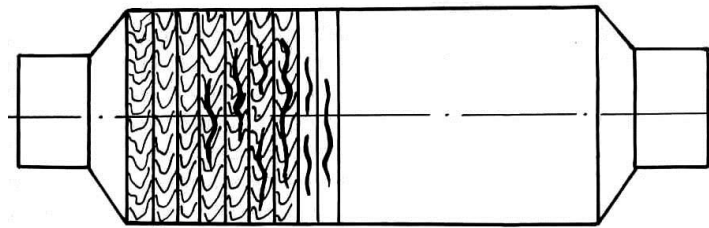


Рис. 1 – Схема утворення кільцевих магістральних тріщин на поверхні валка

Підвищити тріщиностійкість дозволяє формування наплавленого шару з швів, макрорізнорідна структура яких містить включення однакового з матрицею складу або складу, що відрізняється. Як показали дослідження [4], лита структура, матриця якої відповідає складу Х7Н5 і містить включення складу Х4Н2, відрізняється більш високими значеннями ударної в'язкості, а також коефіцієнта динамічної тріщиностійкості в порівнянні зі структурою металу однорідного складу. Однак поле напружень, що виникає при формуванні таких включень, не призводить до гальмування тріщини на межі матриці і включення (рис. 2).

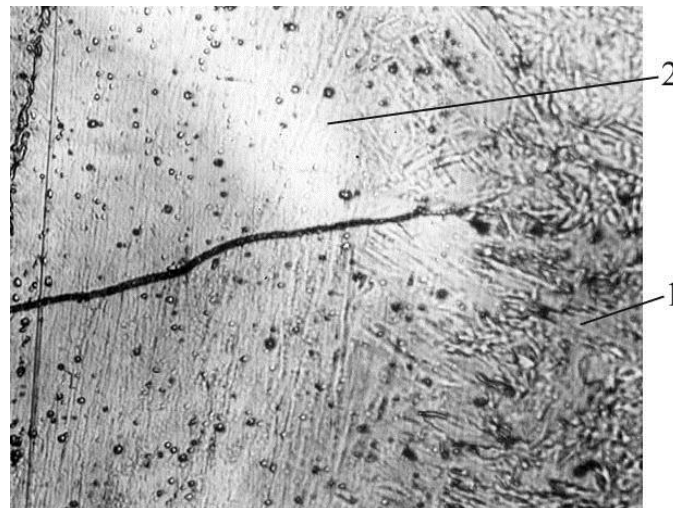


Рис. 2 – Перетинання тріщиною межі між матрицею і включенням (×500)

Мета статті – аналіз шляхів підвищення тріщиностійкості валків гарячої прокатки за рахунок вдосконалення технології наплавлення і її освоєння в промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Тріщиностійкість багатошарової композиції зростає зі зміною напрямку наплавлення швів в суміжних шарах (рис. 3, а), причому, схильність до розтріскування помітно нижче в шарах, наплавлених уздовж твірної бочки валка. Це підтверджується даними експериментів про зниження тангенціальних і поздовжніх напружень (на 14 і 70%, відповідно) при поздовжньому напавленні в порівнянні з напавленням по гвинтовій лінії, близькою до

кільцевої [5]. Підвищити опір розтріскуванню такої багатошарової композиції при наплавленні валків гарячої прокатки дозволяє наплавлення останнього шару вздовж твірної. У той же час, з метою зменшення ймовірності утворення дефектів, наплавлення першого шару (підшару) здійснюється по гвинтовій лінії з максимально можливим кроком, що забезпечує надійне покриття суміжних швів [6]. У той же час, підвищеним опором поширенню тріщини характеризуються композиції*, які в процесі наплавлення прокатних валків формуються як з однорідних, так і різноорідних за складом шарів, утворених швами з непрямої траєкторією укладання – зигзагоподібною, синусоїдальною, за схемою «перехресного намотування» (рис. 3, б). При цьому в межах кожного шару може відрізнитися склад суміжних швів і формуватися шар змінного складу [7]. Зазначене підвищення тріщиностійкості пов'язано, перш за все, з утворенням додаткових перешкод на шляху поширення тріщини. Додаткові бар'єри для тріщини при переході від шару до шару можуть створюватися за рахунок асиметричного укладання швів (отже, і меж між ними) (рис. 3, в). Більш того, оскільки межі між швами можуть бути причиною не тільки виборчого зносу, але і поширення термоутомлених тріщин, до зростання тріщиностійкості повинна призводити зміна орієнтації цих зон щодо магістрального напрямку розтріскування.

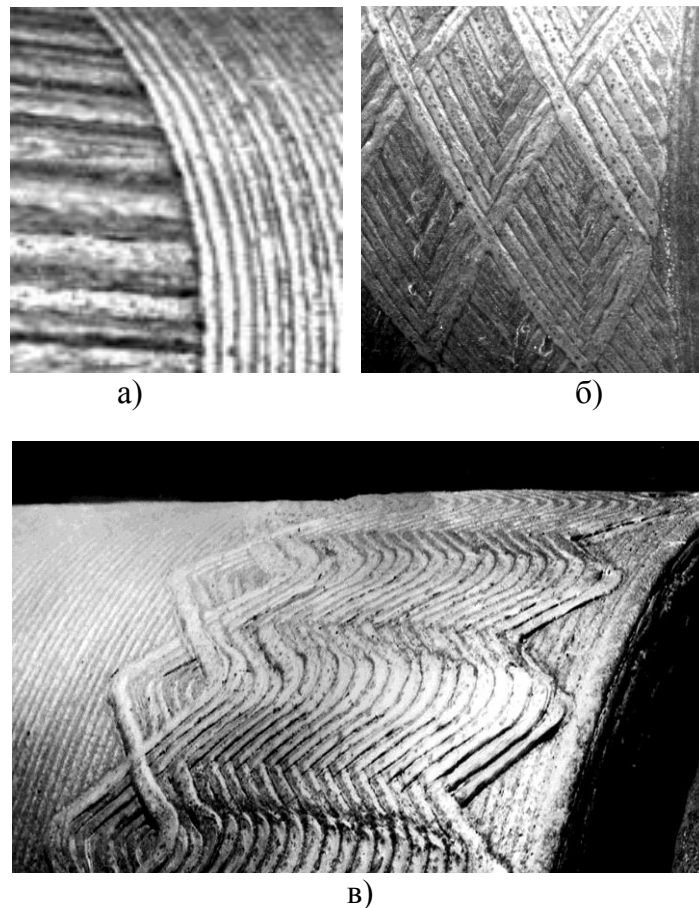


Рис. 3 – Утворення бар'єрів на шляху поширення тріщини при зміні напрямку наплавлення в суміжних шарах (а), формуванні шарів зі швів з траєкторією укладання за схемою «перехресного намотування» (б), синусоїдальною траєкторією з асиметричним положенням вершин синусоїди в суміжних шарах (в)

Не можна також не враховувати вплив на опір тріщиноутворенню періодичних відхилень траєкторії шва, які призводять до зміни напрямку росту кристалів і формування литого металу, що має дозволити отримати більш стійку до розтріскування розорієнтовану структуру шарів і композиції в цілому. Це узгоджується з результатами, отриманими в роботі [8], де дос-

* розроблені в галузевої лабораторії наплавлення ДВНЗ «ПДТУ»

ліджувався вплив на зносостійкість наплавленого металу умов формування кристалічної структури, орієнтації, розмірів і напрямку росту дендритів, а також супутньої цьому хімічної мікронеоднорідності. Результати проведених досліджень дозволили встановити взаємозв'язок напрямку росту, ступеня подрібнення дендритної структури і опору зносу складів металу типу 40Х3Г1С і 60Х4Г2С. Подальший розвиток дослідження отримали в роботі [9], де з огляду на вплив на зносостійкість напрямку росту кристалів в поверхневому шарі сталі 25Х5ФМС, наплавленої на опорні валки стану 2000, вибирався напрямок обертання валка в кліті. При збігу напрямку кристалізації і обертання валка, завдяки підвищенню стійкості проти зносу, напрацювання валків зростає в 1,3-1,4 рази. Аналізуючи причини руйнування роликів МБЛЗ діаметром 270 мм на комбінаті «Азовсталь», при проведенні механічних випробувань зразків виявлено, що ударна в'язкість зразків, вирізаних з робочого шару уздовж твірної, в 1,5-1,7 рази вище, ніж для металу вирізки в поперечному напрямку [10]. Оцінка опору термічним ударам наплавленого металу 18Х6ГМФС також підтверджує залежність результатів досліджень від напрямку дії навантаження по відношенню до напрямку росту кристалів [11]. Вплив дисперсності дендритної структури на інтенсивність руйнування наплавленого металу Ni-Cr-B-C-Si вивчався в роботі [12]. Встановлено, що в разі утворення грубої дендритної структури швидкість поверхневого руйнування зростає за рахунок викришування твердих надлишкових фаз. З урахуванням цих даних, змінюючи напрямок кристалізації в суміжних шарах, а в межах кожного шару – за рахунок непрямолінійної траєкторії укладання швів, утворюються межі, які гальмують поширення тріщини.

При зустрічі з межею різнорідних швів відбувається розгалуження магістральної тріщини, напрямок вторинної тріщини відхиляється від магістрального, а зниження її швидкості сприяє гальмуванню [4]. Імовірність гальмування тріщини зростає за рахунок взаємного перетину в однорідному наплавленому шарі, який формується з зигзагоподібних швів (рис. 4). Ще в більшій мірі опір поширенню тріщини зростає в неоднорідному шарі, який утворений зигзагоподібними швами, коли поєднуються два шляхи гальмування тріщини – за рахунок взаємного перетинання, а також на кордоні різнорідних швів. Така роль меж швів і шарів в гальмуванні тріщини, в якійсь мірі, аналогічна ролі зварних швів, як гасителів тріщин, що розповсюджуються в спіральшовних трубах [12].

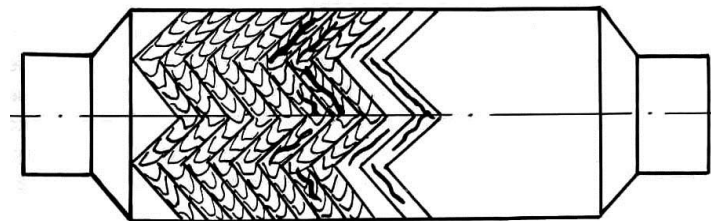


Рис. 4 – Схема запобігання утворенню магістральних кільцевих тріщин при їх взаємному перетині в шарі з швів з зигзагоподібною траєкторією укладання

Для узгодженої зміни по заданих функціональних залежностей вектора швидкості наплавлення і змінного хімічного складу шва (валика) доцільно використовувати модернізовану систему управління обладнанням для наплавлення [7]. Система управління наплавною установкою повинна забезпечити не тільки відпрацювання траєкторії переміщення електрода щодо поверхні, що наплавляється, але і управління приводами подачі електродів, складу яких відрізняються, без переналадження обладнання в процесі наплавлення. Функціональна схема управління (рис. 5) містить блок керування електроприводами, який дозволяє здійснювати зміну швидкості обертання кожного електродвигуна по необхідному закону, що задається контролером. В якості зворотнього зв'язку в стандартних приводах зварювального устаткування використовуються датчики кута повороту. Для управління швидкістю подачі електродів застосовуються крокові двигуни з інкрементними енкодерами.

Підтвердженням підвищення опору розтріскування при динамічному навантаженні багатшарових різнорідних композицій, в тому числі наплавлених зигзагоподібними або синусоїдальними швами, служить порівняльна кількісна оцінка ударної в'язкості (KCV) і коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) наплавленого металу (рис. 6).

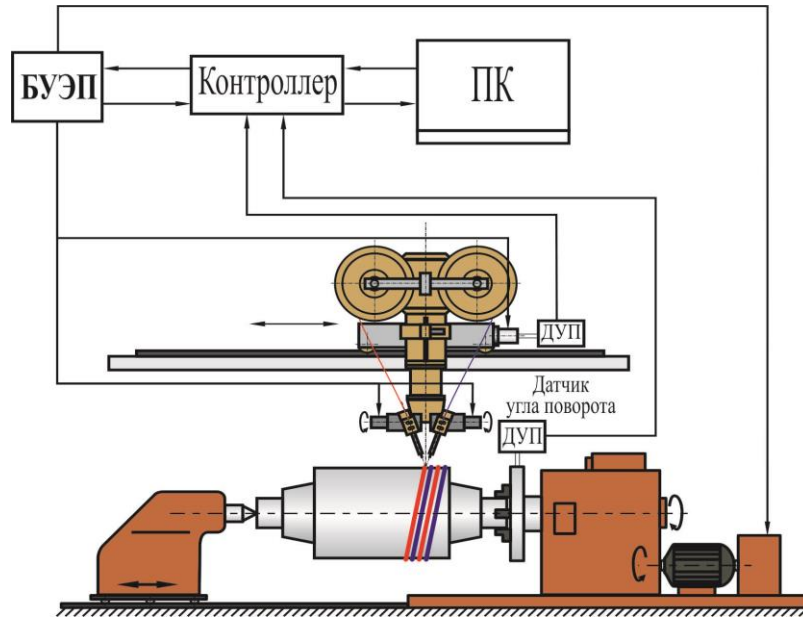


Рис. 5 – Функціональна схема системи управління процесом наплавлення композиції підвищеної тріщиностійкості

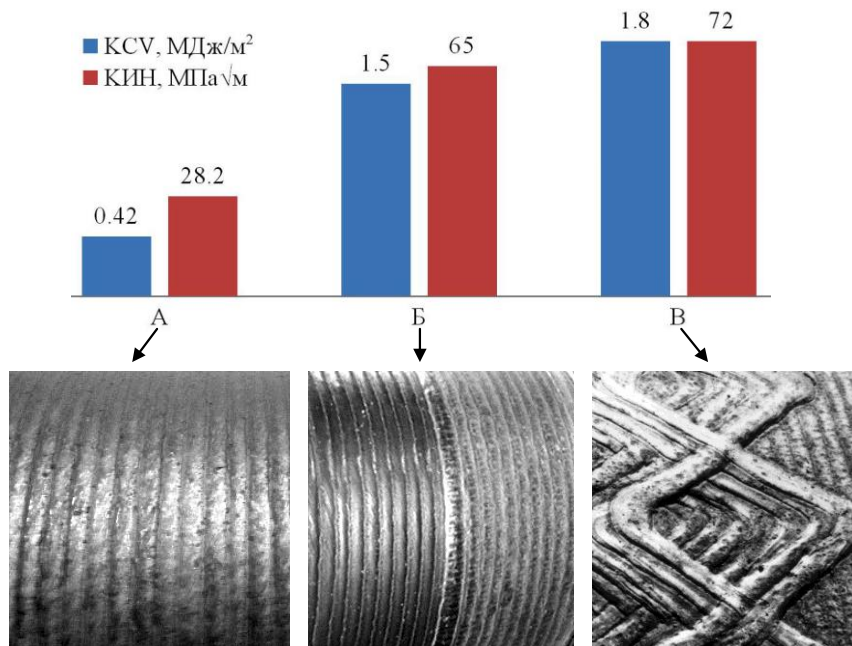


Рис. 6 – Характеристики динамічної тріщиностійкості композицій – ударна в'язкість (KCV) і коефіцієнт інтенсивності напружень (КИН): А – 18Х6ГМФС; Б, В – 18Х6ГМФС+12ГС+18Х6ГМФС

Висновки

1. Запобігти поширенню кільцевих тріщин при зміцненні валків гарячої прокатки дозволяє технологія наплавлення швами з непрямолінійною траєкторією укладання. Для тріщин, що розповсюджуються в таких швах, характерно взаємне перетинання, галуження і уповільнення.
2. Багатошарові композиції з шарів, які формуються з однорідних або різнорідних швів змінного складу і властивостей, що наплавляються на валки гарячої прокатки, характеризуються підвищеними значеннями ударної в'язкості і коефіцієнта інтенсивності напружень.
3. Розроблена і освоєна модифікована схема управління процесом наплавлення дозволяє узгодити зміну вектора швидкості наплавлення, а також хімічного складу по довжині шва.

Перелік використаних джерел:

1. Formation of the Mechanical Properties and Fracture Resistance Characteristics of Sandwich Composites Based on the 09G2S Steel and the EP678 High-Strength Steel of Various Dispersion / S.V. Gladkovsky [et al.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Issue 6. – Pp. 71-90. – Mode of access: DOI: [10.17804/2410-9908.2017.6.071-090](https://doi.org/10.17804/2410-9908.2017.6.071-090).
2. Structure and fatigue crack resistance of multilayer materials produced by explosive welding / I.A. Bataev [et al.] // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 287-290. – Pp. 108-111. – Mode of access: DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.108](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.108).
3. Особенности технологии наплавки для увеличения ресурса роликов машин непрерывного литья заготовок / Л.К. Лещинский [и др.] // *Сварочное производство*. – 2019. – № 12. – С. 46-50.
4. Лещинский Л.К. Слоистые наплавленные и упрочнённые композиции / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин. – Мариуполь : Новый мир, 2005. – 392 с.
5. Повышение трещиностойкости бандажированных опорных валков / С.В. Щетинин [и др.] // *Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. праць / ПДТУ*. – Мариуполь, 2010. – Вип. 12. – С. 226-230.
6. Пат. 92559 Україна, МПК В 23 К 9/04. Спосіб виготовлення прокатних валків / Л.К. Лещинський, К.К. Степнов, В.М. Матвієнко, В.О. Мазур, Ю.О. Степнова. – № u201402043; заявл. 28.02.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16. – 5 с.
7. Иванов В.П. Моделирование технологии наплавления зносостойкого шару змінного хімічного складу / В.П. Иванов, Л.К. Лещинський, С.В. Щербаков // *Автоматичне зварювання*. – 2019. – № 11. – С. 40-45. – Режим доступу: DOI: [10.15407/as2019.11.06](https://doi.org/10.15407/as2019.11.06).
8. О химической неоднородности металла, наплавленного электродной лентой / Л.К. Лещинский [и др.] // *Сварочное производство*. – 1971. – № 1. – С. 28-29.
9. А. с. 1371727 СССР, МКИ В 21 В 28/02. Способ эксплуатации прокатного валка / А.И. Трайно, В.В. Ветер, Е.В. Юсупова, А.Д. Белянский, З.П. Каретный. – № 4080880/23-02; заявл. 27.06.86; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5.
10. Гулаков С.В. Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский. – Мариуполь : Издательство ПГТУ, 2005. – 170 с.
11. Шевченко О.И. Закономерности изменения свойств и структуры покрытий системы Ni-Cr-B-C-Si при наплавке и термической обработке / О.И. Шевченко // *Сварочное производство*. – 2002. – № 9. – С. 19-23.
12. Повышение прочностных характеристик спиральношовных труб конструкционного назначения / А.С. Письменный [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2012. – № 3. – С. 40-44.

References:

1. Gladkovsky S.V., Kuteneva S.V., Kamantsev I.S., Galeev R.M., Dvoynikov D.A. Formation of the Mechanical Properties and Fracture Resistance Characteristics of Sandwich Composites Based on the 09G2S Steel and the EP678 High-Strength Steel of Various Dispersion. *Diagnostics, Resources and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 71-90. doi: [10.17804/2410-9908.2017.6.071-090](https://doi.org/10.17804/2410-9908.2017.6.071-090).
2. Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Burov V.G., Golovin E.D., Smirnov A., Prikhodko E.A. Structure and fatigue crack resistance of multilayer materials produced by explosive welding. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 287-290, pp. 108-111. doi: [10.4028/www.scientific.net/amr.287-290.108](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.287-290.108).
3. Leshchinskiy L.K., Matvienko V.N., Ivanov V.P., Vozyanov E.I., Karaulanov O.V. Osobennosti tehnologii naplavki dlja uvelichenija resursa rolikov mashin nepreryvnogo lit'ja zagotovok [Features of the deposition technology for the rollers resource increasing of the machines for continuous blanks casting]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 2019, no. 12, pp. 46-50. (Rus.)
4. Leshchinskiy L.K., Samotugin S.S. Sloistye naplavlennyye i uprochnjonnyye kompozicii [Laminated deposited and hardened compositions]. Mariupol', Novyj mir Publ., 2005. 392 p. (Rus.)
5. Shhetinin S.V., Shhetinina V.I., Stepnov K.K., Zavarika N.G. Povyshenie treshhino-stojkosti bandazhированных опорных valkov [Increasing the fracture toughness of shrouded backup rolls]. *Zahist metalurgijnih mashin vid polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2010, vol. 12, pp. 226-230. (Rus.)
6. Leshchinskiy L.K., Stepnov K.K., Matvienko V.N., Mazur V.O., Stepnova Iu.O. Sposib vigotovlenn-

- ja prokatnih valkiv* [A method of manufacturing rolling rolls]. Patent UA, no. 92559, 2014. (Ukr.)
7. Ivanov V.P., Leshhins'kij L.K., Shherbakov S.V. Modeljuvannja tehnologii naplavlennja znosostijkogo sharu zminnogo himichnogo skladu [Modeling the technology of deposition of a layer of variable chemical composition]. *Avtomatichne zvarjuvannja – Automatic Welding*, 2019, no. 11, pp. 40-45. doi: 10.15407/as2019.11.06. (Ukr.)
 8. Leshhinskij L.K., Lavrik P.F., Tarasov V.V., Macuka V.H. O himicheskoi neodnorodnosti metalla, naplavlennogo jelektrodnoj lentoi [About the chemical inhomogeneity of the metal deposited with the electrode strip]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1971, no. 1, pp. 28-29. (Rus.)
 9. Trajno A.I., Veter V.V., Jusupova E.V., Belianskii A.D., Karenyi Z.P. *Sposob jekspluatacii prokatnogo valka* [Method of operating the rolling roll]. Certificate of authorship USSR, no. 1371727, 1988. (Rus.)
 10. Gulakov S.V., Nosovskij B.I. *Naplavka rabocheho sloja s reglamentirovannym raspredeleniem svojstv* [Surfacing of a working layer with a regulated distribution of properties]. Mariupol', PGTU Publ., 2005. 170 p. (Rus.)
 11. Shevchenko O.I. Zakonomernosti izmenenija svojstv i struktury pokrytij sistemy Ni-Cr-B-C-Si pri naplavke i termicheskoi obrabotke [Regularities of changes in the properties and structure of coatings of the Ni-Cr-B-C-Si system during surfacing and heat treatment]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 2002, no. 9, pp. 19-23. (Rus.)
 12. Pis'mennyi A.S., Prokof'ev A.S., Gubatiuk R.S., Pis'mennyi A.A., Polukhin V.V., Iukhimenko R.F., Gavrik A.R. Povyshenie prochnostnyh harakteristik spiral'nozhovnyh trub konstrukcionnogo naznachenija [Increase of strength characteristics of spirally-welded pipes for construction purposes]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2012, no. 3, pp. 40-44. (Rus.)

Рецензент: С.В. Щетинін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 18.10.2020

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226128

© Щетинін С.В.¹, Щетиніна В.І.², Никитенко П.В.³,
Елсаєд Халед⁴, Коваль О.В.⁵

УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- І НАФТОПРОВІДНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

Встановлені закономірності регулювання енергетичної характеристики зварювальної дуги, суми приелектродних падінь напруги і градієнта потенціалу в стовпі при різних способах зварювання. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує за рахунок аргону зниження суми приелектродних падінь напруги, градієнта потенціалу і напруги дуги, зменшення погонної енергії, тепловкладення, зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, саморегулювання дуги, стабільність процесу, підвищення якості і ударної в'язкості зварних з'єднань.

Ключові слова: ударна в'язкість зварних з'єднань, енергетична характеристика зварювальної дуги, погонна енергія, зварювальні напруги, здрібнення мікроструктури, одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁴ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁵ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь