

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.10

УДК 669.184.244

Сігарьов Є.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-8229-7877, e-mail: en_sigarev@ua.fm

Похвалітій А.А., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-7887-2843, e-mail: ArtemMSLP@gmail.com

Руденко М.Р., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8016-5221, e-mail: 18rudenko@gmail.com

Кондрашенко Д.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID:/0009-0006-6643-417X, e-mail: notfeilordima@gmail.com

Круть А.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти, e-mail: krut_av@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Sigarev Yevhen, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Metallurgy

Pokhvalityi Artem, Candidate of Technical Sciences, Docent,

Associate Professor of the Department of Metallurgy

Rudenko Mykola, Candidate of Technical Sciences, Docent,

Associate Professor of the Department of Metallurgy

Kondrashenkov Dmytro, Postgraduate Student,

Krut Artur, Postgraduate Student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА СТІЙКІСТЬ ЗВАРНИХ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ

Метою дослідження є визначення факторів впливу та уточнення причин руйнування зварних швів між соплом Лаваля та зовнішньою обоймою наконечника кисневої фурми, визначення ступеня впливу зовнішнього ізолювання робочої поверхні наконечника шаром намороженого шлаку на умови їх охолодження. На підставі дослідження умов експлуатації кисневих фурм та аналізу мікроструктури зон розміщення тріщин у зварних швах показано негативний вплив різниці у хімічних складах матеріалів наконечника, сопел Лаваля та зварювального дроту на міцність зварного шву. Встановлено ступінь впливу товщини і теплопровідності шару шлаку, намороженого на поверхню наконечника, на теплопровідність та тепловіддачу до охолоджуючої води. Розроблені рекомендації до виконання зварювальних робіт при виготовленні наконечників з метою підвищення надійності зварних швів та міцності конструкції в цілому.

Ключові слова: зварний шов, наконечник, фурма, конвертер, шлак, теплопровідність, тріщина, мікроструктура.

The purpose of the study is to determine the influencing factors and clarify the causes of the destruction of the welds between the Laval nozzle and the outer ring of the tip of the oxygen lance, to determine the degree of influence of the external insulation of the working surface of the tip with a layer of frozen slag on their cooling conditions. Based on the investigation of the operating conditions of oxyfuel lances and the analysis of the microstructure of the cracked weld zones, the negative effect of the difference in the chemical compositions of the materials of the tip, Laval nozzles, and welding wire on the strength of the weld is shown. The degree of influence of the thickness and thermal conductivity of the slag layer deposited on the tip surface on the thermal conductivity and heat transfer to the cooling water was determined. Recommendations for welding operations in the manufacture of tips have been developed in order to increase the reliability of welds and the strength of the structure as a whole.

Keywords: welded seam, tip, lance, converter, slag, thermal conductivity, crack, microstructure.

Постановка проблеми

Наконечники кисневих фурм конвертерів з верхнім продуванням ванни працюють у жорстких умовах (вплив високих температур, що суттєво перевищують температуру плавлення

міді (1085 °C) внаслідок теплового випромінювання металевого ванни, омивання потоками гарячих відхідних газів, випромінювання від допалення CO до CO₂, контактування з краплями розплавленого заліза, що виносяться з реакційних зон, недоліки системи охолодження та дефекти виготовлення наконечника та т. ін.). Такі умови роботи роблять сопла Лавалля наконечників одним з найбільш уразливих елементів конструкції. У випадку використання зварювання для закріплення сопел у наконечниках зварні шви є додатковим, уразливим з точки зору руйнування й виведення фурм з експлуатації, місцем. Виведення наконечників із експлуатації внаслідок руйнування зварного шва, що з'єднує сопло Лавалля зі зовнішньою поверхнею обойми наконечника, є однією із основних причин низької стійкості фурм та збільшення питомих витрат на виробництво сталі.

Поверхня сопел Лавалля у внутрішньому робочому просторі наконечника охолоджується водою (згідно з ТІ 230-С320-21 «Виплавка конвертерної сталі» з витратою води 300—320 м³/год та забезпеченням швидкості > 5 м/с). Водночас, у зонах наконечника, віддалених від вхідного потоку води, може сформуватись складна течія із 3—4-х циркуляційних контурів зі зменшенням швидкості води до < 0,5 м/с. В таких умовах, використання різних типів коригуючих напрямків руху води вставок, перегородок, згідно із запропонованими конструктивними рішеннями (Пантейков С.П. зі співавторами, 2013, 2019 та т. ін.), що розміщуються у засоплових зонах наконечника, сприятиме погіршенню умов охолодження у зв'язку із утворенням додаткових локальних застійних зон із низькою інтенсивністю тепловіддачі. Останнє призведе до виникнення режиму плівкового кипіння води («кипіння з недогрівом»). Як відомо (Дульнев Г.М. зі співавторами, 1990), при зменшенні швидкості води < 1,5 м/с температура внутрішньої поверхні зовнішньої труби кисневої фурми у окремих зонах перевищує температуру насичення води (температура кипіння охолоджувальної води при тиску останньої у системі 0,5—0,6 МПа складає $T_{\text{нас}} = 150—160$ °C). Зі зменшенням ступеня недогріву при досягненні $T_{\text{нас}}$ різко зменшується тепловий потік та величина коефіцієнта тепловіддачі до води, внаслідок чого доступ води до охолоджуваної поверхні ускладнений. Це призводить до виникнення «сухих» плям, які повністю виключені з теплообміну і є превалюючими місцями прогару наконечника.

Стінки сопел Лавалля, крім охолодження водою, охолоджуються і дуттьовим киснем, який на виході із сопла має температуру на рівні — 110 °C, з часткою охолоджуючого ефекту 15—25 % від загального. Незважаючи на те, що коефіцієнт тепловіддачі до кисню у дифузорах сопел на порядок менше ніж до води, для найбільш нагрітих вихідних ділянок сопел охолодження потоком кисню має суттєве значення: густина теплових потоків до води від торця зовнішньої поверхні наконечника та потоку кисню на вихідних ділянках сопла складають в залежності від висоти розташування фурми за оцінками Сущенко А.В. зі співавторами (2013) 1,6—6,0 МВт/м² та 0,4—0,6 МВт/м² відповідно.

Перегрівання торця сопел Лавалля в такому режимі охолодження, суміщене з нерозрахованим режимом витоку кисневих струменів й потраплянням крапель шлаку та металу в зону його вихідних кромок, призводять до ерозійного зносу сопел (розпалу). Знос може носити як рівномірний за усім периметром вихідного перетину, так і еліпсоподібний (переважно направлений до центру зовнішньої обойми наконечника).

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За результатами виконаних високотемпературних досліджень [1] в частині наконечника, що знаходиться поблизу реакційних зон з температурою 2500—2900 °C, виникають значні термічні напруження викликані нерівномірністю нагріву різних ділянок. Навіть внутрішня поверхня наконечника, що омивається водою, по ходу конвертерної плавки може нагріватися до температур 160—170 °C, а зовнішня його поверхня — до 400—500 °C і вище (при нагріві до температури у 500 °C мідь втрачає міцність і пластичність). Вже при підвищенні температури міді понад 190 °C її міцність та пластичність знижується, що може стати причиною утворення тріщин на поверхні наконечника.

До найбільш «слабкого й проблемного» місця зварного наконечника кисневої фурми слід віднести зварні шви, що з'єднують сопла та зовнішню обойму (таріль) наконечника. Знакоперемінні навантаження, викликані різнонаправленим впливом високотемпературного середовища робочого простору конвертера з одного та охолодження сопел і обойми наконечника з

іншого боку, призводять до руйнування зварного шву (рис. 1). з подальшим витіканням охолоджувальної води й виведенням фурми з експлуатації.

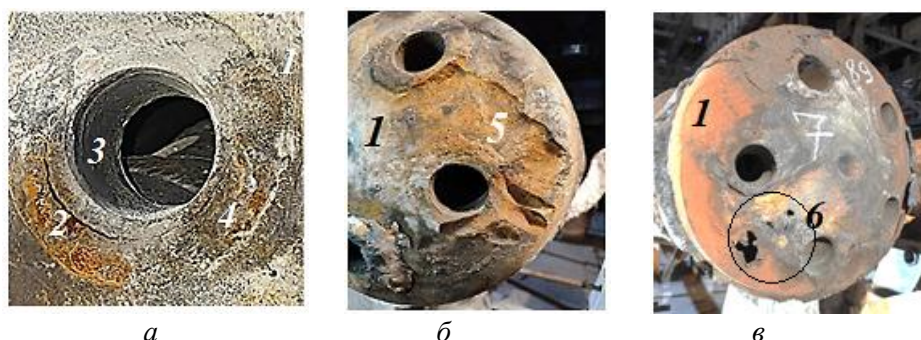


Рис. 1. Характерний вигляд тріщини зварного шву між соплом і зовнішньою поверхнею наконечника кисневої фурми (а), «вимивання» шару міді (б) та наскрізного пропалювання зовнішньої обійми наконечника (в). 1 — поверхня обійми наконечника; 2 — тріщина у зварному шві; 3 — сопло Лавалля; 4 — зварний шов; 5 — зона «вимивання» шару міді; 6 — отвори внаслідок наскрізного пропалювання наконечника

Для дослідження використали результати конвертерних плавок на 250-т конвертерах, проведених з використанням наконечників фурм розроблених співробітниками кафедри металургії ДДТУ та впроваджених у промислове виробництво [2]. Згідно з попередніми припущеннями авторів даного дослідження однією з причин утворення тріщин є відмінність хімічних складів (і відповідно коефіцієнтів лінійного розширення й теплопровідності) матеріалів зварного шву, зовнішньої обійми і сопла Лавалля наконечника.

Мідь і її сплави при зварюванні схильні до утворення гарячих тріщин [3]. Властивості зварних швів, виконаних з використанням дроту на основі міді, залежать від вмісту в металі домішок (Bi, Pb, Sb, As). Домішки кисню, водню, вісмуту, свинцю, сірки, фосфору, сурми, мис'яку істотно погіршують зварюваність та теплопровідність міді. Це обумовлено високим значенням коефіцієнта теплового розширення, великою величиною усадки при затвердінні і високою теплопровідністю поряд з наявністю в міді і її сплавах шкідливих домішок. Домішки у міді, такі як O, S, В (температура евтектики 1065 °С, 1067 °С та 1060 °С відповідно), Ni, Pb, Bi утворюють тверді розчини включень, які стають причиною крихкості металу. У зв'язку з малою розчинністю вказаних елементів у міді при зварюванні утворюються структури псевдоевтектики, що добре змочують границі зерен. Розташовуючись по границях зерен, евтектика знижує корозійну стійкість і пластичність міді. До дуже шкідливої домішки відносять оксиген, який потрапляє у мідь під час зварювання. Стійким до 380 °С є CuO, понад 380 °С — стійким є Cu₂O [4].

Виявлений у перший дослідний період промислових експериментів [2] недостатній рівень витрат води на охолодження фурм (< 280 м³/год), у сукупності із використанням у металошихті конвертерної плавки підвищеної кількості легковагового металобрухту та скрапу (особливо в умовах завалки з двох, а іноді і з трьох совків), призводив до додаткових проблем для теплового режиму роботи наконечників. Так, причиною виведення з експлуатації ряду наконечників у першому періоді стало «вимивання» шару міді з зовнішньої поверхні наконечника (зменшення товщини шару міді з 13 мм до 9—3 мм), частини зварного шву та торця сопел, з подальшим проривом води.

Крім того, завантаження у 250-т конвертер підвищеної кількості легковагового металобрухту у складі твердої частини металошихти може призводити до непередбаченого конструкцією агрегату зменшення вільного простору. Останнє, за умов відсутності відповідного коригування положення фурми, витрат кисню та невідповідністю витрат води на охолодження негативно впливає на теплове навантаження робочої поверхні наконечників фурм. Надмірне наближення наконечника до поверхні брухту в умовах обмеженості вільного простору призводить до роботи кисню з сопел в режимі «різання», особливо при підвищених витратах кисню. Верхня

межа температури запалювання низьковуглецевої сталі становить приблизно 1350 °С й за таких температур тверда фаза утворених оксидів заліза (II) переходить у розплавлений стан. Процес «рїзання» металобрухту перетворюється в процес розплавлення сталі та видалення крапель цього розплаву потоками відхідних газів, що омивають торець наконечника фурми. В умовах недостатньої інтенсивності тепловідведення «омивання» винесеними краплями заліза призводить до оплавлення міді наконечника з «вимиванням» її поверхневого шару (рис. 1, б) та наскрізних пропалювань (рис. 1, в).

Крім теплових навантажень і температурних знакоперемінних напружень наконечник фурми піддається впливу механічних навантажень, таких як реакція віддачі витікаючих із сопел струменів кисню, недостатня компенсація розширення при використанні металошлангових компенсаторів замість кільцевого ущільнення. При механічних навантаженнях утворені у зварних швах пори також сприяють передчасному руйнуванню швів [5].

Вивченню умов охолодження та механізму теплопередачі у системах «наконечник — робочий простір конвертера», «наконечник — сопло» присвячено ряд робіт [6, 7]. Автори [6] на основі аналізу теплопередачі віднесли до основної причини розтріскування охолоджувальних труб нерівномірність розподілу температур охолоджуючої води.

Механізм теплопередачі та ефективність охолодження сопел Лавалю водою змінюються у випадку наможування шлаку та/або шлакометалевих настилів на робочу поверхню зовнішньої обійми наконечника під час продування конвертерної ванни. Товщина наможеного на поверхню наконечника конвертерного шлаку та/або шлакометалевої настилі може складати від 3-х до 40—45 мм (рис. 2, а), а на поверхні фурми — сягати 70—100 мм і більше (рис. 2, б) [8]. Наявність шлакового шару суттєво змінює коефіцієнт теплопровідності мідного наконечника та збільшує опір теплопередачі, зі зміною умов охолодження наконечника та сопел Лавалю водою.

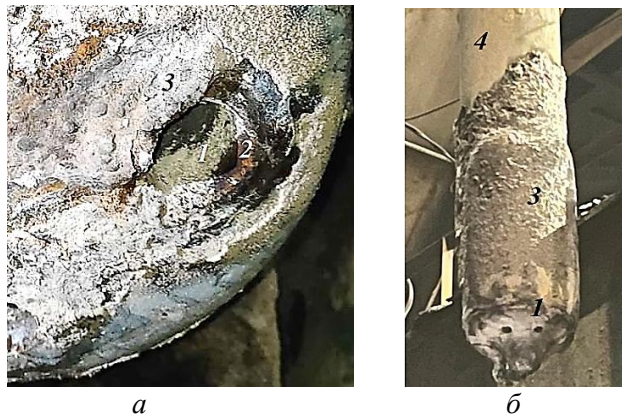


Рис. 2. Шлаковий шар на робочій поверхні наконечника кисневої фурми: 1 — сопло Лавалю; 2 — зварний шов між соплом та зовнішньою обіймою наконечника; 3 — шар шлаку (або шлакометалевої настилі); 4 — стовбур фурми

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є уточнення механізму та основних причин руйнування зварних швів між соплом Лавалю та зовнішньою обіймою наконечника кисневої фурми, впливу зовнішнього ізолювання робочої поверхні наконечника та зварних швів шаром наможеного шлаку на умови їх охолодження.

Виклад основного матеріалу

Руйнування зварного шва з виникненням тріщини між соплом Лавалю та зовнішньою обіймою (робочою поверхнею) наконечника в повздовжніх і поперечних напрямках виникає у різні періоди використання кисневої фурми для продувки конвертерної ванни.

Для досліджень причин руйнування зварних швів використали зразки, вирізані із впроваджених в промислову експлуатацію конструкцій п'ятисоплових наконечників кисневої фурми для 250-т конвертера конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Були відібрані зразки

зварювальних дротів, використаних у різні дослідні періоди для виготовлення наконечників, та зразки матеріалів з яких виготовляли зовнішню обойму та сопла Лавалю наконечників.

За результатами аналізу відібраних зразків на хімічний склад встановлено (табл. 1), що хімічний склад зварювального дроту першої партії наконечників відповідає марці МНЖКТ (ДСТУ 16130-90) (виготовлення згідно з вимогами п. 5.2.4 ТП-230-1079-2020 (ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»)), а сопел Лавалю та наконечника — марці М1 (ДСТУ 859:2003). Різниця за вмістом Cu у матеріалах зварювального дроту та зовнішньої обойми наконечника і сопел складає 6,79 %.

Таблиця 1. Хімічний склад проб зварювального дроту і матеріалу сопла

Вид зразку	Pb	Zn	Fe	Ni	Mn	Al	Sb	Si	Sn	Cu
Звар. дріт МНЖКТ5-1	0,009	0,45	1,22	4,99	0,5	0,013	0,0005	—	—	92,81
Сопло Лавалю (М1)	0,0001	—	0,0008	—	—	—	0,0001	—	—	99,99
Звар. дріт CuSn1	0,0001	—	0,0006	—	0,08	—	0,0001	0,13	0,18	99,6
Звар. дріт марки М1	0,0001	—	0,0009	—	—	—	—	—	0,001	99,99

Внаслідок високої теплопровідності міді і швидкого відводу теплоти погіршується формування шва, зростає схильність до появи в зварних швах дефектів (непроварів, підрізів, напливів, тріщин, пористості). У зв'язку з цим зварювання металу великої товщини (понад 10—15 мм) зазвичай виконують з попереднім і супутнім підігрівом. Згідно з вимогами п. 5.2.2 ТП-230-1079-2020 (ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ») перед проведенням зварювальних робіт виконується попереднє нагрівання кромки до температур 600—650 °С. Контроль температури здійснюється в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» за кольором (темно-червоний).

При зварюванні міді і її сплавів у швах формується крупнокристалічна структура. Це пов'язано з тим, що висока теплопровідність міді та її сплавів при зварюванні сприяє інтенсивному розповсюдженню теплового потоку від центру зварного шва до основного металу. При цьому створюються сприятливі умови для спрямованої кристалізації від зони сплавлення вглиб зварювальної ванни. Оскільки в цих умовах не з'являються нові центри кристалізації, у зварному шві утворюється зона із кристалітів з виборчою орієнтацією; кристаліти витягуються у напрямку теплового потоку, утворюючи грубозернисту стовбчасту структуру зварного шва. Інтенсивне поширення теплоти в основний метал при зварюванні сприяє зростанню зерна в зоні термічного впливу.

Згідно з даними [5] зварювання мідних елементів з використанням марки дроту МНЖКТ призводить до надмірного легування зварного шву без забезпечення необхідної теплопровідності. Так, коефіцієнт теплопровідності зварного шва ($\lambda_{зв}$), отриманого методом аргоно-дугового зварювання з присадним дротом МНЖКТ5-1 складає 181,78 Вт/(м·К), при цьому λ_m матеріалу зовнішньої обойми наконечника з міді марки М1 — 394—420 Вт/(м·К) (за н.у.) відповідно [9]. При нагріванні міді до 600—1000 К теплопровідність, за різними даними, зменшується до 379—342 Вт/(м·К). Вочевидь, задля збільшення терміну служби швів зварних наконечників доцільним є максимальне зменшення градієнту температур між соплами, зварними швами та зовнішньою обоймою.

Наморозування шару конвертерного шлаку товщиною $\delta_{ш}$ з теплопровідністю $\lambda_{ш} = 0,5—2,5$ Вт/(м·К) на поверхню наконечника і торець сопел Лавалю та суттєво впливає на теплопровідність ($\lambda_{ш-м}$) утвореного шлакометалевого шару і тепловіддачу до охолоджувальної води й потоку кисню (для сопел Лавалю).

З метою визначення впливу товщини шлакового шару на зміну величини λ_m та умов теплопередачі від поверхні наконечника, торця сопел Лавалю та зварних швів до охолоджуючої води розраховували величину скорегованої комплексної теплопровідності утвореного шлакометалевого шару $\lambda_{ш-м}$ за виразом:

$$\lambda_{ш-м} = \frac{\delta_m}{\delta_m/\lambda_m + \delta_{ш}/\lambda_{ш}}. \quad (1)$$

За виразом (1) розраховували і зміну $\lambda_{ш-м}$ для зварних швів між обоймою наконечника та соплами Лавалю. Для розрахунків прийняті наступні вихідні дані: товщина шару міді наконечника $\delta_m = 13$ мм; торця сопла Лавалю — від 13 до 23 мм; зварного шву — від 13 до 15 мм; намороженого шлаку $\delta_{ш} = 0,05$ —39 мм. Результати розрахунків наведено на рис. 3.

Вже при наявності на поверхні наконечника 1 мм шару шлаку $\lambda_{м-ш}$ зменшується з 404 Вт/(мК) до 8—36 Вт/(мК) в залежності від $\lambda_{ш}$ (на 91—98 % відповідно). Теплопровідність зварного шву під шаром шлаку зменшується зі 182 Вт/(мК) до 9—38/(мК) (на 79—95 % відповідно).

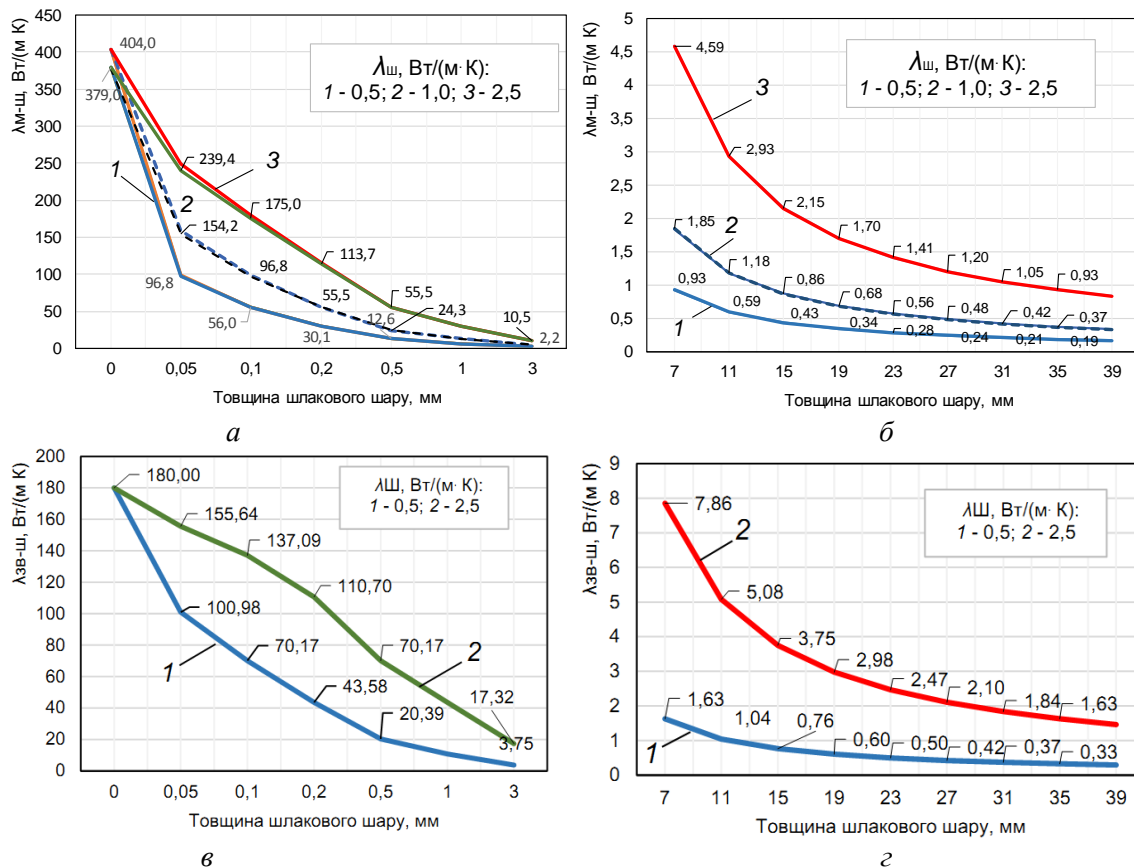


Рис. 3. Вплив товщини та величини коефіцієнту теплопровідності конвертерного шлаку на зміну $\lambda_{м-ш}$ зовнішньої обойми наконечника (а, б) та зварного шву (в, г). Товщина шару намороженого шлаку а — 0—3 мм; б — 7—39 мм

Визначення впливу товщини намороженого на поверхню наконечника шару шлаку на зміну коефіцієнта конвективної тепловіддачі (K_{kn}) від наконечника й сопел потоку охолоджувальної води та з боку кисневого потоку (для сопла Лавалю) проводили з використанням виразу:

$$K_{kn} = \frac{1}{1/h_b + 1/h_r + \delta_m/\lambda_m + \delta_{ш}/\lambda_{ш}}, \quad (2)$$

де h_b та h_r — коефіцієнти конвективної тепловіддачі для потоків охолоджувальної води та кисню відповідно, Вт/(м²·К).

Величина h_b суттєво залежить від фізичних властивостей охолоджувача та зовнішніх чинників і згідно з розрахунками Жульковського О.О. (1998) для зовнішнього контуру фурми

становить від 2500 до 20000 Вт/(м²·К) в залежності від швидкості потоку води (1—10 м/с), за даними [10] — 2756 Вт/(м²·К). Величина h_r складає в середньому 100 Вт/(м²·К). Авторам вказаних досліджень не враховано наявність на поверхні стовбура фурми та її наконечника намороженого шару шлаку.

У даній роботі для розрахунків прийняті значення h_b та h_r на рівні 2756 та 100 Вт/(м²·К) відповідно. Згідно з отриманими результатами (рис. 4, а), наморожування на поверхню наконечника шару конвертерного шлаку з теплопровідністю 0,5—2,5 Вт/(м·К) призводить до зменшення K_{kn} (в залежності від теплопровідності шлаку 0,5 та 2,5 Вт/(м·К)) на 52—67 % (при 1 мм шлаку) та на 71—90 % при 20 мм шлаку відповідно. У свою чергу, наявність на поверхні зварного шву шару шлаку призводить до зменшення K_{kn} (в залежності від теплопровідності шлаку) на 51—56 % (при 1 мм шлаку) та на 72—88 % при 20 мм шлаку на поверхні шву відповідно. Нелінійний характер збільшення опору тепловіддачі (рис. 4, б) свідчить про доцільність удосконалення способів попередження наморожування шлаку на робочу поверхню наконечника.

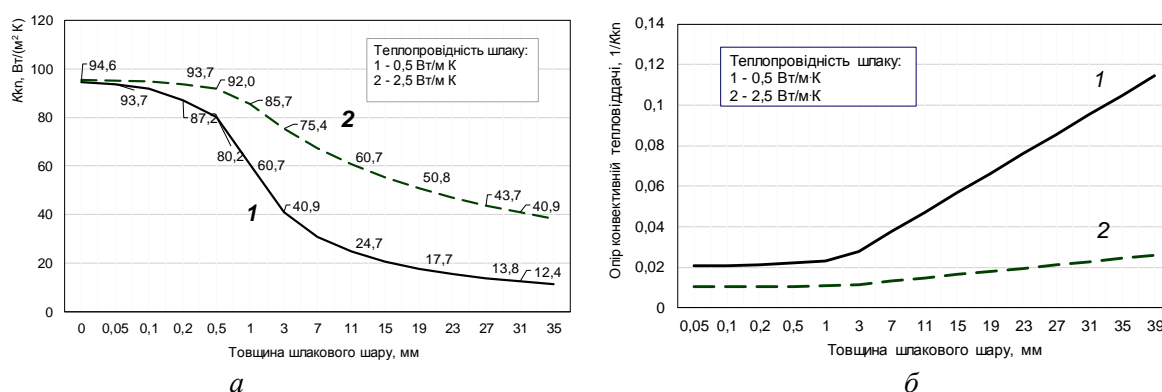


Рис. 4. Вплив товщини шлакового шару на поверхні наконечника та $\lambda_{ш}$ на зміну коефіцієнту конвективної тепловіддачі K_{kn} (а) та величину опору (б)

Необхідно відмітити, що після виведення з експлуатації (переважно з причини руйнування зварного шву) першої групи дослідних наконечників, марку зварювального дроту було змінено і в подальшому для виготовлення наконечників застосовували дріт марки CuSn1 (ISO 24373:2018) та дріт, що за х/с відповідає марці М1 (табл. 1). При цьому стійкість зварних наконечників фурм збільшилась з 16—56 до 90—112 плавов у другому та до 160—245 плавов у третьому дослідних періодах відповідно.

Для аналізу мікроструктури зони руйнування зварного шву використали наконечник зі стійкістю 245 плавов, що виведений із експлуатації з причини течі охолоджувальної води крізь тріщину у шві між соплом та обіймою (рис. 5). Було відібрано декілька зразків від різних ділянок наконечника. Для металографічних досліджень підготовлених темплетів використали мікроскоп Olympus GX53.

Із сектора 1 (рис. 5, а) за перетином утвореної у зварному шві наконечника тріщини вирізали зразок (рис. 5, б) та підготували темплет (рис. 5, в) для аналізу мікроструктури зон шва що прилягають до місця утворення тріщини. Між зовнішньою частиною наконечника 1 і соплом 2 виконане зварне двошарове з'єднання 3. По лінії компоновки і зварювання за кресленням 4 спостерігається непровар 5, який супроводжується тріщинами 6. Наявність нещільностей і зазорів 7 не сприяє зростанню загальної міцності конструкції наконечника.

З огляду на те, що евтектичні точки на діаграмах стану Cu—Cu₂O та Cu—Cu₂S сильно зміщені у бік чистої міді, то основою евтектики в цьому випадку є Cu, в якій вкраплені включення сульфїду або закису міді [3]. При малому вмісті кисню евтектика утворює тонку облямівку навколо зерен міді. У міру збільшення вмісту кисню кількість евтектики збільшується і при вмісті 0,39 % O₂ сплав має чисто евтектичної будову. Евтектика $\alpha(\text{Cu})\text{—Cu}_2\text{O}$ має точкову будову, де окремі темні точки є частинками закису міді (Cu₂O); основу евтектики (світле поле) скла-

дає мідь (точніше твердий розчин кисню в міді). Розчинність кисню в міді при евтектичній температурі (1065 °С) становить 0,0035 %, при 600 °С — 0,0007 %. При переході за евтектичну точку (0,39 % O₂) випадають первинні кристали закису міді, що мають форму дендритів.

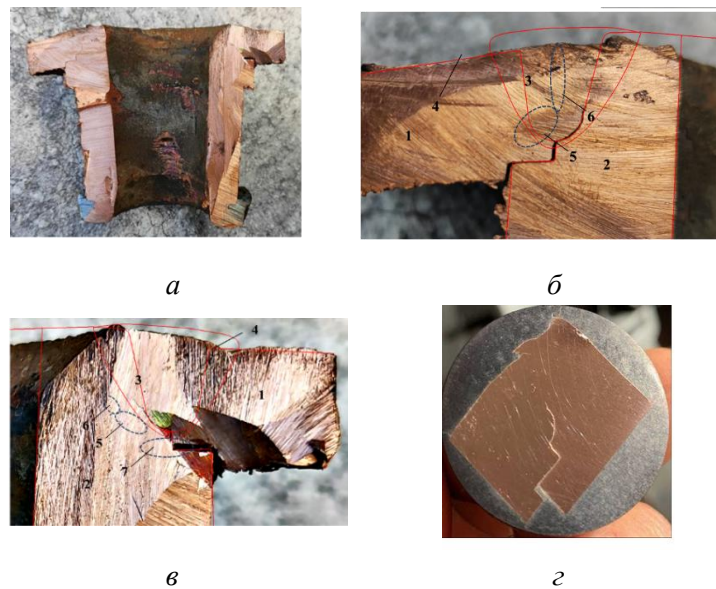


Рис. 5. Перетини сектора, вирізаного з 5-ти соплового наконечника фурми: *а* — загальний вигляд вирізаного сектора; *б, в* — протилежні сторони вирізаного сектора з накладенням первинного (проектного) контуру наконечника; *г* — темплет. 1 — фрагмент зовнішньої обійми наконечника; 2 — фрагмент сопла Лаваля; 3 — зварний шов між соплом Лаваля та обіймою; 4 — лінії компоновки і зварювання за кресленням; 5 — непровар; 6 — тріщина; 7 — щілина

Згідно до результатів аналізу мікроструктури темплету (рис. 5, *г*) структура зварного шва складається зі світлої матриці і значної кількості дисперсних виділень (рис. 6). Зерна в металі шва в основному великі (500—750 мкм). Виявлені мікротріщини, розташовані по границях зерен, що напевне, пов'язано із появою на границях зерен неміцних сполук з низькою пластичністю (евтектика або суміші $\alpha(\text{Cu}) + \text{Cu}_2\text{O}$) та непровар. На шліфах у структурі зварних швів виявлені скупчення кисневих включень 2 уздовж границь кристалітів 1 (рис. 6). Виділення у процесі зварювання оксидів уздовж границь кристалітів призводить до охрупчування міді та може сприяти передчасному руйнуванню зварного шва.

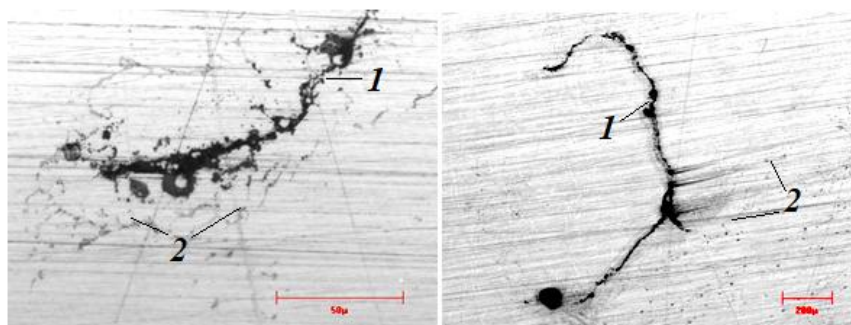


Рис. 6. Мікроструктура зони наконечника з тріщиною у зварному шві

У свою чергу, до основних причин непровару при з'єднаннях сопел Лаваля з зовнішньою обіймою наконечника можна віднести:

- недостатній прогрів зварної ділянки або недостатня сила зварювального струму. Через високу теплопровідність зварна ванна передчасно охолоджується і розплав не встигає змішатися з поверхневим шаром;

- перегрів зварної ділянки або перевищення сили зварювального струму понад рекомендованих значень. Внаслідок високої рідкоплинності мідний розплав потрапляє за межі зварної ванни наперед зварного шва, чим ускладнює умови для подальшого провару ділянки;

- наявність забруднень і оксидів на поверхні ділянок, що зварюють. Оксидні включення з відмінною від міді температурою плавлення можуть погіршувати умови зварювання і сприяти утворенню кристалічних напружень у зварному шві.

- невідповідність хімічного складу зварювального дроту заданій марці міді (табл. 1). При зварюванні чистою електротехнічної міді з використанням дроту зі значною кількістю домішок можливе надмірне легування зварного шву, що може також сприяти утворенню кристалічних напружень у зварному шві.

З метою попередження утворення тріщин у зварних швах між соплами Лавалю та зовнішньою обоймою наконечника фурми авторами даного дослідження рекомендовані наступні варіанти виконання зварювальних робіт:

Варіант 1. Забезпечити правильну компоновку елементів наконечника. Уникати зміщень і заклинювання сопел у посадкових отворах наконечника і обойми. Не допускати занадто жорсткого закріплення наконечника в оснастці. Забезпечити ретельний контроль очищення зварюваних поверхонь від оксидів, що утворюються при нагріванні наконечника газовим різакром. Перший зварний шар 1 при зварюванні сопла зі зовнішньою частиною наконечника (рис. 7, а) виконувати із використанням невитратного електроду (вольфрамового або графітового) в атмосфері аргону або гелію. Це забезпечить утворення надійного герметичного шва по всій окружності сопла. Наступні зварні шви 2 і 3 виконувати відповідно до вимог ТП-230-1079-2020.

Для зменшення напружень у зварному шві виконання зварних шарів проводити у змінних напрямках.

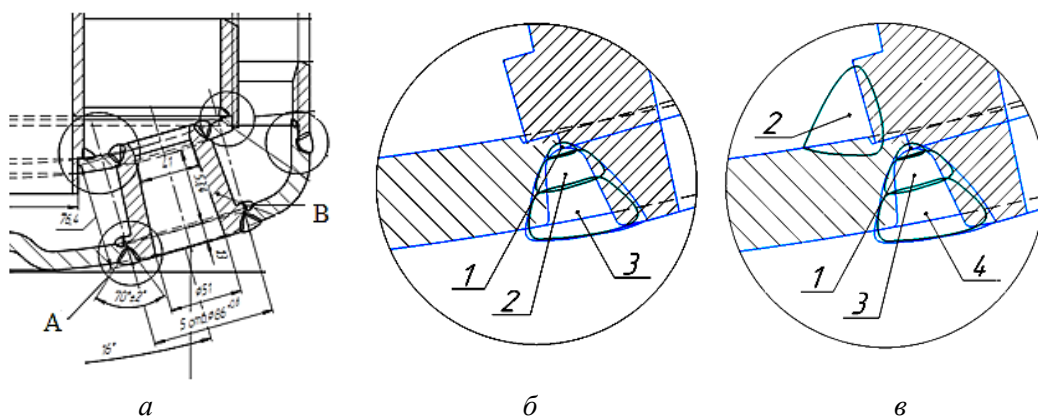


Рис. 7. Рекомендована послідовність накладання зварних швів між соплом і наконечником (а) тільки з зовнішнім А (б) та з внутрішнім зварним швом В (в)

Варіант 2 (додатково до варіанту 1). Після накладання першого зварного шва 1 (рис. 7, б) провести зварювання сопла із наконечником з внутрішньої сторони частковим (дискретним) або суцільним зварним швом 2. Частковий шов накладають крізь отвір в обоймі без зняття останньої. Суцільний шов накладають зі зняттям обойми. Після накладання суцільного внутрішнього зварного шва обойму встановлюють на старе місце, фіксують наконечник в оснастці і виконують накладання зварних швів 3 і 4.

Форма посадкової площадки між соплами і обоймою враховує можливість зняття і встановлення останньої «на гарячу» з привареними до наконечника соплами.

Виконання першого зварного шва вказаним способом мінімізує вірогідність виникнення непроварів проблемної ділянки і здатна забезпечити повну герметизацію наконечника при розпалі сопел Лавалю наконечника до діаметру 75—80 мм.

Висновки

Встановлено, що основною причиною утворення тріщин у зварному шві є відмінності у хімічних складах зварювального дроту, матеріалі сопел Лавалю та зовнішньої обійми наконечника фурм. Так, різниця за вмістом міді складає 6,79 %.

Проведений аналіз та порівняння мікроструктур зварного шва, металу сопел Лавалю та зовнішньої обійми наконечника за перетином розташування шву. Виявлені мікротріщини, розташовані по границях зерен, що пов'язано із появою на границях зерен неміцних сполук з низькою пластичністю (евтектика або суміші $\alpha(\text{Cu}) + \text{Cu}_2\text{O}$) та непроваром. У структурі зварних швів виявлені скупчення кисневих включень уздовж границь кристалітів, що призводить до охрупчування міді та руйнуванню зварного шву.

Наморожування шару конвертерного шлаку з низькою теплопровідністю $\lambda_{\text{ш}}$ на поверхню наконечника суттєво впливає на теплопровідність утвореного шлакометалевого шару $\lambda_{\text{м-ш}}$ і тепловіддачу $K_{\text{кп}}$ до охолоджувальної води й потоку кисню (для сопел Лавалю). Вже при наявності на поверхні зварного шву 1 мм шару шлаку $\lambda_{\text{м-ш}}$ зменшується в залежності від величини $\lambda_{\text{ш}}$ на 79—95 % відповідно. При наявності шару шлаку на поверхні зварного шва $K_{\text{кп}}$ (в залежності від теплопровідності шлаку) знижується на 51—56 % (при 1 мм шлаку) та на 72—88 % при 20 мм шлаку відповідно. Необхідною умовою підвищення стійкості зварних швів є використання для виготовлення наконечників зварювального дроту та матеріалів для виготовлення сопел і зовнішньої обійми наконечника співставного хімічного складу.

Розроблені рекомендації для проведення зварювальних робіт з метою запобігання утворенню тріщин між соплом Лавалю та зовнішньою обіймою наконечника. У найпростішому варіанті рекомендовано перший зварний шар виконувати із використанням невитратного електроду (вольфрамового або графітового) в атмосфері аргону або гелію, що забезпечить утворення надійного герметичного шва по всій окружності сопла. Для зменшення напружень у зварному шві виконання наступних зварних шарів доцільно проводити у змінних напрямках.

Більш ефективним варіантом слід вважати технологію, згідно з якою після накладання першого зварного шва виконується з'єднання сопла із наконечником з внутрішньої сторони частковим (дискретним) або суцільним зварним швом, що мінімізує вірогідність виникнення непроварів і здатне забезпечити герметизацію наконечника при збільшенні вихідного перетину сопел Лавалю до критичного діаметру розпалу. Реалізація внутрішнього зварного шва дозволить зменшити механічні навантаження на зовнішній зварний шов, особливо в умовах використання металошлангових компенсаторів, і підвищить міцність зварного з'єднання в цілому.

Список використаної літератури

1. Chernyatevich A.G., Molchanov L.S., Sigarev E.N. et. al. Specific Features of Blowing a Converter Bath with the Application of Modernized Two-Story Oxygen Lances. *Steel in Translation*. 2021. № 51. P. 538—547.
2. Похвалітій А.А., Сігарьов Є.М., Чубін К.І., Лобанов Ю.С., Якунін П.А. Особливості визначення конструкції наконечників кисневих фурм в нестационарних умовах конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрухту. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. 2021, вип.2 (39). С. 9—14.
3. Кузш О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: Підручник. *Львів: Вид-во «Афіша»*, 2002. 304 с.
4. Сварка и наплавка меди и сплавов на её основе. Составители: В.М. Илюшенко, В.П. Лукьяненко. *К.: Международная ассоциация «Сварка»*. 2013. 396 с.
5. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://svarmax.com.ua/publ/v-chem-slozhnost-svarki-medi>.

6. T. Robertson, D.S. Beishon, and C.J.K. McIntee. Computational flow modeling applied to BOS oxygen lance design. *Ironmaking Steelmaking*. 1987. №16. pp. 345—352.
7. Жульковский О.А. Математическая модель тепловой работы наконечника верхней кислородной фурмы. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2000. №4. С. 8—11.
8. Сігарьов Є.М., Лобанов Ю.С., Похвалітій А.А. Дослідження впливу конструкції наконечника фурми на показники конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрухту // *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. 2021, вип.1 (38). С. 3—10.
9. Електронний ресурс. Режим доступу: https://metallicheckiy-portal.u/articles/svarka/svarka_medi/svarka_medi_-_osnovi_tehnologii.
10. D. L. Zhu, H. Xu, Y. Sun, and B. J. Qi. Numerical heat transfer analysis of laminar filmcondensation on a vertical fluted tube. *Appl. Therm. Eng.* 2010. №30. pp. 1159—1163.

DETERMINATION OF FACTORS AFFECTING THE STABILITY OF WELDED TIPS OF OXYGEN LANCE

Abstract

It has been established that the most likely cause of crack formation is differences in the chemical composition of the welding wire, the material of the Laval nozzle and the outer cage of the lance tip. For example, the difference in copper content is 6.79 %. The microstructures of the weld, Laval nozzle metal, and outer lance tip rim were analyzed and compared along the cross section of the weld location. Microcracks located along the grain boundaries were detected, which is probably due to the appearance of weak compounds with low ductility and non-propagation at the grain boundaries. In the structure of welds, accumulations of oxygen inclusions along the boundaries of crystallites were found, which leads to copper embrittlement and can contribute to weld failure. Freezing a layer of converter slag with low thermal conductivity on the tip surface reduces the thermal conductivity of the formed slag metal layer and heat transfer to the cooling water. Even if there is a 1 mm layer of slag on the surface of the weld, thermal conductivity decreases by 79—95 %, depending on the thickness of the slag and its properties, respectively. If there is a layer of slag on the surface of the weld, the heat transfer decreases by 51—56 % (at 1 mm of slag) and by 72—88 % at 20 mm, respectively. In order to prevent the formation of cracks between the Laval nozzle and the outer cage of the handpiece, it is advisable to follow the following recommendations when performing welding operations. In the simplest case, the first welded layer should be performed using a non-consumable electrode (tungsten or graphite) in an argon or helium atmosphere, which will ensure the formation of a reliable, tight weld around the entire circumference of the nozzle. To reduce stresses in the weld, subsequent welded layers should be performed in alternating directions. A more effective option is the technology according to which, after the first weld is applied, the nozzle is connected to the tip from the inside with a partial (discrete) or continuous weld, which minimizes the likelihood of failures and can ensure the sealing of the tip when the initial cross-section of the Laval nozzles increases to the critical ignition diameter. The implementation of an internal weld will reduce mechanical loads on the external weld, especially when using metal hose expansion joints, and increase the strength of the welded joint as a whole.

References

- [1] Chernyatevich A.G., Molchanov L.S., Sigarev E.N. [et. al.] (2021). Specific Features of Blowing a Converter Bath with the Application of Modernized Two-Story Oxygen Lances. *Steel in Translation*. 51, 538—547.
- [2] Pokhvalityy A.A., Sigarev E.M., Chubin K.I. [et. al.] (2021). Osoblyvosti vyznachennya Konstruktsiyi nakonechnykh kysnyevykh furm v nestatsionarnykh umovakh konverternoyi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu [Peculiarities of determining the design of oxygen lance tips under non-stationary conditions of converter melting with preheating of scrap metal]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. Volume 2 (39), 9—14. [in Ukrainian].
- [3] Kuzsh O.A., Yatsyuk R.A. (2002). Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv [Metallurgy and heat treatment of metals]. *Lviv: Textbook. Publishing house «Afisha»*. [in Ukrainian][4] Ilyushen-

- ko V.M., Luk'yanenko V. P. (2013). Svarka i naplavka medi i splavov na yeyo osnove [Welding and surfacing of copper and copper-based alloys]. *Kiev: International Association «Svarka»*. [in Russian].
- [5] <https://svarmax.com.ua/publ/v-chem-slozhnost-svarki-medi>. [in Russian].
- [6] Robertson T., Beishon D.S., and McIntee C.J.K. (1987). Computational flow modeling applied to BOSoxygen lance design. *Ironmaking Steelmaking*. 16, 345—352.
- [7] Zhul'kovskiy O.A. (2000). Matematicheskaya model' teplovoy raboty nakonechnika verkhney kislorodnoy furmy [Mathematical model of thermal operation of the upper oxygen lance tip]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy*, Vol. 4, P. 8—11. [in Russian].
- [8] Sigarev E.M., Lobanov Y.S., Pokhvalityy A.A. (2021). Doslidzhennya vplyvu konstruktsiyi nakonechnyka furmy na pokaznyky konverternoyi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu [Investigation of the influence of lance tip design on the performance of converter melting with preheating of scrap metal]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, Vol.1 (38), 3—10. [in Ukrainian].
- [9] https://metallischekiy-portal.u/articles/svarka/svarka_medi-osnovi_tehnologii. [in Russian].
- [10] Zhu D. L., Xu H., Sun Y., and Qi B. J. (2010). Numerical heat transfer analysis of laminar film-condensation on a vertical fluted tube. *Appl. Therm. Eng.* 30, 1159—1163.

Надійшла до редакції 20.09.2024