

# ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ, МЕХАНІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ МОДИФІКОВАНИХ ЗВАРНИХ ШВІВ НА МІДНИХ ЧАСТИНАХ ФУРМ

В.М. Нестеренков<sup>1</sup>, В.І. Загорніков<sup>1</sup>, Ю.В. Орса<sup>1</sup>, С.Д. Заболотний<sup>2</sup>, А.С. Беляєв<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2.  
E-mail: [alcon@ism.kiev.ua](mailto:alcon@ism.kiev.ua)

Вивчення реальних умов експлуатації фурми для кисневого дуття показує, що в її головній частині, яка знаходиться поблизу реакційних зон конвертора, виникають великі термічні напружки, викликані нерівномірністю нагріву різних ділянок вузла. Сопла головки інтенсивно охолоджуються водою та киснем, а наконечник фурми, навпаки, нагрівається тепловим випромінюванням ванни рідкого металу. Саме термічні напружки поряд з механічними навантаженнями (реакція віддачі витікаючих з сопел головки струменів кисню) викликають передчасне руйнування зварних швів, що з'єднують сопла фурми з її наконечником. Необхідність в розробці електронно-променевого зварювання складових частин мідних фурм обумовлена недоліками застосування традиційного способу їх зварювання – аргонодугового, який не забезпечує задовільних властивостей зварних з'єднань та їх стабільності під час експлуатації виробу. Застосування електронно-променевого зварювання при виготовленні головок фурм для кисневого дуття дозволяє підвищити їх експлуатаційні характеристики за рахунок легування зварювальної ванни елементами, які надають розкиснюючий вплив на рідку мідь. Одночасно для збільшення терміну служби головок фурм необхідно забезпечити зниження в них рівня термічних напружок. Останнє стає можливим у разі, якщо метал зварного шва буде максимально близьким по теплопровідності до основного металу. У роботі наведено результати механічних випробувань електронно-променевих зварних з'єднань, отриманих на міді М1 з використанням різних легуючих вставок. На підставі досліджень мікроструктури і характеру зламів модифікованих електронно-променевих швів встановлено вплив легуючих вставок на їх експлуатаційні властивості. Спільно з фахівцями ІСМ ім. Бакуля НАН України була розроблена методика проведення досліджень теплопровідності зон зварних з'єднань і виконані вимірювання коефіцієнтів теплопровідності для швів, отриманих на міді М1 методами АрДЗ та ЕПЗ з використанням легуючих вставок. Також було виконано комп'ютерне моделювання температурного поля, що виникає в зонах зварних з'єднань в умовах експлуатації мідних фурм. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 8.

*Ключові слова:* електронно-променево зварювання, модифікація шва легуючими вставками, металографічні та фактографічні дослідження, коефіцієнт теплопровідності, пористість

Умови експлуатації конверторних фурм для кисневого дуття набагато більш жорсткі, ніж доменних фурм. Типова конструкція корпусу фурми кисневого дуття, що складається з зовнішньої головки (1), внутрішньої обичайки (2) та центрального (3) і п'яти бічних (4) сопел наведена на рис. 1.

Сопла головки інтенсивно охолоджуються водою та киснем, а наконечник фурми, навпаки, нагрівається тепловим випромінюванням ванни рідкого металу. Навіть його внутрішня поверхня, що добре омивається водою, в процесі конверторної плавки може нагріватися до 170 °С. Зовнішня ж поверхня, що звернена до дзеркала ванни, нагрівається до температури 400...500 °С і вище. Перспективу підвищити експлуатаційні характеристики зварних з'єднань на міді має електронно-променево зварювання [1–6]. Однак такий дефект шва, як пористість не дозволяє досить ефективно реалізувати переваги цього способу зварювання, тому що в умовах жорстких температурних напружень і механічних навантажень,

в яких працює головка фурми, пори в шві викликають його передчасне руйнування. При ЕПЗ міді йде інтенсивне видалення газів, які не встигають виділятися з металу зварювальної ванни, утворюючи пори або концентруючись в мікронесуцільностях, що створює високий тиск і приводить до зародження тріщин [1–8]. Серед можливих причин виникнення пористості при ЕПЗ безкисневої міді автори робіт [9, 10] називають випаровування елементів з високою пружністю пара. Відомий

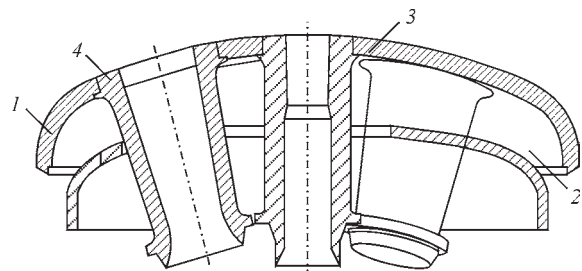


Рис. 1. Типова конструкція корпусу фурми кисневого дуття (опис див. у тексті)

Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, Загорніков В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-0456-173X>, Орса Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1208-4171>, Заболотний С.Д. – <https://orcid.org/0000-0003-1287-8454>, Беляєв А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-7997-1509>  
В.М. Нестеренков, В.І. Загорніков, Ю.В. Орса, С.Д. Заболотний, А.С. Беляєв

в металургії метод зниження пористості – рафінуючий переплав – не завжди ефективний в разі зварювання, тому що може викликати надмірні деформації і внутрішні напруження в зварних конструкціях. Інший металургійний метод боротьби з пористістю передбачає легування зварювальної ванни елементами, що підвищують розчинність газів в рідкому металі або зв'язують їх в стійкі сполуки. При ЕПЗ міді доцільно проводити легування зварювальної ванни алюмінієм та титаном, оскільки вони відрізняються низькою пружністю пара в порівнянні з міддю і надають розкиснюючий вплив на рідку мідь в процесі зварювання.

Мета роботи полягала в оцінці міцності і теплофізичних властивостей модифікованих електронно-променевих зварних з'єднань мідних фурм.

**Методика проведення досліджень.** З метою зниження пороутворення в зварних швах проводилася ЕПЗ мідних зразків товщиною 18 мм із застосуванням легуючих вставок у вигляді тонкої (0,05 та 0,1 мм) фольги. Зварювання зразків виконували на установці ЕПЗ типу УЛ-209м, забезпеченої енергоблоком ЕЛА-60 (60/60 кВт). Структурно-фазові характеристики вивчали з використанням комплексу експериментальних методів сучасного металознавства, включаючи оптичну металографію (мікроскопи «Versamet-2» і «Neophot-32»), аналітичну растрову мікроскопію (SEM-515 фірми PHILIPS). Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі М-400 фірми «LECO», навантаження становило 1 Н.

Механічні властивості: зварних з'єднань значення межі міцності, умовної межі плинності і відносного подовження зварних з'єднань визначали при кімнатній температурі на круглих зразках по ГОСТ 6996-66 тип II, ударну в'язкість – на зразках з надрізом типу Шарпі. Проводилось порівняння структур дугового шва і модифікованих електронно-променевих швів. Як доповнення до металографічних досліджень впливу легуючих вставок на мікроструктуру зварних з'єднань було проведено їх фрактографічний аналіз. Завершувалися дослідження порівняльними вимірюваннями коефіцієнта теплопровідності дугових і модифіко-

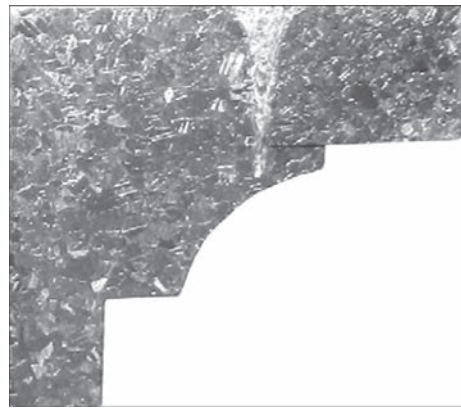


Рис. 2. Зварне з'єднання товщиною  $\delta = 18$  мм фурми кисневого дуття. Режим ЕПЗ:  $U_{пр} = 60$  кВ;  $I_{пр} = 197$  мА;  $v_{зв} = 7,5$  мм/с;  $+ \Delta I_{ф} = 5$  мА,  $A_{круг} = 0,8$  мм;  $L_{раб} = 200$  мм

ваних електронно-променевих швів. Вимірювання теплопровідності зварних з'єднань проводилося за участю фахівців і на лабораторному устаткуванні Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

**Обговорення результатів.** У конструкції зварного вузла застосовується «замкове» з'єднання, що дозволяє зберегти перевагу електронно-променевого зварювання і можливість виведення кореневих дефектів шва з зони дії експлуатаційних навантажень. Проведені раніше дослідження (Кравчук Л.А. і Русинік М.О., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ) показали можливість, використовуючи жорсткі режими ЕПЗ, домогтися оптимізації форми і якості шва. Отримана форма некрізного шва представлена на рис. 2.

Електронно-променеві шви та їх ЗТВ вигідно відрізняються від дугових швів розмірами по ширині і меншою кількістю дефектів (рис. 3).

Зерна в металі аргонодугового шва великі (в основному 500...700 мкм, рідше зустрічаються зерна розміром 250 мкм). У той же час структура електронно-променевого шва складається з округлих зерен на порядок менших за розміром, більш великих у верхній частині шва (~ 70 мкм), які подрібнюються в корені шва до ~ 48 мкм. Розмір зерен в пришовній зоні і основному металі не відрізняється (в середньому 200...220 мкм). Введення титану і алюмінію в шов сприяє отриман-

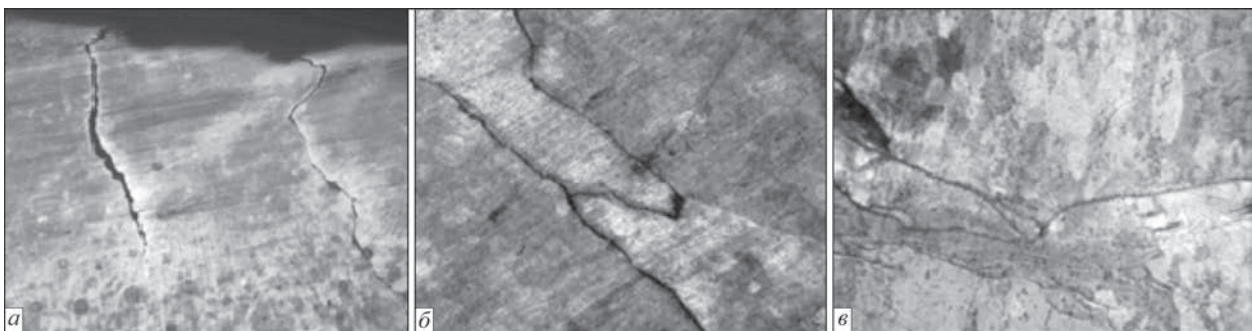


Рис. 3. Мікроструктура зварних з'єднань, отриманих АДЗ з присадкою МНЖКТ 5-1 (а, б) та ЕПЗ (в): а – поширення тріщин від поверхні вглиб шва ( $\times 50$ ); б – тріщини в центральній частині шва ( $\times 200$ ); в – потовщення границь зерен в кореневій частині шва, можливо, евтектика  $Cu + C_2O$  ( $\times 400$ )

ню дрібнокристалічної первинної структури з мінімальною шириною міжкристалічних границь. Відомо, що алюміній відноситься до елементів, розчинних в міді, його домішки в малих концентраціях не можуть бути виявлені під мікроскопом, оскільки вони входять в твердий розчин. Введення в шов до 1 % алюмінію (АД-0) практично не змінює його структуру, але при цьому підвищується твердість металу шва, яка досягає  $HV1 - 1030...1050$  МПа. Зона термічного впливу структурно не виражена і являє собою великі зерна неправильної форми з двійниковою будовою. В результаті проведення металографічних досліджень структури зварних з'єднань, отриманих на мідному сплаві М1 з використанням легуючих вставок зі сплаву АД-0, поряд з позитивним ефектом від введення алюмінію в шов (істотне зниження числа і розмірів пор) були виявлені мікротріщини, розташовані по межах зерен. Це, швидше за все, пов'язано з появою на границях зерен неміцних сполук з низькою пластичністю, в даному випадку – евтектика або суміші  $\alpha(Cu) + Cu_2O$  (рис. 4, а). У більшості випадків при обмеженій взаємній розчинності міді і алюмінію надзвичайно важко уникнути утворення стійких інтерметалідних фаз, які мають високу твердість і крихкість. Для з'ясування хімічного складу цих сполук був використаний метод растрової електронної мікроскопії. При проведенні кількісного аналізу хімічного складу металу зварного з'єднання було виявлено підвищений (до 2,5 %) вміст алюмінію. З робіт Агаркова В.Я. та інших авторів [5, 6] відомо, що подальше збільшення вмісту алюмінію знижує міцність металу шва. Були проведені технологічні заходи по зменшенню масової частки алюмінію в зварному з'єднанні шляхом зменшення з 0,1 до 0,05 мм товщини легуючої вставки. Повторний аналіз хімічного складу потовщених границь зерен показав вміст алюмінію на рівні 0,56...0,77 % (рис. 4, б). Мікротріщин, розташованих по межах зерен, також не було виявлено.

Вочевидь, що змінюючи масову частку алюмінію в литій зоні шва, можливо управляти параметрами первинної структури, і, як наслідок, кінцевої мікроструктури металу шва. Застосування при ЕПЗ міді вставок з титанового сплаву ВТ1-0 також істотно вплинуло на структуру і твердість отриманих швів. Структура шва складається зі світлої матриці і великої кількості дисперсних виділень (рис. 4, в). Кількість виділень в центрі шва більша, ніж у лінії сплавлення. Матриця являє собою твердий розчин на основі міді, а дисперсні виділення, можливо, титаніти міді. На зразках зі вставкою з титану ВТ1-0 хімічним аналізом (растрова електронна мікроскопія) показано, що елементний склад по глибині зварного шва не змінюється, також як і при легуванні алюмінієм. Метал шва містить 0,89...1,23 % Ті (решта – мідь).

Відзначається збільшення мікротвердості в корені шва в порівнянні з його середньою частиною. На всіх зварених з використанням легуючих вставок зразках підвищується твердість металу шва. Ширина ділянок знеміцнення не має помітного розвитку. Слід зазначити, що перепад по твердості в характерних зонах як для дугового, так і для електронно-променевого швів сумірний, чого не можна сказати про їх ширину (рис. 5).

Випробування на статичний розтяг зразків Мі-12 при температурі +20 °С підтвердили, що наявність в стику легуючих вставок з АД-0 і ВТ1-0 не погіршує рівень конструктивної міцності, типовий для з'єднань, отриманих на міді М1 за допомогою ЕПЗ. Значення тимчасового опору і межі плинності зварних з'єднань та основного металу незначно відрізняються один від одного. Більш високі значення межі міцності на відрив модифікованого титаном зварного з'єднання можуть бути пояснені ступенем подрібнення і однорідністю зерна в литій зоні, а також відсутністю дефектів. Випробування металу зварних з'єднань на ударну в'язкість також не виявили суттєвих погіршень механічних властивостей металу шва і ЗТВ у порівнянні з основним металом (рис. 6).

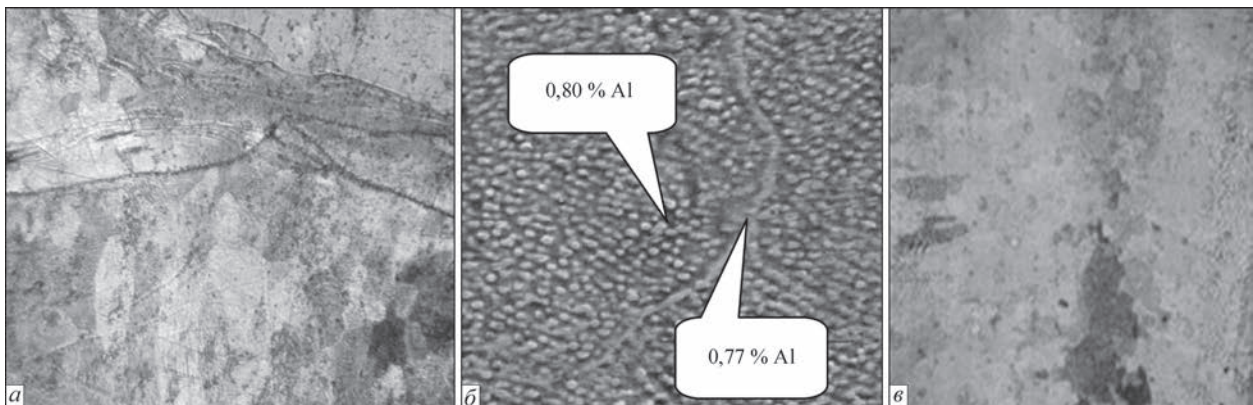


Рис. 4. Мікроструктура зварного з'єднання, отриманого ЕПЗ на міді М1 зі вставкою АД-0: а – корінь шва ( $\times 400$ ); б – середня частина шва ( $\times 2020$ ); в – ВТ1-0, верхня частина шва ( $\times 100$ )

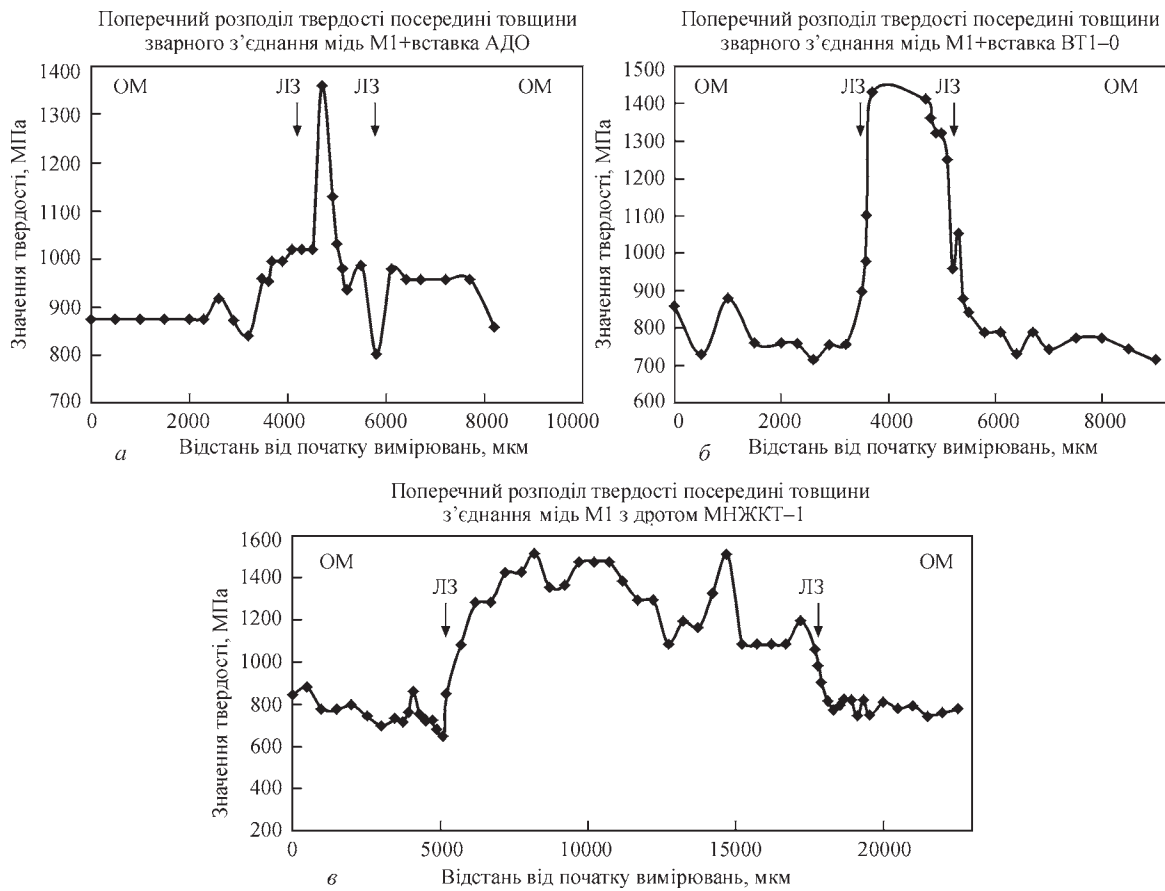


Рис. 5. Порівняльні показники розмірів і рівня мікротвердості: а, б – електронно-променеві шви; в – аргонодуговий шов

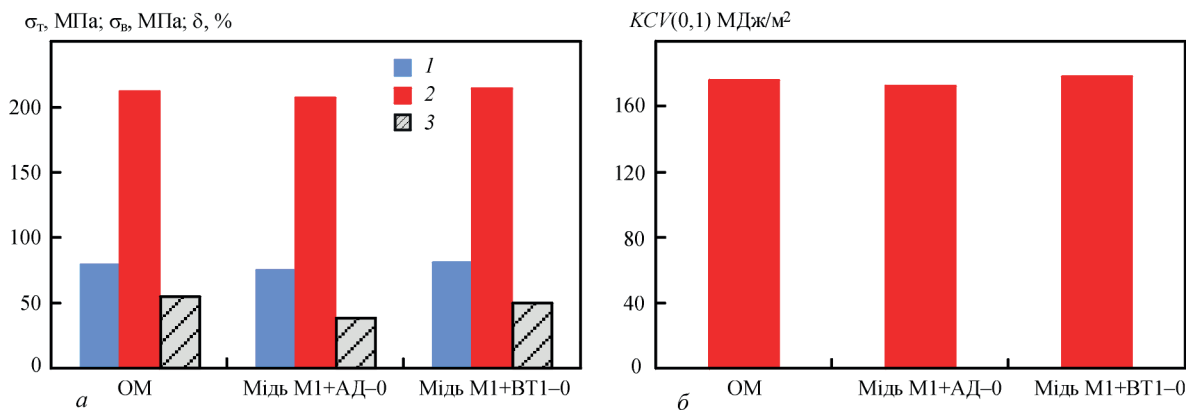


Рис. 6. Випробування зварних з'єднань і основного металу: а – статичний розтяг (Мі-12): 1 –  $\sigma_t$ , 2 –  $\sigma_b$ , 3 –  $\delta$ ; б – ударний вигин (Мі-50)

Фрактографічний аналіз проводився з використанням растрового електронного мікроскопа (РЕМ). В районі дефектів, розташованих на границі сплавлення, характер зламу змішаний зі ступенями відколів і виривів по межах зерен і з комбінацією мікропор («ямкового» рельєфу) і гребенів вузького відриву (рис. 7, а, б). Поверхня зламу має в'язкий характер руйнування протяжністю 100...150 мкм з ямками різних розмірів (1...15 мкм). Усередині ямок видно частинки, на яких виникли пори (рис. 7, в). На зразках, легованих алюмінієм, детальні дослідження показали, що в зламі зразків є ділянки, зруйновані за механізмом, що відрізняється більш низькою енерго-

ємністю руйнування в порівнянні з в'язким. Саме останній є причиною деякого зниження межі міцності металу шва в порівнянні з межею міцності основного металу. Дія титану більш збалансовано впливає на структуру металу шва при його модифікуванні, сприяє формуванню більш однорідної дрібнокристалічної структури і переносить місце руйнування при статичному навантаженні зразків в основний метал. Вид зламів ударних зразків, легованих титаном, характеризується в'язким внутрішньозеренним руйнуванням на ділянці магістрального розвитку тріщини (рис. 7, з). Зменшення розмірів зерен обмежує мікротріщину ефективними бар'єрами – межами зерен і криста-

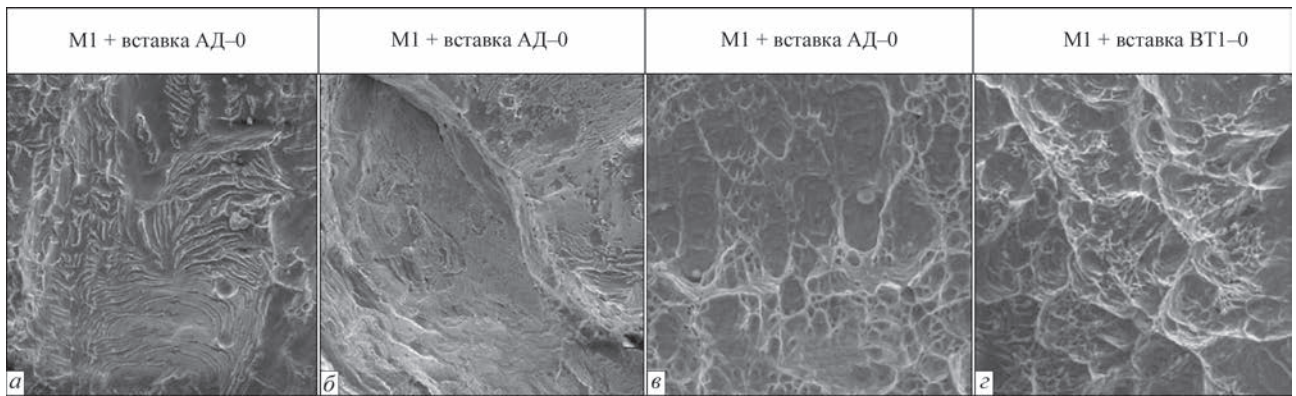


Рис. 7. Мікрофрактографії фрагментів зламів в різних зонах зварного з'єднання, РЕМ: *a* – зона магістрального розвитку тріщин Mi-50 ( $\times 300$ ); *b* – центр зразка Mi-12 ( $\times 300$ ); *e* – зона магістрального розвитку тріщин Mi-50 ( $\times 2020$ ); *z* – зона магістрального розвитку тріщин Mi-50 ( $\times 500$ )

літів. Внаслідок цього мікротріщина, що зародилася, залишається в межах докритичних розмірів або змінює свій напрямок при подальшому поширенні під впливом зовнішніх сил. Таким чином, результатами роботи показана можливість застосування фрактографічного аналізу всіх зон зварного з'єднання як одного з інструментів комплексного аналізу їх якості та міцності.

Підвищення міцності та зниження ступеня знеміцнення швів і зварних з'єднань можна пояснити подрібненням структури швів при зварюванні з вставками титану і алюмінію. Вид зламу по пришовній зоні і по основному металу практично ідентичний, що свідчить про плавний перехід від зони перегріву до основного металу через неявно виражену зону термічного впливу.

Вивчення реальних умов експлуатації фурми для кисневого дуття показує, що в її головній частині, що знаходиться поблизу реакційних зон конвертора з температурою 2700...2900 °С, виникають великі термічні напруги, викликані нерівномірністю нагріву різних ділянок вузла. Сопла головки інтенсивно охолоджуються водою та киснем, а наконечник фурми, навпаки, нагрівається тепловим випромінюванням ванни рідкого металу. Саме термічні напруги поряд з механічними навантаженнями (реакція віддачі витікаючих з сопел головки струменів кисню) викликають руйнування зварних швів, що з'єднують сопла з наконечником. Тому для збільшення терміну служби головок фурм необхідно максимально знизити градієнт температури між соплами та наконечником. Останнє можливо в разі, якщо метал шва буде близький по теплопровідності до основного металу.

Спільно з фахівцями Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України була розроблена методика досліджень теплопровідності зон зварних з'єднань, отриманих на міді M1 методами АрДЗ та ЕПЗ з застосуванням легуючих вставок та конструкція циліндричного зразка для проведення вимірювань.

При проведенні вимірювань теплопровідності металів був застосований відносний (порівняльний) метод, який базується на тому, що однакова кількість тепла проходить крізь зразок з вже відомою теплопровідністю (еталонний), розташований послідовно із досліджуванним зразком. Тепловий потік розраховується за градієнтом температур на еталонному зразку [11]. Як правило, в лабораторному спеціалізованому обладнанні використовується схема з двома еталонними зразками, яка наведена на рис. 8.

Між зразком, теплопровідність якого треба визначити (3), та джерелом тепла (1) розміщують еталонний зразок з відомою теплопровідністю (2). З іншого боку вимірюваного зразка розміщений другий еталонний зразок (4), що знаходиться у контакті з холодильником (5). Похибка вимірювань буде тим менша, чим краще контакт між контактуючими поверхнями. За допомогою чотирьох термопар, під'єднаних до еталонного зразку та зразків, що вимірюються, здійснюють вимірювання температур.

Для мінімізації контактної опору на всі поверхні еталонів та зразка нанесено спеціальний термоінтерфейс (металевий сплав на основі галію), який при кімнатній температурі

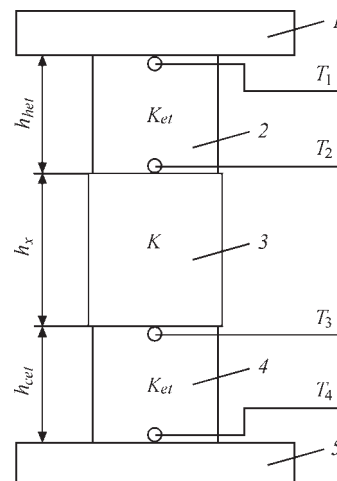


Рис. 8. Схема вимірювання теплопровідності з двома еталонними зразками (опис 1–5 див. у тексті)

знаходиться у стані в'язкої рідини (пасти), яка змочує контактні поверхні. Системою комп'ютерного моніторингу в режимі реального часу фіксуються показники чотирьох термопар. Перша термопара розташована в тонкому пазі на верхній поверхні гарячого еталона безпосередньо під нагрівачем. Друга термопара розташована в тонкому пазі на нижній поверхні гарячого еталона. Середнє арифметичне значення показів першої та другої термопари є температурою гарячого еталона. Третя та четверта термопари зафіксовані відповідно в пазах на верхній та нижній поверхнях холодного еталона. Як і у попередньому випадку, середнє арифметичне їх показів є температурою холодного еталона. Середнє значення показників другої та третьої термопари визначає температуру вимірюваного зразка. При визначенні теплопровідності досліджуваного зразка температура нагрівача не перевищує 30 °С. Формула для коефіцієнту теплопровідності  $K_x$  зразка висотою  $h_x$  та площею поперечного перерізу  $S_x$  враховує наявність обох еталонів і покази чотирьох термопар:

$$K_x = \frac{K_{et} S_{et} h_x}{2 S_x (T_2 - T_3)} \left( \frac{T_1 - T_2}{h_{het}} - \frac{T_3 - T_4}{h_{cet}} \right),$$

де  $h_{het}$  та  $h_{cet}$  – висота відповідно гарячого і холодного еталонів;  $S_{et}$  – площа їх поперечного перерізу;  $K_{et}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу еталона.

Вимірювання відбувається після виходу вимірювальної системи на стаціонарний режим, значення коефіцієнта теплопровідності зразка усереднюється по чотирьом дослідим. Під час пробних тестувань установки та методики на еталонних зразках з відомим коефіцієнтом теплопровідності відносна похибка вимірювань не перевищувала 5 %.

Результати вимірювань коефіцієнта теплопровідності зразків міді М1 з різними типами зварних з'єднань за вказаною вище формулою наведено в таблиці.

Отримані результати вимірювань були використані при комп'ютерному моделюванні температурного поля, що виникає в зоні зварного з'єднання в умовах експлуатації мідних фурм. Результати обчислень перепаду температури в серединній лінії шва та на периферії розрахункової області показали значну перевагу з'єднань, отриманих ЕПЗ з легуванням алюмінієм АД-0 з точки зору макси-

**Значення коефіцієнтів теплопровідності металу зварного шва**

Метод зварювання	$K_x$ , Вт/(м·К)
Матеріал корпусу фурми М1	420,53
АрДЗ з присадним дротом МНЖКТ5-1	181,78
ЕПЗ з легуючою вставкою з алюмінієвого сплаву АД-0 товщиною 0,05 мм	366,60
ЕПЗ з легуючою вставкою з титанового сплаву ВТ1-0 товщиною 0,05 мм	197,98

Примітки. Матеріал корпусу фурми М1;  $h_{зразка} = 10$  мм;  $d_{зразка} = 10^{+0,1}$  мм.

мального зниження градієнту температури між соплами та наконечником реальної фурми.

**Висновки**

1. Результати проведених металографічних досліджень засвідчили перспективність використання легуючих вставок при виробництві деталей мідних частин фурм за допомогою ЕПЗ.

2. Механічні випробування та фактографічний аналіз зварних з'єднань підтвердили, що наявність в стику вставок АД-0 і ВТ1-0 не погіршує рівень конструктивної міцності, типовий для електронно-променевих з'єднань, отриманих на міді М1.

3. У кореневій частині отриманих швів відзначається хімічна неоднорідність, притаманна ЕПЗ з некрізним проплавленням. Для виведення можливих кореневих дефектів шва із зони дії експлуатаційних навантажень в конструкції мідних фурм виправдане застосування «замкового» з'єднання.

4. Поряд з позитивним ефектом від введення ВТ1-0 (значним зниженням рівня пористості при високих механічних показниках) рекомендувати його в якості легуючого елемента при ЕПЗ складових частин фурм неприйнятно через невисокий коефіцієнт теплопровідності металу зварного шва, сумірний за величиною з аргонодуговим швом (присадний дріт МНЖКТ5-1).

**Список літератури**

1. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. (1987) *Електронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка.
2. Агарков В.Я., Трофимова К.Г. (1983) Пористость сварных швов при электронно-лучевой сварке меди. *Технология, организация труда, производства и управления. Сер. Технология, организация и механизация механосборочного и сварочного производства*, **12**, 1–4.
3. Назаренко О.К., Агарков В.Я., Иконников В.И. (1986) Влияние способа обработки кромок на образование пор в шве при электронно-лучевой сварке. *Автоматическая сварка*, **2**, 21–25.
4. Агарков В.Я. (1982) Пористость в электронно-лучевых сварных швах (Обзор). *Там же*, **2**, 63–68.
5. Илюшенко В.М., Лукьянченко Е.П. (2013) *Сварка и наплавка меди и сплавов на ее основе*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка».
6. Зареченский А.В., Агарков В.Я., Колечко А.А. и др. (1980) Электронно-лучевая сварка головок фурм кислородного конвертора. *Автоматическая сварка*, **10**, 68–69.
7. Stummer, M., Stütz, M., Aumayr, A., Enzinger, N. (2018) Electron beam welding of copper using plasma spraying for filler metal deposition. *Welding in the World*, **62**, 1341–1350. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-018-0637-z>
8. Enzinger, N., Loidolt, P., Wiednig, C. et al. (2017) Electron beam welding of thick-walled copper components. *Science and Technology of Welding and Joining*, **22**, **2**, 127–132. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1204516>
9. Kanigalpula, P.K.C., Jayapura, S., Pratihari, D.K., Jha, M.N. (2018) Experimental investigations, input-output modeling, and optimization of spiking phenomenon in electron beam welding of ETP copper plates. *Measurement*, **129**, 302–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.040>
10. Kanigalpula, P.K.C., Chatterjee, A., Pratihari, D.K. et al. (2015) Effects of Electron Beam Welding on Microstructure, Microhardness, and Electrical Conductivity of Cu–Cr–Zr Alloy Plates. *J. of Materials Engineering and Performance*, **24**, 4681–4690. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-015-1790-9>
11. Волков Д.П., Короблев В.А., Заричняк Ю.П. (2006) *Методические указания к лабораторным работам по курсу «Теплофизические свойства веществ»*. СПб, ГУ ИТМО.

12. (1986) *Теория сварочных процессов*. Фролов В.В. (ред.). Москва, Машиностроение.

References

1. Nazarenko, O.K., Kajdalov, A.A., Kovbasenko, S.N. et al. (1987) *Electron beam welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Agarkov, V.Ya., Trofimova, K.G. (1983) Porosity of welds in electron beam welding of copper. In: Technology, organization of labour, production and monitoring. Ser.: *Tekhnologiya, Organizatsiya i Mekhanizatsiya Mekhanosborozhnogo i Svarozhnogo Proizvodstva*, **12**, 1–4 [in Russian].
3. Nazarenko, O.K., Agarkov, V.Ya., Ikonnikov, V.I. (1986) Influence of method of edge preparation on pore formation in weld during electron beam welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 21-25 [in Russian].
4. Agarkov, V.Ya. (1982) Porosity in electron beam welds (Review). *Ibid.*, **2**, 63–68 [in Russian].
5. Ilyushenko, V.M., Lukyanenko, E.P. (2013) *Welding and surfacing of copper and alloys on its base*. Kiev, IAW [in Russian].
6. Zarechensky, A.V., Agarkov, V.Ya., Kolechko, A.A. et al. (1980) Electron beam welding of tops of lances of oxygen-blown vessel. *Avtomatich. Svarka*, **10**, 68–69 [in Russian].
7. Stummer, M., Stütz, M., Aumayr, A., Enzinger, N. (2018) Electron beam welding of copper using plasma spraying for filler metal deposition. *Welding in the World*, **62**, 1341–1350. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-018-0637-z>
8. Enzinger, N., Loidolt, P., Wiednig, C. et al. (2017) Electron beam welding of thick-walled copper components. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **22**, **2**, 127–132. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1204516>
9. Kanigalpula, P.K.C., Jaypuria, S., Pratihari, D.K., Jha, M.N. (2018) Experimental investigations, input-output modeling, and optimization of spiking phenomenon in electron beam welding of ETP copper plates. *Measurement*, **129**, 302–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.040>
10. Kanigalpula, P.K.C., Chatterjee, A., Pratihari, D.K. et al. (2015) Effects of electron beam welding on microstructure, microhardness, and electrical conductivity of Cu–Cr–Zr alloy plates. *J. of Mater. Eng. and Performance*, **24**, 4681–4690. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-015-1790-9>
11. Volkov, D.P., Korablev, V.A., Zarichnyak, Yu.P. (2006) *Study guides for laboratory works on course "Thermophysical properties of substances"*. St.-Petersburg, GU ITMO [in Russian].
12. (1986) *Theory of welding processes*. Ed. by V.V. Frolov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

INVESTIGATION OF STRUCTURE, MECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ELECTRON BEAM MODIFIED WELDS ON COPPER PARTS OF TUYERES

V.M. Nesterenkov<sup>1</sup>, V.I. Zagornikov<sup>1</sup>, Yu.V. Orsa<sup>1</sup>, S.D. Zabolotny<sup>2</sup>, A.S. Belyaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.

<sup>2</sup> V.M. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, 2, Avtozavodskaya str., 04074, Kiev, Ukraine.  
E-mail:alcon@ism.kiev.ua

The study of real operating conditions of the tuyere for oxygen blasting shows that in its head part, located near reaction zones of the converter, large thermal stresses arise caused by non-uniform heating of different parts of the unit. The nozzles of the head are intensively cooled by water and oxygen, and the tip of the tuyere, on the contrary, is heated by thermal radiation of the liquid metal pool. Namely, thermal stresses along with mechanical loads (reaction of the return effect from oxygen jets flowing from the nozzles) cause premature destruction of the welds joining the tuyere nozzles with its tip. The need in developing electron beam welding of components of copper tuyeres is predetermined by disadvantages of using the traditional method of their welding – argon-arc method, which does not provide satisfactory properties of welded joints and their stability during operation of a product. The use of electron beam welding in the manufacture of tuyere heads for oxygen blasting allows increasing their service characteristics by alloying welding pool with the elements, having a deoxidizing effect on liquid copper. At the same time in order to increase the service life of tuyere heads it is necessary to reduce the level of thermal stresses in them. The latter becomes possible if the weld metal in terms of thermal conductivity is as close as possible to the base metal. The paper presents the results of mechanical tests of electron beam welded joints produced on M1 copper using different alloying inserts. On the basis of studies of microstructure and character of fractures of the modified electron beam welds, the influence of alloying inserts on their operational properties was established. Together with the specialists from the V. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, a procedure for conducting investigations on thermal conductivity of welded joints was developed and measurements of thermal conductivity coefficients for the joints produced on M1 copper by AAW and EBW methods using alloying inserts was performed. Computer simulation of the temperature field arising in the areas of welded joints in the conditions of operation of copper tuyeres was also performed. 12 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: electron beam welding, weld modification using alloying inserts, metallographic and factual examinations, thermal conductivity, porosity

Надійшла до редакції 15.02.2021

II МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

6–10 вересня 2021 р.

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор  
ПрАТ «УкрНДІНК»



Офіційний спонсор  
ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150  
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50  
[journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[posypaiko.yurii@gmail.com](mailto:posypaiko.yurii@gmail.com)  
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2021>