

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОВОГО КЛАПАНА ЗІ СПЛАВУ Mo–Ti–Zr

В.І. Загорніков, В.М. Нестеренков, К.С. Хрипко, О.М. Ігнатуша

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України, 03130, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: zagornikov@technobeam.com.ua

Розглядаються технологічні прийоми електронно-променевого зварювання, застосування яких дозволило б отримати необхідну якість з'єднань деталей газового клапана зі сплаву Mo–Ti–Zr (TZM), що застосовується у важких умовах атомної промисловості. Відомо, що для одержання зварного з'єднання з відносно високими показниками пластичності вміст кисню не повинен перевищувати тисячних часток відсотка. Для зварних конструкцій застосовують сплави, отримані вакуумно-дуговою та електронно-променевою плавкою. Вони мають значно меншу схильність до утворення пористості у зварних з'єднаннях, ніж аналогічні сплави, виготовлені методами порошкової металургії. Такі сплави можна зварювати, але не завжди ці з'єднання можна використовувати в умовах динамічних навантажень. При виборі оптимальної техніки зварювання деталей газового клапана були враховані технічні вимоги до підготовки кромок, якості зварних з'єднань, наявності відповідного обладнання і технологічного оснащення. Виявлені під час досліджень проблеми складання і подальшого зварювання деталей газового клапана зі сплаву Mo–Ti–Zr (TZM) призвели до потреби змінити конструкцію з'єднань. У результаті запропоновано схему зварювання деталей газового клапана, що використовує відбортовку кромок зварюваного стику. Це призвело до оптимізації форми провару. Запропоновані параметри зварювання і геометрія відбортовки дозволили за рахунок зниження глибини проплавлення в умовах швидкого відведення тепла зменшити ступінь насичення металу шва газами та, як наслідок, отримати достатньо якісні зварні з'єднання. Крім того, при всій різноманітності застосованих під час досліджень технологічних прийомів, доведено пріоритет правильно обраної конструкції кільцевого стику і точності складання зварювального вузла. Бібліогр. 16, табл. 3, рис. 10.

Ключові слова: сплав Mo–Ti–Zr (TZM), електронно-променеве зварювання, мікроструктура, пористість, газовий клапан, відбортовка зварюваних кромок

Вступ. Молібден і його сплави мають багато унікальних характеристик, тому вони незамінні в таких областях як аерокосмічна промисловість, енергетика, хімічний захист, металургія. Перспективним є застосування сплавів на основі молібдену в атомній техніці в майбутніх термоядерних реакторах, оскільки ці сплави, поряд із високою міцністю і опором втоми при високих температурах, мають хороші теплофізичні властивості та не активуються при опроміненні. Використання молібдену, як основи сплаву конструкційного призначення, стримується двома його недоліками – легкою окислюваністю при температурах вище 500...700 °C і пониженою пластичністю при кімнатній температурі [1]. Легування молібдену практично не допомагає усунути перший недолік, але дозволяє суттєво підвищити температуру рекристалізації, міцність і опір повзучості при високих температурах, а при дисперсному зміцненні, наприклад, оксидом лантану, підвищити жароміцність та покращити пластичні властивості (зменшити поріг крихкості).

Відомо, що наявність домішок в основному металі в кількостях, що значно перевищують їх границю розчинності, є об'єктивною перешкодою для отримання якісних зварних з'єднань на молібде-

нових сплавах [2, 3]. Якість зварних з'єднань, механічні характеристики швів, і особливо їх низькотемпературна пластичність дуже чутливі до структурного стану вихідного матеріалу. Для отримання достатньо високої пластичності зварного з'єднання, особливо при низьких температурах, необхідно, щоб основний метал мав однорідну вихідну структуру і досить високу стійкість проти переходу в крихкий стан. Це може бути досягнуто вибором найбільш сприятливих умов попередньої гарячої обробки металу, що зварюється (наприклад, режиму прокатки для листових сплавів), а також термічної обробки перед зварюванням (наприклад, для молібденових сплавів при температурі 1400...1800 K залежно від їх складу) [4].

Слід врахувати й той факт, що будь-які сплави тугоплавких металів VIa підгрупи періодичної таблиці (у тому числі й сплави молібдену), одержувані методами вакуумно-дугового чи електронно-променевого переплаву, мають значно меншу схильність до утворення пористості в зварних з'єднаннях, ніж аналогічні сплави, виготовлені методами порошкової металургії. Зазвичай це викликано тим, що порошкові метали мають підвищений вміст газових домішок. Однак у зварних з'єднаннях на порошкових сплавах навіть із мен-

Загорніков В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-0456-173X>, Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, Хрипко К.С. – <https://orcid.org/0000-0002-4893-5441>

© В.І. Загорніков, В.М. Нестеренков, К.С. Хрипко, О.М. Ігнатуша, 2024

шим вмістом домішок, ніж у сплавах традиційних способів виробництва, як правило, спостерігається пористість. У процесі зварювання газу можуть швидко розширюватися у ванні розплаву, що серйозно погіршує якість зварних з'єднань молібдену і молібденових сплавів [5–7].

Застосування порошкового молібденового сплаву системи Mo–Ti–Zr (TZM) стримується через його низьку технологічність і особливо зварюваність. Зварний шов і зона термічного впливу (ЗТВ) відносно широкі, а зерна після зварювання сильно укрупнені, тому домішки проникнення, такі як С, N і О, повністю дифундують та концентруються на межах зерен, що призводить до значного послаблення міцності зв'язку на межах зерен. При сумісному впливі власної крихкості матеріалів і сегрегації домішок на межах зерен чутливість до зварювальних тріщин висока, а міцність і пластичність з'єднань молібдену та його сплавів низькі [8, 9]. При практично досяжному навіть найнижчому рівні домішок-газів у шві неможливо забезпечити достатню пластичність зварних з'єднань із характерною для них крупнокристалічною будовою і усунути схильність до утворення холодних тріщин. Необхідність отримання якісних зварних з'єднань вимагає застосування сплавів, легованих дорогими елементами, що зменшують шкідливий вплив домішок на зварні шви (наприклад, розкислювачами – титаном, цирконієм та ін.), а також покращують їх структуру (наприклад, ренієм) [10]. Тому часто деталі чи конструкції із молібдену і молібденових сплавів доводиться виготовляти методом порошкової металургії, а не зварюванням з частин.

Через те що найбільш досконалий захист шва від газів атмосфери досягається при електронно-променевому зварюванні (ЕПЗ), цей метод найбільш ефективний для з'єднання хімічно активних тугоплавких металів, оскільки він виконується у вакуумі і забезпечує відносно мале тепловкладання. Для тугоплавких і хімічно активних металів велике значення має можливість їхнього попереднього очищення за рахунок дегазації у вакуумі. Для зменшення забруднення металу шва зварювання зазвичай виконують без присадного металу.

Відносно мала ширина ЗТВ стає великою перевагою при зварюванні тугоплавких металів типу молібдену. Шов та пришовна зона (ділянка рекристалізації) значно менш міцні і мають набагато більш високу температуру пластично-крихкого переходу, ніж сам основний матеріал. Ця різниця в міцності призводить до концентрації деформації в

зоні зварювання, а тривісне напруження, створюване обмеженням основного металу, може ініціювати руйнування. Слід зауважити, що хоча електронно-променеве зварювання у вакуумі полегшує видалення домішок і газів, але збільшує випаровування легуючих елементів.

Експериментальні роботи присвячені переважно з'ясуванню ролі умов і параметрів зварювання або точніше, їх ролі у підвищенні якості шва (відпускнуї крихкості, обмеження безперервного зростання зерна). Відомості, що наводяться в літературі, про вплив швидкості нагрівання та охолодження на низькотемпературну пластичність молібденових сплавів суперечливі. Моріто та ін. [11] порівняли пластичність ЗТВ при зварюванні молібденових сплавів (Mo > 99,9 мас. %) за двох умов термічної обробки, тобто при охолодженні в печі та з'ясуванню швидкому охолодженні за допомогою гарту. Встановлено, що швидке охолодження після зварювання може суттєво знизити пластичність ЗТВ зварного з'єднання молібденових сплавів, головним чином тому, що зерногранична сегрегація у ЗТВ більша при швидкому охолодженні загартуванням. Штютц та ін. [12] систематично вивчали вплив параметрів процесу ЕПЗ на розміри зони плавлення та ЗТВ, чутливість до пор та тріщин у стиковому зварному з'єднанні зі сплаву TZM завтовшки 2 мм.

Результати показують, що утворення пор серйозно проявляється при надмірному підведенні тепла при зварюванні. Несуттєве (незначне за ступенем прояву) підведення тепла може не тільки пригнічувати пори, а й, очевидно, зменшити розмір зерна в зоні плавлення.

У [5] встановлено, що хоча повністю уникнути пороутворення при зварюванні порошкових металів не вдається, але при лімітованому підведенні тепла пористість в зоні плавлення значно знижуються. Збільшуючи швидкість зварювання і зменшуючи тепловкладання, можна значно покращити пластичність зварного з'єднання молібдену за рахунок подрібнення структури шва. Наслідком цього є значне зменшення товщини плівки оксидів MoO₂, що розташовані на межах зерен. Зменшення товщини оксидної плівки по межах зерен підвищує міжкристалітні зв'язки, а отже і пластичність [13].

Метою досліджень є розробка техніки зварювання електронним пучком кільцевих швів при з'єднанні деталей газового клапана з молібденового сплаву Mo–Ti–Zr.

Методика досліджень. При ЕПЗ з'являється можливість очистити метал від газів перед зварюванням за рахунок нагрівання кромки стику

розфокусованим електронним пучком. При цьому найбільш успішно видаляється водень, найменш – кисень і азот, і до того ж лише з поверхневих шарів металу. У [14] стверджується, що попередній прогрів стику дозволяє зменшити пори і сприятиме видаленню поверхневих забруднень адсорбованих газів, що викликають пористість, більш спокійному формуванню субструктури в зварному шві, запобігає утворенню холодних тріщин у досліджуваному сплаві за рахунок загального розширення зони майбутнього зварювання. Зазначається, що прогрівання при температурі вище 900 °С недоцільне внаслідок можливої деформації деталей та початку процесу рекристалізації.

Необхідна умова отримання якісних зварних з'єднань – це точність збирання (і фіксації) стику під зварювання. Так, при зварюванні кільцевих з'єднань із молібденових сплавів рекомендується допускати зміщення кромок не більше чим ± 50 мкм. Збирання деталей для зварювання має проводитися в особливо точних пристосуваннях. Ці пристосування повинні забезпечувати щільний притиск зварюваних кромок одна до одної, тому що для зменшення зварювальних деформацій необхідне ефективне тепловідведення [15]. Сплав Мо–Ті–Zr, який отримано методом порошкової або гранульної металургії, гарантує хімічну відповідність основних легуючих елементів і механічну міцність у стані поставки, тобто його цілком можна використовувати для технічних завдань, що не потребують переплаву металу. Але цей матеріал проблематично використовувати для конструкцій, з'єднаних електронно-променевим зварюванням.

У нашій роботі розглянуті технологічні прийоми електронно-променевого зварювання, застосування яких дозволяє отримати необхідну якість зварних з'єднань вузлів деталей газового клапана зі сплаву Мо–Ті–Zr, включно з умовами збирання деталей під зварювання. Вивчали вплив типу з'єднання деталей кільцевими швами, що виконується електронно-променевим зварюванням, на міцність та пластичність такого з'єднання. Такі з'єднання найбільш критичні з точки зору тріщиноутворення та проблематичні при спробі отримання працездатного зварного з'єднання. У роботі також порушувалися питання впливу на зварюваність газів, перш за все кисню (O_2), при різних типах з'єднання деталей газового клапана, що виконуються методом електронно-променевого зварювання.

Конструкція з'єднання ніпеля з корпусом газового клапана закріплена у складальному пристосуванні на зварювальному поворотному позиціонері (обертачі). Обертач, що входить у комплект

установки, дозволяє монтаж у двох просторових положеннях: з горизонтальною чи з вертикальною віссю обертання (рис. 1). За допомогою індикаторної стійки і індикатора годинникового типу ніпель виставлявся співвісно до осі обертання позиціонера. Відхилення було в межах 0,1 мм.

Зварювання проводилося на електронно-променевій установці типу КЛ-211, при тиску в робочому об'ємі камери не вище $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Прискорювальна напруга встановлюється на рівні 60 кВ. Використовувалась електронна оптика, розрахована на 500 мА струму електронного пучка. Вона включала металевий катод з поверхнею, що емітує, діаметром 3 мм. Експерименти проводилися при робочій відстані 250 мм від торця зварювальної гармати до лицьової поверхні виробу.

Вивчено вплив погонної енергії, а саме три фіксовані величини швидкості зварювання: 5, 10 та 15 мм/с, в діапазоні тепловкладень $q = 320 \dots 540$ Дж/мм.

Металографічні дослідження зварних проплавів проводили на оптичному мікроскопі Neophot-32 при різних збільшеннях. Розмір зерна визначали лінійним методом. Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі М-400



Рис. 1. Установа КЛ-211. Пристосування для складання та зварювання імітатора газового клапана у двох просторових положеннях: з горизонтальною (а) та з вертикальною віссю обертання (б)

Таблиця 1. Хімічний склад молібденового сплаву Mo–Ti–Zr (TZM)

Елементи	Mo	Ti	Zr	Al	Si	Cr	La	C	O ₂	N ₂
мас. %	≤99,23	≤0,53	≤0,13	≤0,046	≤0,041	≤0,013	≤0,037	≤0,031	≤0,0092	≤0,001

фірми LECO, навантаження становило 1Н, час витримки 10 с.

Склад сплаву перевірили за допомогою X-Ray Spectrometer X'Unique II – Rh 80 kV LiF220 Ge111 ТІАР. Отримані дані хімічного та газового аналізу сплаву представлені у табл. 1.

Перші пробні ЕПЗ зразки показали підвищену крихкість металу зварного з'єднання і самого основного металу. Для того щоб запобігти утворенню неприпустимих пор і холодних тріщин у досліджуваному сплаві, використовували технічні прийоми, розглянуті далі.

Було проведено первинний підбір режимів зварювання на комплекті пластин розміром 50×240×2 ÷ 5 мм з ненаскрізним та наскрізним проплавленням. Для одержання прийнятної форми лицевого валика шва проварили зразки, змінюючи параметри фокусування електронного пучка, його струму та швидкості зварювання. Відповідно до рекомендацій [14], для збільшення деформаційної здатності металу застосували попередній підігрів з'єднання. Контрольна температура поверхні була 900 °С. Вибрано наступний режим електронно-променевого нагріву зони зварювання: прискорювальна напруга 60 кВ, струм пучка 30 мА і час прогріву 12 хв.

Кожне з'єднання зварювалося окремо з наступним охолодженням у вакуумі протягом 30 хв. Після зварювання були проведені випробування зразків на механічне розтягування при температурах 20 та 1200 °С.

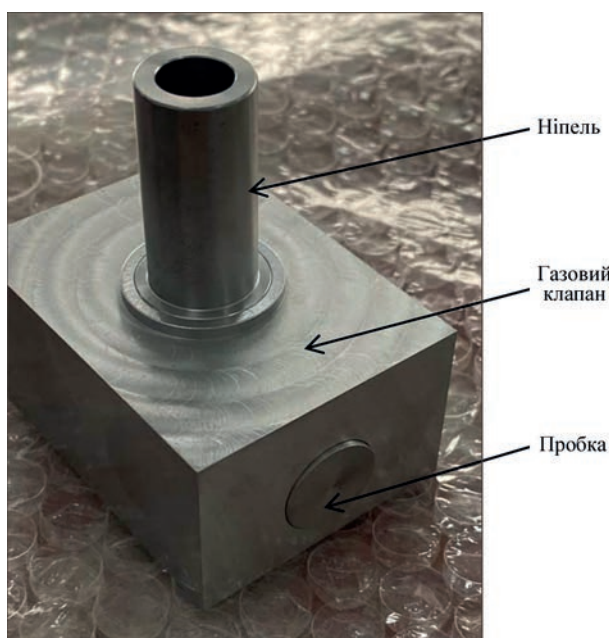


Рис. 2. Зібрані частини імітатора газового клапана зі сплаву Mo–Ti–Zr

Вивчено вплив погонної енергії зварювання. Різні зварні шви отримані шляхом зміни струму пучка від 30 до 60 мА та швидкості зварювання від 5 до 15 мм/с. Сфокусований електронний пучок нерационально використовувати, оскільки він не дозволяє отримати необхідну форму зони проплавлення. Експериментально встановлено прийнятний рівень зниження концентрації електронного пучка ±7 мА струму фокусування від його значення при гострому фокусуванні (виміряного за мінімальної потужності пучка). Оптимізація геометрії зварного шва проводилася за рахунок використання технологічної розгортки електронного пучка.

Відпрацьовано режими зварювання ніпеля з корпусом газового клапана та двох циліндричних пробок на протилежних стінках цього ж корпусу (рис. 2).

Аналіз результатів та технологічні рекомендації. Мікроструктура зварних з'єднань сплаву Mo–Ti–Zr. Внаслідок впливу термічного циклу зварювання відбувається зростання зерна в пришовній зоні, потовщення міжзеренних прошарків, збагачення їх домішками і різке збільшення крихкості металу в цій зоні. Сплав чутливий до термічних циклів зварювання і насамперед швидкості охолодження, з якою пов'язане виділення другої фази. Тому, переважно, від швидкості зварювання залежить орієнтація кристалів металу шва, форма меж між зернами і рівень залишкових напружень.

Виявили, що низьке тепловкладання ($q = 320$ Дж/мм) за рахунок збільшення швидкості зварювання призводить до значного подрібнення зерен у зоні плавлення.

Зменшення швидкості нижче 5 мм/с ($q = 540$ Дж/мм) підвищувало утворення пор. Причому пор фіксується більше в зоні сплавлення, ніж в об'ємі шва. Також формуються шви з високою «клиновидністю» провару і великою загальною шириною зони проплавлення. Зі зростанням швидкості зварювання зменшується як середній розмір пор, так і їх кількість. З іншого боку, швидкість зварювання обмежувалася, тому що зварювання зі швидкістю, що перевищує 15 мм/с, призводило до зниження стабільності формування зварного з'єднання та виникнення дефектів у вигляді коливання поверхні лицевого валика (рис. 3, в). При цьому без розгортки електронного пучка або при малій ширині розгортки, закономірно формується дуже гострий корінь шва з високою ймовірністю кореневих дефектів. При збільшенні ширини розгортки до 0,8 мм вдалося досягти компромісу між загальною

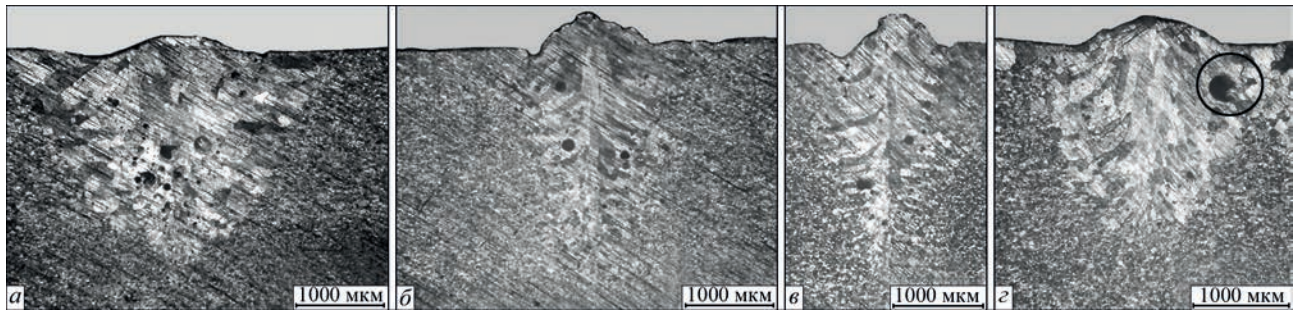


Рис. 3. Зона проплавлення ($\times 30$): *a* – $V_{38} = 5$ мм/с, $A_p = 0,8$ мм, $I_{38} = 45$ МА, $q = 540$ Дж/мм; *b* – $V_{38} = 10$ мм/с, $A_p = 0,8$ мм, $I_{38} = 55$ МА, $q = 330$ Дж/мм; *c* – $V_{38} = 15$ мм/с, $A_p = 1,6$ мм, $I_{38} = 80$ МА, $q = 320$ Дж/мм; *d* – з повторним проваром при $V_{38} = 5$ мм/с, $A_p = 0,8$ мм, $I_{38} = 40$ та 45 МА відповідно

шириною, «клиноподібністю» зони проплавлення та формою кореневої частини шва (рис. 3, *a, б*).

У всіх досліджених зварних проплавах, крім згаданих вище макропор, виявлені мікропори в металі шва. Дефекти, переважно, глобулярної форми, але трапляються також поодинокі дефекти неправильної форми (рис. 4, *a, б*). Розмір дефектів варіюється в межах 38...375 мкм.

У ЗТВ і основному металі досліджених зразків також виявлені поодинокі мікропори, а також включення різного розміру і у великій кількості. Основна маса цих включень має розмір від 2,5...5,0 мкм, досить багато включень розміром 18...20 мкм і невелика кількість великих включень обсягом 37,5...50 мкм. Твердість (HV1) включень перебуває у діапазоні 10180...12500 МПа.

Для підтвердження впливу підвищеного вмісту газових домішок в основному металі на пористість зварного шва проведені експерименти з подвійного переплаву металу. Ми виконали експерименти з подвійного переплаву металу: обидва зварювальні проходи на аналогічних параметрах, але перший прохід на 0,8...0,9 потужності пучка при другому проході. Тобто другим проходом ми повністю переплавляли метал шва від першого проходу і заціпали невеликий прошарок раніше не переплавленого основного металу. Як і очікувалося, у центрі метал шва після повторного переплаву кількість пор помітно зменшилася, але поблизу зони сплавлення їх, як і раніше, багато (рис. 3, *г*).

Мабуть, незважаючи на деяке «рафінування» метал шва внаслідок першого проходу, висока кон-

центрація газів у граничному прошарку та частково дифузія газів з основного металу, як і раніше, ініціюють розвиток пор, а підвищені зазори – тріщин.

Структура шва у всіх досліджених випадках являє собою великі зерна, витягнуті від центра шва у напрямі тепловідведення (рис. 3). Розмір зерен у шві при швидкості зварювання 5 мм/с становить 185...250 мкм, а при швидкості 10 мм/с – 100...180 мкм. Мікроструктура шва скрізь двофазна, складається зі світлої матриці α -фази (твердий розчин на основі молибдену) і надлишкової фази у вигляді дрібних виділень неправильної форми (рис. 5, *a*).

Твердість (HV1) метал шва при швидкості зварювання 5 мм/с становить 2280...2360 МПа, а біля лінії сплавлення знижується до 2060 МПа. Твердість метал шва при швидкості зварювання 10 мм/с дещо вища – 2360...2660 МПа, а біля лінії сплавлення – відповідно 2280 МПа. Лінія сплавлення не виражена.

Мікроструктура ЗТВ двофазна з вкрапленнями включень, описаних вище (рис. 4, *б*). Розмір зерна при швидкості зварювання 5 мм/с становить 90...125 мкм, твердість (HV1) – 2210...2270 МПа, а при 10 мм/с – 60...100 мкм і 2180...2430 МПа відповідно. Структура основного металу волокниста, зберігає деформаційну текстуру, складається з двох фаз і виділень (включень), зерна не виражені (рис. 4, *в*), твердість (HV1) метал у діапазоні 2790...3220 МПа (рис. 6).

Усі зварні з'єднання газового клапана вимагають порівняно невелику глибину неповного проплавлення, а саме 3...4 мм. Зі збільшенням товщини

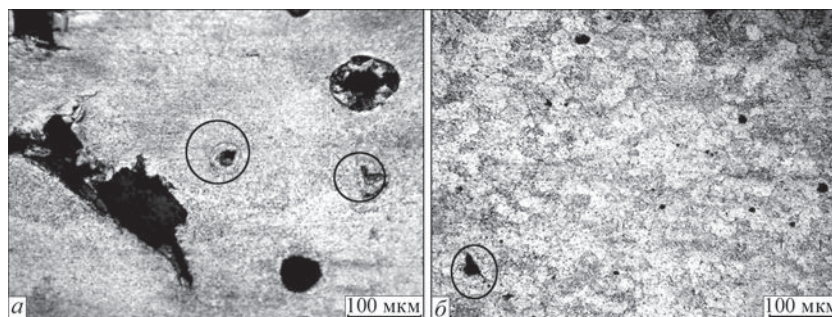


Рис. 4. Дефекти у металі шва, $\times 200$ (*a*), дефекти у металі ЗТВ, $\times 200$ (*б*)

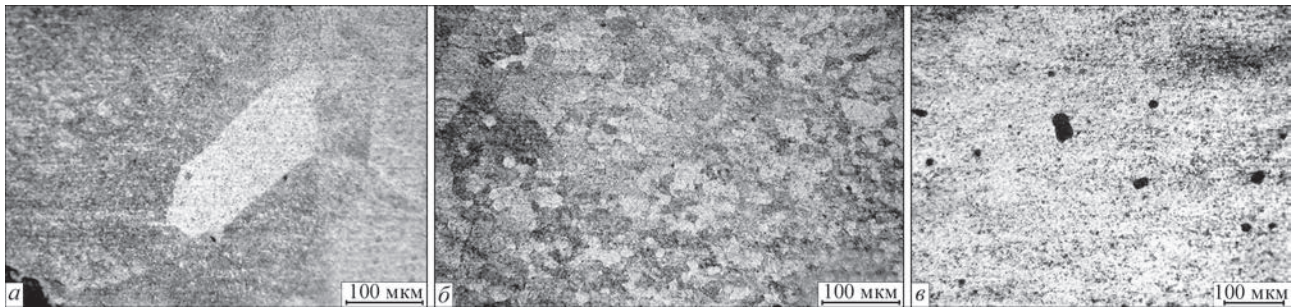


Рис. 5. Типова структура металу шва (а), металу ЗТВ (б), основного металу (в), $\times 200$

зварюваних металів виникають серйозні труднощі, пов'язані з перегріванням металу шва, збільшенням ЗТВ і, як наслідок, утворенням пор та тріщин. Застосування технологічної розгортки електронного пучка дозволило здійснити отримання необхідної форми зони проплавлення зі значно меншою схильністю до утворення пористості.

З урахуванням результатів вибору режимів на плоских зразках було проведено ряд зварювальних експериментів для підбору і відпрацювання режимів зварювання деталей газового клапана, а саме трьох з'єднань: ніпеля з корпусом клапана та двох пробок на протилежних стінках цього корпусу. Зварювали два пробкові отвори діаметром 16 мм і одне з'єднання ніпеля до отвору корпусу діаметром 20 мм. Для виключення можливих кристалізаційних тріщин вибиралися максимально короткі ділянки введення-виведення струму електронного пучка. Складання деталей реального клапана проходило в пристосуванні, що дозволяє проводити зварювання всіх деталей вузла одночасно.

Загальна послідовність приварювання фітингів до корпусу клапана. Алгоритм зварювання: наростання зварювального струму до заданого, утримання постійного значення цього струму при кутовому зварювальному русі на 360° , потім перекриття початкового відтинку і, наостанок, плавне зменшення зварювального струму. Довжина пере-

криття вибиралася з умови запобігання непровару на початковому відтинку з'єднання і для запобігання утворенню кінцевого кратера.

Параметри місцевих прихваток (відтинки по 10 мм): струм пучка – 25 мА; струм фокусування пучка – 560 мА; швидкість руху – 5 мм/с; кільцева розгортка променя діаметром 1,0 мм.

Операція підготовки попереднього нагрівання стику залишалася чинною. Для рівномірного прогрівання корпусу і ніпелю при виконанні прогріву електронний пучок зміщений від стику в бік корпусу на 8 мм. Параметри нагріву: струм пучка – 25...30 мА; струм фокусування пучка – 500...510 мА. Швидкість руху – 5 мм/с; кільцева розгортка пучка діаметром 8 мм; кількість проходів – 15; контрольна температура на поверхні – 900°C .

Після нагрівання послідовно запускалися підпрограми суцільної прихватки та повного проплавлення. Параметри суцільної прихватки: струм зварювання – 25 мА, струм фокусування – 510 мА. Швидкість зварювання – 5 мм/с. Розгортка променя – коло діаметром 1,0 мм.

Параметри режиму зварювання змінювали в таких межах: струм зварювання 30...48 мА, зварювання здійснювалося розфокусованим електронним променем, струм фокусування – 560 мА. Швидкість зварювання (обертання) 7...10 мм/с. Розгортка променя – коло діаметром 0,5...1,0 мм (див. табл. 2).

При збиранні виявилось, що величина зазора деталей газового клапана, які зварюються, досягла 0,1 мм, не відповідає вимогам, що висуваються до збирання вузлів для ЕПЗ з молібденових сплавів. Початкова умова – точність складання стику – не була забезпечена. Через збільшений зазор у стику при складанні ризик появи усадкових тріщин і корневих дефектів на ділянці виведення кратера зріс. Тим не менш, зварювання фітингів клапанів було здійснено. Повторним проваром вдалося сформувати верхній валик, але для виправлення корневих дефектів доводилося висвердлювати пробку і вставляти нову деталь з подальшим повторним зварюванням. Такий тривалий і трудо-

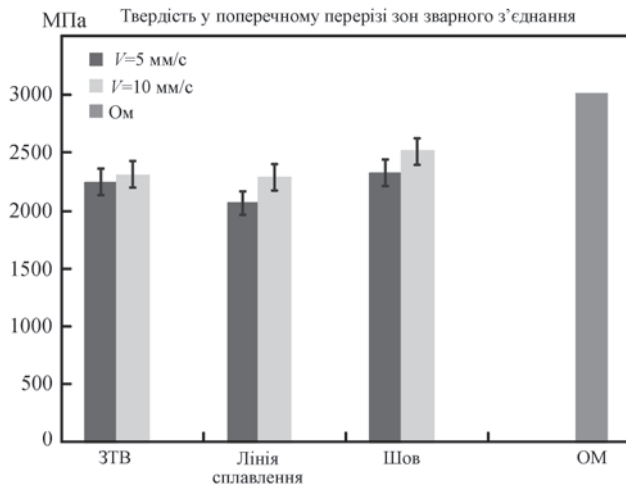


Рис. 6. Середня твердість різних зон зварного з'єднання при ЕПЗ та основного металу

Таблиця 2. Параметри режимів попереднього прогрівання і ЕПЗ деталей газового клапана

Параметри попереднього нагрівання на поверхні								
Ніпель (втулка)					Пробки			
Температура – 900 °С; Кількість проходів – 15; Швидкість обертання – 5 мм/с; Струм – 25...30 мА; Розгортка променя – коло 8,0 мм, промінь зміщений в сторону корпусу від стику на 8 мм; Струм фокусування – 500...510 мА.					Температура – 900 °С; Кількість проходів – 15 перший, 10 другий; Час нагріву – 10 хв; Швидкість обертання – 7 мм/с; Струм – 5...8 мА; Розгортка променя – коло 2,0 мм; Струм фокусування – 500 мА.			
Етапи ЕПЗ	Параметри режиму ЕПЗ							
	Ніпель (втулка)				Пробки			
	V_z , м/с	I_z , мА	I_f , мА	Розгортка променя, вигляд, розмір (мм)	V_{zv} , м/с	I_{zv} , мА	I_f , мА	Розгортка променя, вигляд, розмір
Короткі прихватки (10 мм)	5	25	560	коло, 1,0	5	25	510	коло, 1,0 мм
Суцільні прихватки	5	25	570	коло, 0,5	5	25	560	коло, 0,5 мм
Основний шов	7...10	45...48	560	коло, 0,5	10	40	560	коло, 0,5 мм
Загладжуючий прохід	12	30	700	10	12	30	700	10

місткий процес визнано нетехнологічним і надалі не розглядався.

Результати досліджень показали, що низьке тепловкладання дозволяє затримати зростання пор і зменшити розмір зерен у зоні плавлення. Тепловкладання зменшувалося за рахунок зниження струму зварювання, підвищення швидкості до певної межі та оптимізації форми і розмірів розгортки електронного пучка.

Підготовка поверхні торців зварюваних кромок для зменшення пористості є необхідною, але не достатньою. До того ж як спосіб боротьби з порами металургійного характеру попередній підігрів і переплав цього з'єднання виявилися малоефективними. Ці операції не вирішують проблеми підвищення пластичності зварного з'єднання, але не були скасовані через можливу перспективу надання позитивного впливу на швидкість протікання фазових і структурних перетворень, не погіршуючи структуру зварного шва. Потрібно було шукати інші шляхи покращення якості швів. Виниклі труднощі для формування зварних швів на деталях газового клапана сприяли необхідності зміни конструкції зварного з'єднання корпус – ніпель і корпус – пробки.

Відомо, що одним із широко застосовуваних технологічних прийомів, спрямованих на підвищення стійкості металу шва до утворення пор і кристалізаційних тріщин, є зміна форми провару (відношення ширини шва до глибини його проплавлення). Проведені дослідження показали перспективність у плані з'єднання з відборткуванням зварюваних кромок, де первинні кристаліти у процесі затвердіння розплаву стикаються не вершинами, а бічними гранями. Такі шви стійкіші проти утворення тріщин.

Етапи модернізації зварного вузла. У процесі поетапної зміни схеми збирання та конструкції зварного вузла рішення підвищення технологічності процесу зварювання було знайдено. На рис. 7,

a–в показана послідовність поетапної трансформації варіантів з'єднань, яка була здійснена в результаті проведених досліджень.

Варіант «б». Уточнено кут відхилення і розташування фокусу електронного пучка. З'явилася можливість виконати зварювання трьох стиків за одне вакуумування зварювальної камери. Але наступне зварювання деталей газового клапана, фітингів і пробок, у зв'язку із недопустимими зазорами у стику, не забезпечило необхідну герметичність, що й показали гідравлічні випробування. Тому запропоновано посадку з'єднання Н7/р6, що забезпечує невеликий гарантований натяг у з'єднанні. Операції для усунення зазора в стикових з'єднаннях перед зварюванням високоточним методом шліфування деталей газового клапана, забезпечили найбільшу гарантовану герметичність з'єднання шляхом отримання необхідної посадки.

Варіант «в» прийнятий як базовий, та креслення деталей газового клапана були виготовлені відповідно до рис. 7, в. Такий варіант спрощує позиціонування деталі перед зварюванням. Немає необхідності проводити зварювання похилим пучком, як передбачалося за однією з попередніх схем.

Усі зварні шви, виконані з «щільним» з'єднанням (без зазора в стику), мали досить стабільне формування зовнішнього валика (рис. 8).

До переваг цієї конструкції з'єднання, перш за все, можна віднести те, що вона дозволяє радикально зменшити тепловкладання при зварюванні. Застосування відборткування кромок дозволяє реалізувати найбільш сприятливе співвідношення глибини ванни до її ширини. Тобто зварювання може проводитися досить широким і неглибоким швом, при помірній концентрації електронного пучка. Наявність кореневих дефектів у цьому випадку не суттєва. Через теплофізичні властивості молібденового сплаву форма проплавлення таких

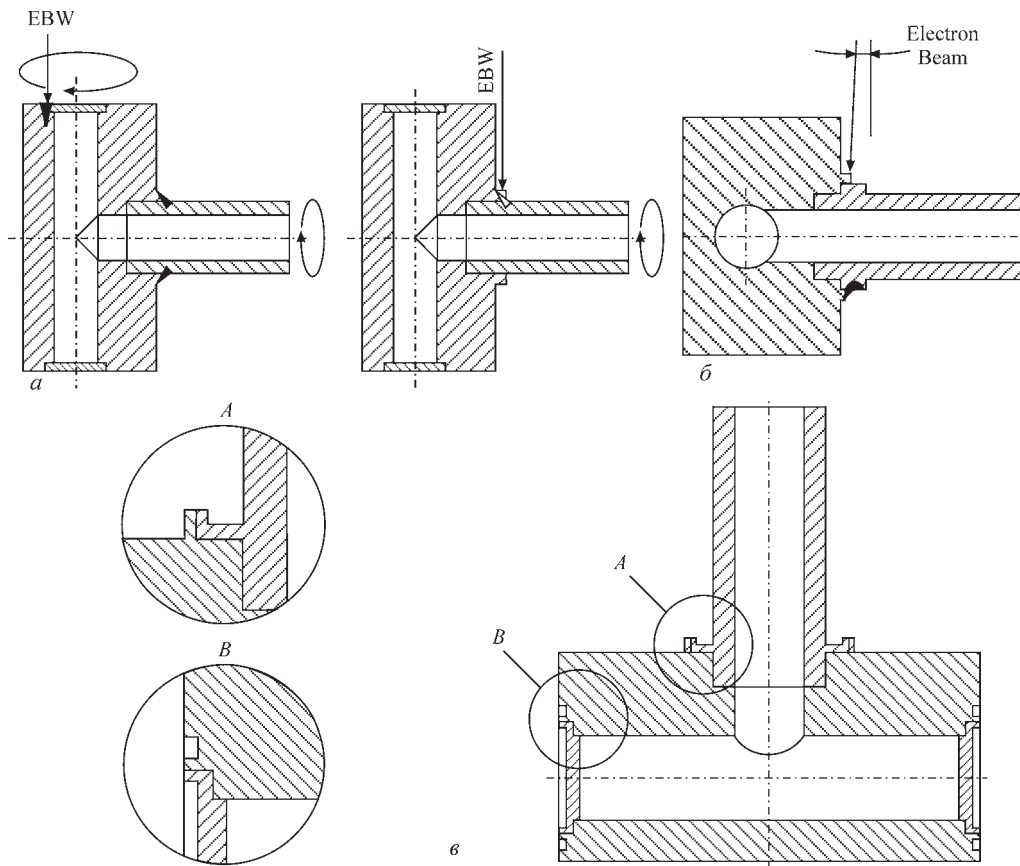


Рис. 7. Три етапи модернізації конструкції зварних з'єднань вузла: зварювання ніпеля з корпусом «в замок» замінено схемою з «коміром», що сплавляється зі стінкою ніпеля, корпус із пробками – «в замок» (а), ніпель модифіковано для зварювання похилим електронним променем (б), модернізація стиків фітингів у вигляді відбортовки кромки стику (в)

швів у поперечному перерізі залишилася скоріше клиноподібною, але зі скругленою кореневою частиною. На рис. 9 представлені форми провару на вибраних режимах зварювання.

Вибрані режими зварювання кругових швів з'єднання фітингів до корпусу клапана:

– для пробок – $V_{зв} = 10$ мм/с, струм фокусування 560 мА, розгортка пучка $A_p = 0.5...0.8$ мм, $I_w = 45...55$ мА;

– для ніпеля – $V_{зв} = 7$ мм/с, струм фокусування 570 мА, розгортка пучка $A_p = 0.8...1.0$ мм, $I_w = 30...45$ мА.

Молибден дуже чутливий до подрізів, тому слід їх уникати, а також уникати кратерів. Застосування додаткового заглажуючого проходу зменшує

можливі концентратори напружень (у тому числі подрізи) і пористість в найбільш небезпечній приповерхневій зоні. Забезпечується плавний перехід від шва до основного металу. Ширина шва виходить рівномірною, поверхня з лицьового боку гладка, дзеркальна, кратери відсутні.

Відзначається перспективність застосування режимів зварювання з регульованим розподілом щільності потужності електронного пучка по краях стику шляхом швидкої осциляції з одного крайнього положення в інше [15, 16].

Відповідно режим заглажуючих проходів по лицьовій частині зварного шва, що попередньо охолонув: $V_{зв} = 12$ мм/с, струм фокусування – 700 мА, поперечна розгортка пучка з регульованим розподілом щільності його потужності по траєкторії розгортки $A_p = 10$ мм, $I_w = 30$ мА.

До недоліків вищезазначеної конструкції можна віднести ускладнення виготовлення зварних вузлів та неможливість зварити весь вузол за одне вакуумування.

Технологічний процес з'єднання деталей газового клапану закінчувався термічною обробкою в печі для повного зняття залишкових зварювальних напружень. Режим обробки: швидкість нагрівання

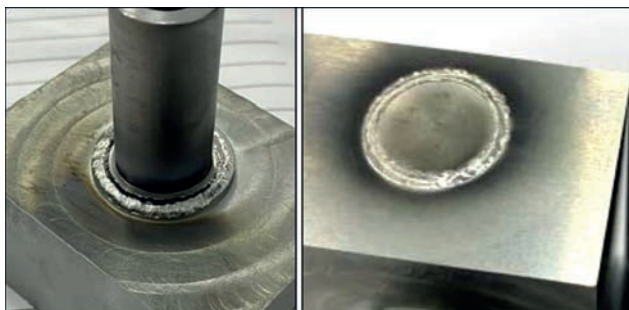


Рис. 8. Формування кільцевих швів з відбортуванням кромки, що імітують з'єднання ніпель-корпус та пробка-корпус клапана

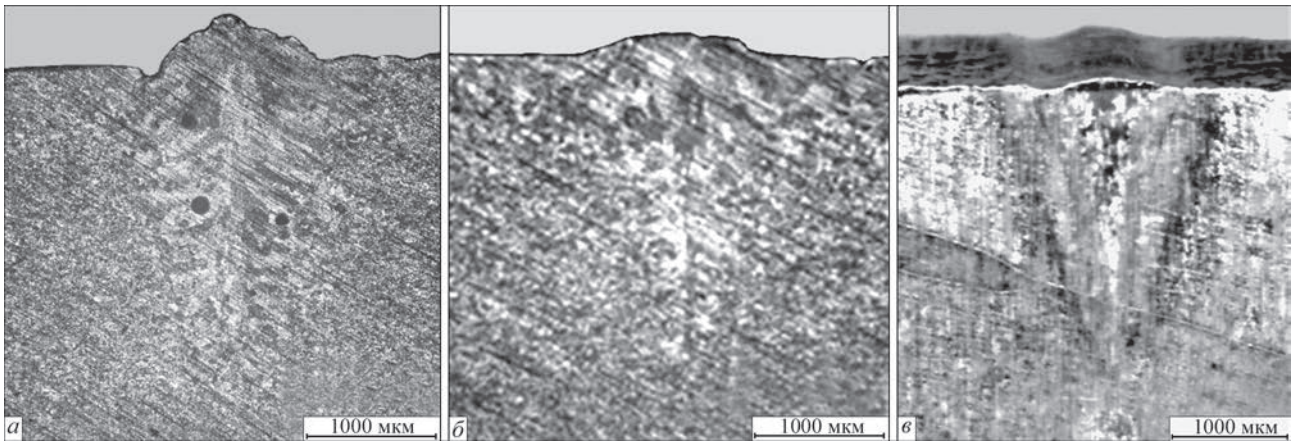


Рис. 9. Вид поперечного перерізу зони проплавлення за вибраних режимів зварювання кругових швів: а – для пробок: $V_{зб} = 10$ мм/с, $A_p = 0,8$ мм, $I_w = 55$ мА; б – для ніпеля: $V_{зб} = 7$ мм/с, $A_p = 0,8$ мм, $I_w = 30$ мА; в – те ж із загладжуючим проходом $V_{зб} = 10$ мм/с, $I_w = 45$ мА

Таблиця 3. Механічні властивості основного металу та металу зварного з'єднання за різних температур випробування

Температура випробувань, °С	$\sigma_{в ом}$, МПа	$\sigma_{в зз}$, МПа	$K_{міц}$
20	570	490	0,85
1200	189	144	0,76

Примітка 1. Наведено середні значення випробувань чотирьох зразків. 2. Тимчасовий опір розриву проведено на плоских зразках, рис. 10. 3. Коефіцієнт міцності – $K_{міц} = \sigma_{в зз} / \sigma_{в ом}$.

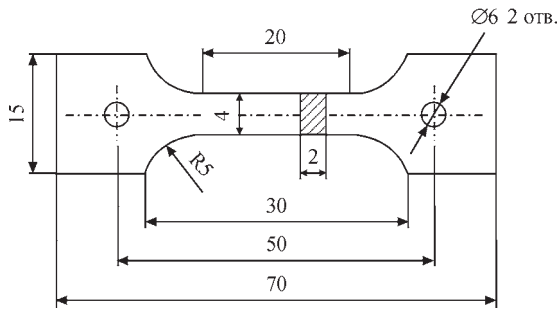


Рис. 10. Зразок для випробувань на розтягування

25 °С/хв = 0,42 °С/с до температури 1150 °С, витримка протягом 60 хв, охолодженням у печі.

Після зварювання і термообробки проводився рентгенівський контроль зварних з'єднань. За висновком рентгенологічного контролю максимальний діаметр пор становить 0,723 мм. Мінімальна відстань між порами становить 4,345 мм. Кожен клапан має три зварні шви. Після проведення робіт з модернізації конструкції зварних вузлів, оптимізації режиму зварювання, кількість і розмір пор набули не критичного характеру з позиції працездатності газового клапану. Рентгенівський контроль швів показав максимальний діаметр пор у діапазоні 0,35...0,43 мм. Їх кількість і розміри не перевищують вимог технічних умов.

Також було проведено гідравлічні випробування зварених газових клапанів. Усі клапани успішно пройшли випробування. Тиск 20 МПа підтримувався протягом 2 хв без витоків, що відповідає вимогам технічного завдання.

Після відпрацювання технології зварювання нової конструкції з'єднання вузла, а також механічних випробувань на промислових зразках, остаточно обрали цю конструкцію і параметри зварювання ЕПЗ з'єднань газового клапану реальних деталей арматури.

Висновки

1. Пористість являє собою складну проблему при зварюванні плавленням молібдену та його сплавів через вже існуючі внутрішні дефекти, перш за все пов'язані з процесом порошкової металургії. Попереднє прогрівання стику розфокусованим електронним пучком призводить до загального об'ємного розширення зони майбутнього зварювання і сприяє видаленню поверхневих забруднень адсорбованих газів. Останнє дозволяє значно зменшити утворення пор, але не гарантує їх повне усунення.

2. Проведені експерименти підтвердили, що утворення пор металургійної природи при ЕПЗ крім впливу шкідливих газових домішок тісно пов'язане з умовами збирання, швидкістю зварювання і формою поперечного перерізу швів. Підготовка поверхні торців зварюваних кромки і точність збирання стику – необхідні умови отримання якісного зварного з'єднання, насамперед з заданим поєднанням міцності та пластичності.

3. Результати аналізу механічних властивостей і структурного стану зварних з'єднань підтвердили правильність вибору параметрів зварювального режиму з мінімальними значеннями погонної енергії та регульованим розподілом щільності потужності траєкторії розгортки електронного пучка. Застосування цього режиму дозволило зменшити величину зерна і кількість порожнеч у зоні плавлення. При цьому зменшується довжина зони термічного впливу, зменшується розмір кристалітів, а також змінюється схема кристалізації металу

шва, що сприятливо позначається на механічних властивостях зварних з'єднань і насамперед на величині низькотемпературної пластичності.

4. Для отримання необхідної якості швів внесено зміни до конструкції зварних з'єднань газового клапана. Ряд зварювальних експериментів на з'єднаннях деталей газового клапана дозволив провести модернізацію конструкції зварних вузлів із застосуванням відбортки зварюваних кромок, що дозволило отримати працездатні кільцеві зварні з'єднання.

Список літератури/References

1. Трефилов, В.И., Мильман, Ю.В., Фирстов, С.А. (1975) *Физические основы прочности тугоплавких металлов*. Киев, Наукова думка. <https://www.libex.ru/detail/book800094.html> Trefilov, V.I., Milman, Yu.V., Firstov, S.A. (1975) *Physical basis of the strength of refractory metals*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Platte, W.N. (1956) Influence of oxygen on soundness and ductility of molybdenum weld. *Weld. J.*, 35, 8, 369–381.
3. Platte, W.N. (1957) Effects of nitrogen on the soundness and ductility of welds in molybdenum *Weld. J.*, 36, 6, 301–306.
4. Гуревич С.М. (1975) *Сварка химически активных и тугоплавких металлов и сплавов*. Киев, Наукова думка.
5. Gurevich, S.M. (1975) *Welding of chemically active and refractory metals and alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Miao-Xia Xie, Yan-Xin Li, Xiang-Tao Shang et al. (2019) Effect of heat input on porosity defects in a fiber laser welded socket-joint made of powder metallurgy molybdenum alloy. *Materials*, 12, 1433. Doi: 10.3390/ma12091433 <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-Heat-Input-on-Porosity-Defects-in-a-Fiber-Xie-Li/ff3980832c812389e46ff4fb4fe22d56e40a494>
7. Zhang, L.J., Liu, J.Z., Pei, J.Y. et al. (2019) Effects of Power Modulation, Multipass Remelting and Zr Addition Upon Porosity Defects in Laser Seal Welding of End Plug to Thin-Walled Molybdenum Alloy. *J. Manuf. Process.*, 41, 197–207. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06482-5>
8. Xie, M.X., Li, Y.X., Shang, X.T. et al. (2019) Microstructure and Mechanical Properties of a Fiber Welded Socket-Joint Made of Powder Metallurgy Molybdenum Alloy. *Metals*, 9, 640. <https://doi.org/10.3390/met9060640>
9. Zhang, L.L., Zhang, L.J., Long, J. et al. (2019) Enhanced mechanical performance of fusion zone in laser beam welding joint of molybdenum alloy due to solid carburizing. *Mater. Des.*, 181, 107957. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107957>
10. Zhang, L.L., Zhang, L.J., Long, J. et al. (2019) Effects of titanium on grain boundary strength in molybdenum laser weld bead and formation and strengthening mechanisms of brazing layer. *Mater. Des.*, 169, 107681. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519301182> <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107681>
11. Мушегян В.А. (2009) Электронно-лучевая плавка восстановленного концентрата молибдена. *Современная электрометаллургия*, 4, 26–28. Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. УДК 669.187.526:51.001.57 Mushegyan, V.A. (2009) Electron beam melting of reduced concentrate of molybdenum *Sovrem. Elektrometall.*, 4, 26–28 [in Russian].
12. Крайников А.В., Морито Ф., Слоняев В.Н. (1997) Примесное охрупчивание зоны термического влияния свариваемых сплавов на основе молибдена. *Международный журнал тугоплавких металлов и твердых материалов*, 15, 5–6, 325–339. [https://doi.org/10.1016/S0263-4368\(97\)87507-5](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(97)87507-5)
13. Krajnikov, A.V., Morito, F., Slyunyaev, V.N. (1997) Impurity-induced embrittlement of heat-affected zone in welded Mo-based alloys. *Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials*, 15(5–6), 325–339. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-4368\(97\)87507-5](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(97)87507-5)
14. Stütz, M., Oliveira, D., Rüttinger, M. et al. (2016) Electron Beam Welding of TZM Sheets. *Mater. Sci. Forum*, 879, 1865–1869. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.1865
15. Корнеев Н.И., Певзнер С.Б., Разуваев Е.И., Скугарев И.Г. (1967) Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов. Москва, Металлургия.
16. Korneev, N.I., Pevzner, S.B., Razuvaev, E.I., Skugarev, I.G. (1967) Pressure processing of refractory metals and alloys. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
17. Wang Jiteng, Wang Juan, Li Yajiang and Zheng Deshuang (2014) Progress of Research on Welding for Molybdenum Alloys. *High Temp. Mater. Proc.* 33(3), 193–200. DOI: 10.1515/htmp-2013-0037
18. https://www.researchgate.net/publication/272570992_Progress_of_Research_on_Welding_for_Molybdenum_Alloys14
19. Скрябінський В.В., Нестеренков В.М., Русиник М.О. (2020) Електронно-промене зварювання з програмуванням розподілу густини потужності променя. *Автоматическая сварка*, 1, 51–56. <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2020>
20. Skryabinskyi, V.V., Nesterenkov, V.M., Rusynuk, M.O. (2020) Electron beam welding with programming of beam power density distribution. *The Paton Welding J.*, 1, 49–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.01.07>
21. Ковбасенко С.Н., Якубовский В.В., Иващенко Г.А. и др. (1987) Способ электронно-лучевой сварки высокопрочных сталей. А.с. 1355411СССР, МКИ ³ В23К 15/00. Бюл. № 8. Kovbasenko, S.N., Yakubovsky, V.V., Ivashchenko, G.A., Zagornikov, V.I., Melnik, S.A. (1987) Method of electron beam welding of high-strength steels. USSR cert. 1355411, Int. Cl. 3 V23K 15/00. PWI [in Russian].

ELECTRON BEAM WELDING OF GAS VALVE ELEMENTS FROM Mo-Ti-Zr ALLOY

V.I. Zagornikov, V.M. Nesterenkov, K.S. Khripko, O.N. Ignatusha

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: zagornikov@technobeam.com.ua

The technological techniques of electron beam welding (EBW) are considered, the application of which would allow obtaining the required quality of joints of gas valve parts made of Mo-Ti-Zr (TZM) alloy, which is used in difficult conditions of the nuclear industry. It is known that in order to produce a welded joint with relatively high ductility indices, the oxygen content should not exceed thousandths of a percent. Alloys produced by vacuum-arc and electron beam melting are used for welded structures. They have a much lower tendency to form porosity in welded joints than similar alloys made by powder metallurgy methods. Such alloys can be welded, but these joints cannot always be used under dynamic loads. When choosing the optimal welding technique for gas valve parts, technical requirements for edge preparation, quality of welded joints, availability of appropriate equipment and technological equipment were taken into account. The problems of assembly and subsequent welding of gas valve parts made of Mo-Ti-Zr (TZM) alloy revealed during the investigations caused the need in changing the design of the joints. As a result, a scheme for welding gas valve parts was proposed, which uses flanging of weld butt edges. This led to optimizing the penetration shape. The proposed welding parameters and the geometry of the flange made it possible to reduce the degree of saturation of the weld metal with gases due to the reduction in the penetration depth under the conditions of rapid heat removal and, as a result, to produce sufficiently high-quality welded joints. In addition, with all the variety of technological techniques used during the investigations, the priority of the correctly selected design of the circumferential joint and the accuracy of the welding assembly was proven. 16 Ref., 3 Tabl., 10 Fig.

Keywords: Mo-Ti-Zr (TZM) alloy, electron beam welding (EBW), microstructure, porosity, gas valve, flanging of welded edges

Отримано 20.06.2024

Отримано у переглянутому вигляді 25.10.2024

Прийнято 10.12.2024