

ОТРИМАННЯ КОАКСІАЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИБУХУ

А.Г. Бризгалін¹, Є.Д. Пекар¹, С.Д. Венцев¹, М.О. Пашин¹, П.С. Шльонський²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: andreybag60@ukr.net

²Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing company Ltd № 1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China. E-mail: shlensk@ukr.net

На відміну від різноманітних видів зварювання плавленням, зварювання вибухом дозволяє з'єднувати метали і сплави практично в будь-яких поєднаннях, що забезпечує виробам, що отримуються з його допомогою, поєднання службових властивостей застосовуваних матеріалів при високому рівні міцності, герметичності, втомної міцності і т.п. Крім випущених у досить великих обсягах біметалів для хімічного та нафтового обладнання, зварювання вибухом отримують вироби з особливими характеристиками для різних галузей промисловості. У особливий клас завдань можна виділити отримання з допомогою вибуху коаксіальних (зварювання відбувається за утворюючими осесиметричних співвісних труб) з'єднань різних металів, які є більш економічними, ніж альтернативні методи їх отримання. У деяких випадках нероз'ємне з'єднання може бути створене обтисканням вибухом без зварювання елементів, що з'єднуються. У цій роботі представлено низку розроблених в Інституті електрозварювання технологічних процесів отримання коаксіальних виробів, які використовують як зварювання, так і обтискання вибухом. Представлені розробки свідчать про широкий спектр практичних завдань, які можуть бути вирішені за допомогою вибуху. Бібліогр. 18, рис. 11.

Ключові слова: коаксіальні з'єднання, зварювання вибухом, біметал, перехідник, пруток, муфта, нероз'ємне з'єднання

Вступ. Коаксіальне зварювання вибухом (ЗВ) циліндричних виробів використовується в меншому обсязі у порівнянні з ЗВ листового металу по паралельній схемі, однак з її допомогою вирішуються дуже важливі практичні завдання. Насамперед це корозійностійкі біметалічні труби хімічного та нафтового машинобудування, в яких міцність забезпечується трубою з вуглецевої сталі, а стійкість до середовища відповідними металами або сплавами (нержавіюча сталь, мідь, латунь, алюміній, ніобій та ін.).

Також біметалічні труби та перехідники використовуються у кріогенній, космічній, авіаційній техніці, прискорювачах елементарних частинок та інших наукомістких виробництвах. Аналіз публікацій на тему показує, що з моменту відкриття ЗВ як технології виготовлення біметалів (1959 р.) великий обсяг досліджень з коаксіального зварювання був проведений у США та СРСР, були запропоновані та апробовані основні схеми зварювання, встановлені особливості та відмінності від ЗВ плоских листів. Огляд технологічних схем коаксіального зварювання вибухом труб і труб із трубними решітками апаратів хімічного виробництва наведено в [1, 2]. Однак із середини 1960-х років кількість публікацій різко скоротилася і почала носити, як правило, інформаційний характер з посиланнями на раніше опубліковані роботи. Це пов'язано, мабуть, з розвитком промислових технологій і, відповідно, відсутністю інтересу у виробників до опублікування своїх технологічних напрацювань.

У той же час, слід зазначити деякі публікації, що відрізняються новим технічним підходом до вирішення завдань коаксіального зварювання.

У роботі [3] запропоновано ЗВ здійснювати за допомогою води як середовища, яке передає робочий тиск (рис. 1).

У роботі [3] запропоновано ЗВ здійснювати за допомогою води як середовища, яке передає робочий тиск (рис. 1).

Як вибухова речовина (ВР) використовувалася суміш гексогену з калієвою селітрою. Суміш розміщувалася у циліндричній алюмінієвій оболон-

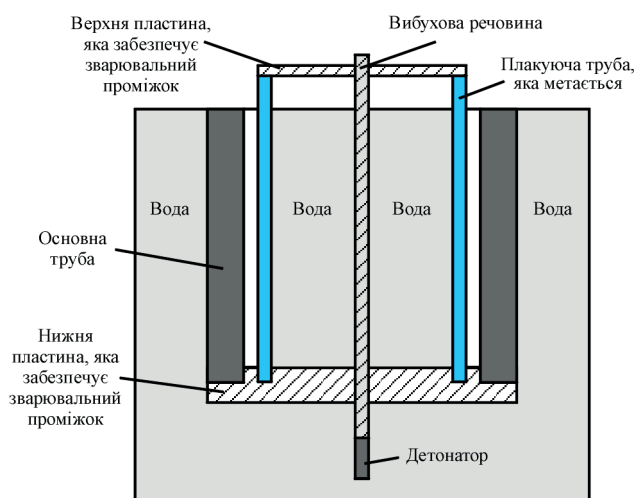


Рис. 1. Зварювання вибухом коаксіально розташованих труб

Бризгалін А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-5886-3069>, Пекар Є.Д. <https://orcid.org/0000-0001-5025-4445>, Венцев С.Д. – <https://orcid.org/0000-0003-4753-5259>, Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Шльонський П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3566-1752>

© А.Г. Бризгалін, Є.Д. Пекар, С.Д. Венцев, М.О. Пашин, П.С. Шльонський, 2024

ці. Швидкість детонації заряду варіювалася залежно від діаметра оболонки, але завжди була близькою до 7000 м/с. Якщо врахувати, що швидкість детонації при ЗВ становить 2000...3000 м/с, наведена схема представляє інтерес для дослідження. У роботах [4, 5] запропоновано метод теоретичного прогнозування швидкості зіткнення металу труб, що зварюються – основного параметра ЗВ, що визначає енергетику процесу при підводному вибуховому зварюванні та зварюванні на повітрі відповідно.

Однак визначення режимів коаксіального ЗВ є досить складною проблемою і здійснюється в даний час для кожного типу з'єднань окремо розрахунково-експериментальним шляхом. Інтерес також становлять способи отримання нероз'ємних з'єднань (що не розбираються на складові без їх часткової руйнації) з допомогою вибуху без обов'язкового здійснення зварювання.

У цій роботі приведені технологічні рішення різних завдань за допомогою розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона методів отримання коаксіальних з'єднань.

Виготовлення коаксіальних мідно-алюмінієвих прутків за допомогою зварювання вибухом і протяжки. Струмopровідні шини електроапаратури відповідального призначення виконуються з міді, що має високу електропровідність і водночас високу щільність [6]. У разі її роботи при високій частоті струму (наприклад, в авіакосмічній техніці) заміна суцільних мідних шин на алюмінієві, що плаковані тонким шаром міді, забезпечує значне зниження маси виробів при збереженні їх електропровідності.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена технологія виготовлення біметалевих мідно-алюмінієвих прутків за допомогою з'єднання вибухом мідної оболонки з алюмінієвим прутком і подальшою протяжкою [7].

Границя з'єднання не мала характерного для зварювання вибухом хвилеутворення, що свідчить про виконання зварювання на нижній межі допустимих режимів, тобто з мінімальним вкладенням енергії [8]. Це дозволило звести до мінімуму (порядку 10 % по довжині з'єднання) кількість інтерметалідів, що утворюються при зварюванні.

Отримання необхідного діаметра прутків 8,0 і 9,0 мм здійснювалося протяжкою біметалевих заготовок діаметром 26 мм, при цьому не потрібно проведення термообробки заготовок на всіх етапах операції протяжки.

Питомий електричний опір біметалевого прутка постійному струму в перерахунку на температуру 20 °С становив $0,027 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Повітря в зазорі утворює ударну хвилю, фронт якої рухається зі швидкістю, більшою за швидкість детонації, швидкість цього фронту постійно знижується через збільшення опору повітря, що знаходиться в зазорі. На деякій довжині коаксіальних елементів, складених для зварювання, швидкість витoku повітря із зазору стає меншою за швидкість детонації. Певний об'єм повітря залишається між елементами, що зварюються, утворюючи бульбашки. Рух ударної хвилі призводить до значного розігріву поверхонь елементів [9], що зварюються, аж до закипання алюмінію. Це суттєво впливає на якість отриманих зварних з'єднань. Щоб запобігти цьому, було запропоновано вакуумувати зазор зварювання. Були проведені експерименти з аналогічними, але довшими, зразками на тих же режимах з вакуумуванням і без зварювального зазору. Остаточний тиск при вакуумі становив 1 Па [10].

Після виконання зварювання вибухом без вакуумування на відстані приблизно 250 мм від краю заготовки, що ближче до точки ініціювання, спостерігається початок дефектів у вигляді розриву плакуючого шару і пошкодження поверхні алюмінію, яка набуває рваної форми, є також дефекти у вигляді бульбашок, що з'являються на відстані 100 мм від краю зразка. На зразку з вакуумуванням спостерігається аналогічна картина, але дефекти з'являються на відстані приблизно 500 мм. Утворення дефектів у зразку з вакуумуванням пояснюється присутністю в зазорі повітря, хоч і більш розрідженого.

Характерним для обох зразків є те, що більшість бульбашок і всі дефекти у вигляді розривів сконцентровані на одній утворюючій. Очевидно, це пов'язано з тим, що внаслідок нерівномірності фронту детонації, по одній із утворюючих він завжди відставатиме. Така нерівномірність буде залежати, насамперед, від зміщення центру ініціювання заряду вибухової речовини (ВР) від центру зварювальної зборки, а також від нерівномірності швидкості детонації і товщини заряду по довжині зразка. Слід зазначити, що при зварюванні з вакуумуванням інтерметаліди, що утворюються, мали менший розмір. Мабуть, це пов'язано з тим, що при зварюванні з вакуумом відсутній нагрів за рахунок повітря, що витікає із зазору (рис. 2).

Можна зробити висновок, що вакуумування зазору при зварюванні вибухом коаксіальних заготовок зовнішнім зарядом підвищує якість зварного з'єднання, що полягає у збільшенні довжини зварених заготовок, на якій відсутні дефекти типу бульбашок і розриву зовнішнього шару, а також

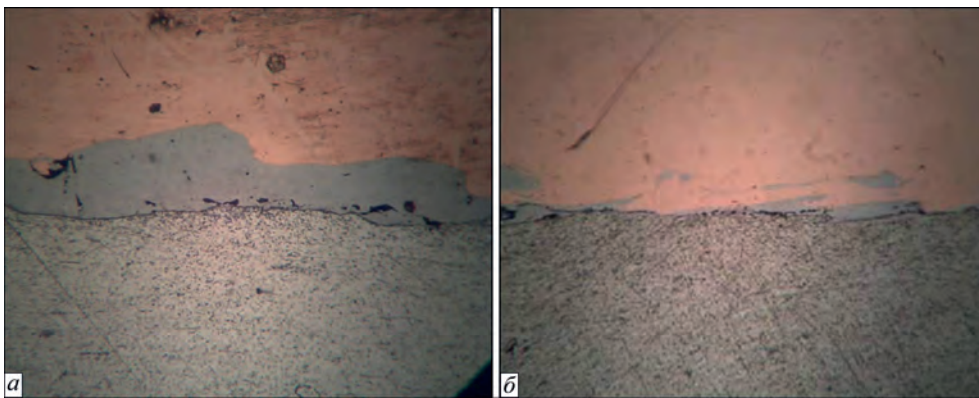


Рис. 2. Інтерметаліди на межі з'єднання мідь-алюміній після зварювання вибухом: *а* – без вакуумування; *б* – з вакуумуванням

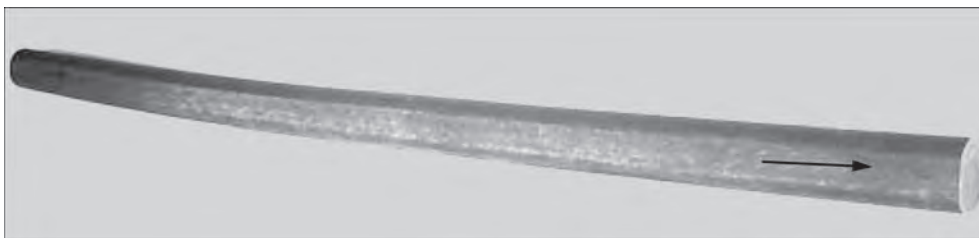


Рис. 3. Біметалічний стрижень, отриманий зварюванням вибухом мідної основи зі сталеву трубою

зменшенні розміру і кількості інтерметалідів при зварюванні пари мідь + алюміній. Слід зазначити, що при зварюванні міцніших матеріалів з більшою температурою плавлення видимих дефектів не утворюється, зберігається цілісність матеріалів, одержуваний зварюванням вибухом стрижень має меншу деформацію по довжині. На рис. 3 наведено фото стрижня сталь-мідь для виготовлення катода рафінування міді, що виготовлено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Трубні перехідники з біметалів широко використовуються у суднобудуванні, металургії, трубопроводному транспорті, атомній енергетиці.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено технологію виготовлення так званого квазистикового трубного перехідного елемента [11]. Він є патрубком з однаковою геометрією поперечного перерізу по всій його довжині, однак має на своїх кінцях різні матеріали, які з'єднані між собою зварюванням вибухом (рис. 4).

Подальше приєднання елементів трубопроводу до перехідника здійснюється зварюванням плавленням однорідних матеріалів, що дозволяє досягати високих службових властивостей зварних з'єднань. Довжина перехідника практично не обмежена і дозволяє унеможливити термічний вплив від дугового стикового зварювання нарощування трубопроводу на з'єднання, отримане зварюванням вибухом.

Можливі варіанти поєднання зварюванням вибухом практично будь яких металів. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона виготовлені перехідники із наступних ме-

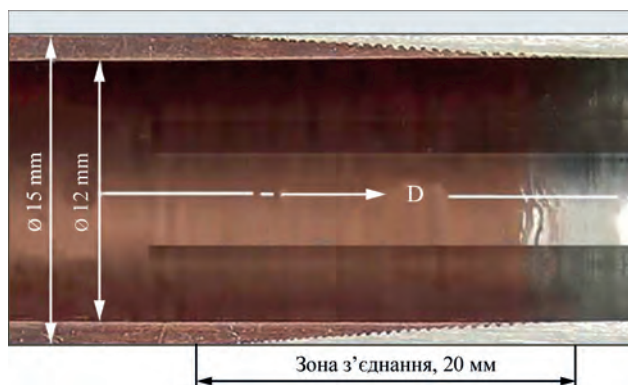


Рис. 4. Квазистиковий трубний перехідник

талів: алюміній + мідь; мідь + сталь; нержавіюча сталь + сталь 20.

Дослідження міцності зчеплення шарів проводили шляхом випробувань на розтягування біметалевих трубних зразків і таких, які вирізалися вздовж утворюючої перехідника. Ширина зразка становила 5...10 мм залежно від його діаметра, довжина дорівнювала довжині перехідника. Затискачі розтяжної машини встановлювалися так, щоб від них до ближнього краю стику було щонайменше 20 мм. З кожного перехідника вирізувалося по 3 зразки на розтяг.

У всіх випадках руйнування зразків відбувалося за слабшим металом. Не було жодного випадку руйнування зразків у зоні з'єднання.

Загальний вид сталь-мідних трубних перехідників представлений на рис. 5.

Перехідники успішно пройшли випробування на розтяг, стійкість до підвищеного тиску та вакууму і гелієву щільність.

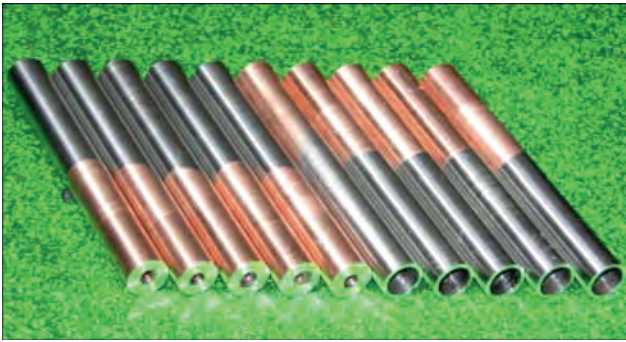


Рис. 5. Загальний вид трубних Cu-сталь перехідників

Таке стикове з'єднання труб зварюванням вибухом отримано вперше у світовій практиці.

В електротехнічній промисловості досить часто застосовується з'єднання мідних і алюмінієвих струмопровідних елементів. Прямий контакт таких елементів без зварювання супроводжується протіканням електрохімічної корозії та вигорянням дорогих матеріалів і підвищенням в результаті цього перехідного опору, зростаючого під час експлуатації. Будь-який вид зварювання даних матеріалів призводить до утворення інтерметалідів типу Al_nCu_m , які можуть вплинути на електротехнічні властивості з'єднання. Зварювання вибухом є найбільш ефективним способом отримання мідно-алюмінієвих електричних провідників з підвищеними експлуатаційними властивостями. Ефективність впровадження конструкцій композитних струмопровідних вузлів, одержуваних зварюванням вибухом, підтверджується зниженням перехідного опору в 1,7...2,5 рази і збільшенням терміну служби в 5...7 разів [8].

Зокрема, для з'єднання мідних і алюмінієвих гнучких багатожильних кабелів використовуються біметалеві муфти, що є порожнистим циліндром з алюмінію, половина довжини якого зсередини заплакована вибухом шаром міді. Мідний кабель вставляється в муфту з боку плакування, алюмінієвий – на звороті. З'єднання здійснюється шляхом механічного обтискання муфти (рис. 6).

З технологічних міркувань у деяких випадках доводиться зварювання вибухом здійснювати зовнішнім зарядом. Тобто, в такому разі метається товстіший алюміній, що не характерно для зварювання вибухом [12]. Тонка мідна трубка є опорною

і повинна бути посилена зсередини, щоб уникнути її деформації під час вибуху.

Дослідження різних варіантів посилення мідної трубки показали, що найбільш раціональним є наступний: всередину вертикально встановленої мідної трубки вставляється жорсткий, наприклад, сталевий стрижень. Зазор між стрижнем і стінкою трубки заливається сплавом Вуда, що має температуру плавлення приблизно 90 °С. Такий стрижень за кімнатної температури не деформується зовнішнім тиском продуктів детонації. Для вилучення опори з мідної трубки після ЗВ достатньо нагріти отриману заготовку до 90 °С, наприклад, в киплячій воді.

Мікроструктура з'єднання міді з алюмінієм має незначний хвильовий профіль з невеликою кількістю інтерметалідних включень.

Оскільки стандартні методики для оцінювання міцності на відрив шарів біметалевого кільця, вирізаного із трубної заготовки, відсутні, то для якісного оцінювання міцності зчеплення шарів була використана відома методика випробуванням біметалевих кілець на сплющування [13]. Випробування проводились з метою виявлення тріщин і розшарувань в зоні з'єднання під дією навантаження.

Відсутність розшарувань на границі з'єднання свідчить про високу якість ЗВ і збереження на високому рівні пластичних властивостей обох металів.

При виготовленні виробів складної конфігурації може бути використана комбінація ЗВ зі зварюванням плавленням. Характерним прикладом може бути створення перехідника лінійного колайдера [13, 14].

Перехідник служить для з'єднання окремих кріомодулів в одне ціле. Елементи кріомодуля, що з'єднуються, – ніобієвий надпровідний резонатор, який має бути приварений електронно-променевим зварюванням до ніобієвого патрубку перехідника, а коаксіально розташований по відношенню до ніобієвого резонатора кожух із нержавіючої сталі має бути привареним до диску перехідника, виготовленого із тієї ж нержавіючої сталі. Ніобієвий резонатор знаходиться всередині кожуха із

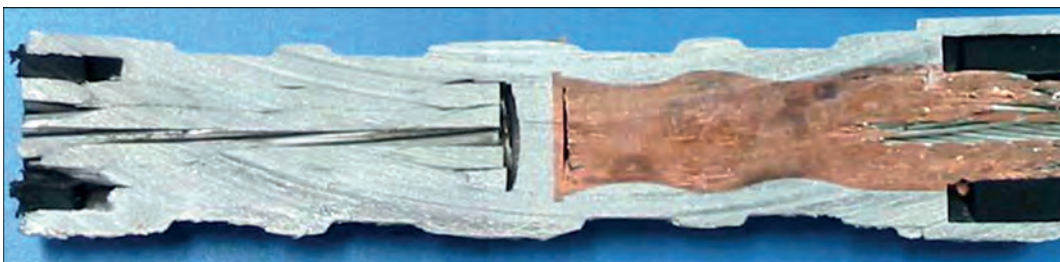


Рис. 6. З'єднання мідного та алюмінієвого кабелів муфтами, що обтискаються

нержавіючої сталі, в ньому створюється вакуум, під кожух заливається рідкий гелій. Таким чином, перехідник повинен забезпечувати вакуумну та гелієву щільність і працездатність вузла в умовах високочастотних електромагнітних навантажень при криогенних температурах. Схема і фото перехідника наведена на рис. 7.

Відомо, що найбільш якісні зварні з'єднання отримуються при зварюванні однорідних матеріалів. Таким чином, перехідник має забезпечити виконання зварних з'єднань ніобію з ніобієм, а нержавіючої сталі з нержавіючою сталлю. Тобто перехідник повинен складатися як мінімум з двох металів – ніобію та нержавіючої сталі. Використання для отримання з'єднання ніобію з нержавіючою сталлю будь-яких способів зварювання плавленням, в тому числі електронно-променевого зварювання, неприйнятно для вирішення поставленого завдання у зв'язку з утворенням інтерметалідів типу Nb_xFe_y , які не дозволяють забезпечити потрібну щільність з'єднання. Виготовлення пере-

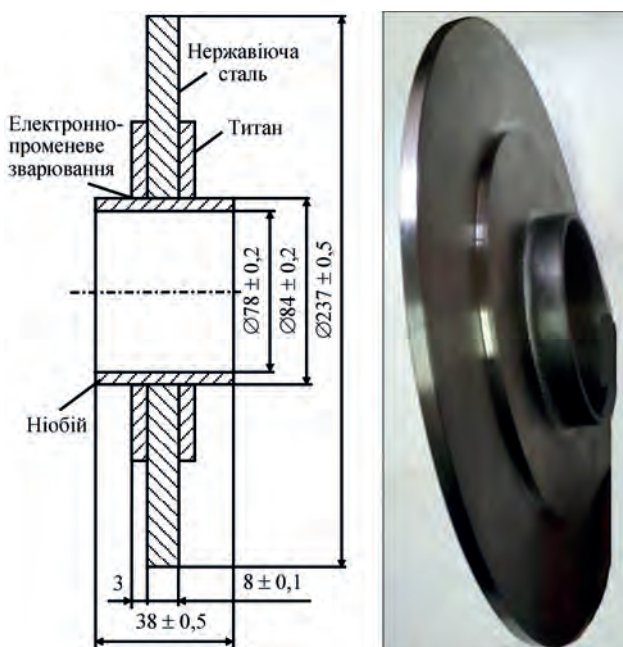


Рис. 7. Конструкція перехідника, що забезпечує відсутність утворення інтерметалідів ніобію при зварюванні

хідника зварюванням вибухом ніобієвої трубки зі сталевим диском виявилося досить дорогим процесом в зв'язку з великими втратами ніобію при наступній механічній обробці.

Раніше проведені експерименти показали, що при електронно-променевому зварюванні ніобію з титаном не утворюються інтерметаліди і забезпечується необхідна щільність з'єднань по гелію і вакууму. В зв'язку з цим було запропоновано наступний варіант виготовлення перехідника.

Диск із нержавіючої сталі спочатку плакується з двох сторін титаном за допомогою зварювання вибухом, потім, після надання отриманому триметалу необхідної форми (шляхом правки та обточування у розмір) вирізається отвір під ніобієвий патрубок. Патрубок вставляється в отвір і приварюється до титану електронно-променевим зварюванням. Можливе утворення інтерметалідів в поєднанні титану зі сталлю, що отримується зварюванням вибухом, не впливає на працездатність перехідника, оскільки через нього гелій не може потрапити в порожнину ніобієвої труби.

Механічні випробування отриманих за допомогою ЗВ з'єднань на відрив шарів показали задовільну міцність (375 МПа), загин біметалу на 180° не виявив утворення розшарувань або тріщин. Експериментально були підібрані оптимальні режими електро-променевого зварювання титану з ніобієм (рис. 8).

Виготовлені по комбінованій технології зразки були охолоджені рідким гелієм до температури 4,2 °К, а потім швидко нагріті до кімнатної температури за допомогою фенів. Зразки після проведення таким чином термічного циклування забезпечували гелієву та вакуумну щільність [15].

Існуючі способи з'єднання арматури при будівництві об'єктів із залізобетону [16] мають ряд недоліків. Розробка високопродуктивних, економічних та ергономічних способів з'єднання термозміцненої арматури, що забезпечують міцнісні

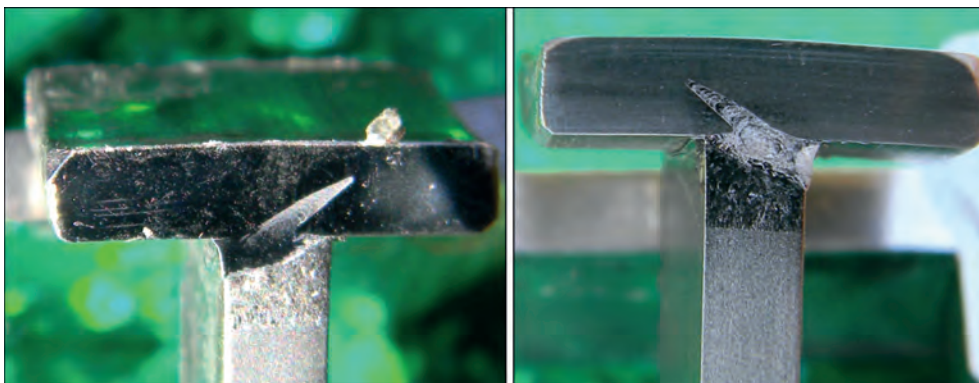


Рис. 8. Шліфи місця з'єднання ніобію з титаном електронно-променевим зварюванням

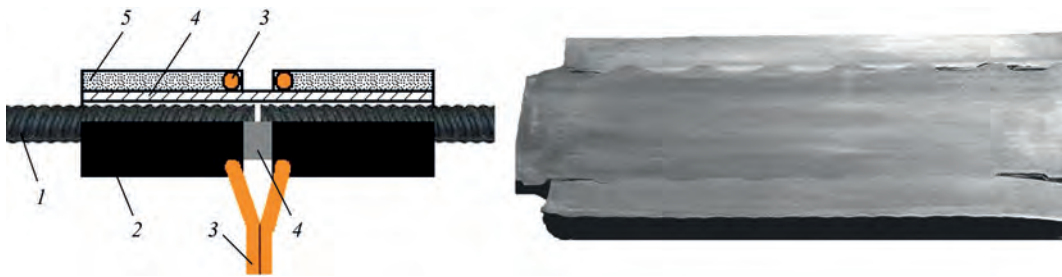


Рис. 9. Принципова схема та макрошліф з'єднання арматури вибухом: 1 – арматура; 2 – оболонка заряду; 3 – ініціюючий детонуючий шнур; 4 – муфта; 5 – вибухова речовина

властивості з'єднань на рівні основного металу, є на сьогоднішній день дуже актуальним завданням.

Одним з таких способів може бути з'єднання арматури муфтами, що обтискаються вибухом. Перевагами вибухової технології є: відсутність втрати міцності основного металу, можливість з'єднувати метали, які неможливо зварити способами плавлення без погіршення службових властивостей, наприклад, термічно зміцнену або біметалеву арматуру, покриту зовнішнім антикорозійним шаром, відсутність необхідності у використанні спеціального обладнання, незалежність від джерел енергопостачання, можливість виконувати роботи з високою продуктивністю.

Суть технології полягає в тому, що на кінці арматури, що поєднуються, симетрично відносно стику надягається стальна муфта (трубка) з розташованим на її зовнішній поверхні зарядом вибухової речовини. Тиск, що створюється вибухом заряду, обтискає метал муфти таким чином, що він приходить в щільний дотик з металом арматури. Наявність поперечних виступів на поверхні арматури забезпечує утворення нероз'ємного механічного з'єднання (рис. 9).

Міцність з'єднання при додаванні навантаження, що розтягує, буде визначатися міцністю металу муфти, міцністю поперечних виступів арматури, що працюють на зминання, і міцністю самої арматури. Розроблено метод розрахунку параметрів муфти і заряду, що забезпечують рівномірність з'єднання та металу арматури.

Проведено випробування на розрив та циклічну довговічність з'єднань арматури різного типороз-

міру та класу міцності. Муфти обтискалися зарядами із детонуючого шнура, який намотувався на муфту в кілька шарів (рис. 10).

Всі зразки, що випробовувалися на розрив, руйнувалися по основному металу.

Випробування на втому виконували відповідно до вимог ДСТУ [17] в лабораторних умовах ІЕЗ ім. Є.О. Патона при режимі осьового гармонійного розтягування в області багатоциклової довговічності з частотою 5 Гц і коефіцієнтом асиметрії циклу 0,4. Критерієм завершення випробувань служив повний злам зразка. Зразки зруйнувалися всередині муфти на відстані 10...35 мм від її краю.

Аналіз отриманих даних показує, що по опору втоми такі з'єднання не поступаються іншим широко застосовуваним у промисловості способам з'єднання арматури.

Колісні пари вагонів мають підвищений знос різбових отворів для кріплення кришок підшипників в осях колісних пар [18]. Існуючі способи їх відновлення з використанням дугового зварювання або неприйнятні через неприпустимі термічні деформації (заплавлення отворів і нанесення нової різби) або не надійні у зв'язку з динамічним характером робочих навантажень (вставка трубки в отвір, зварювання її з основним металом по верхньому краю та нарізання нового різблення). В ІЕЗ ім. Є.О. Патона запропоновано приварювати ремонтну трубку до основного металу осі в зношених різбових отворах методом зварювання вибухом та нарізання нової різби (рис. 11).

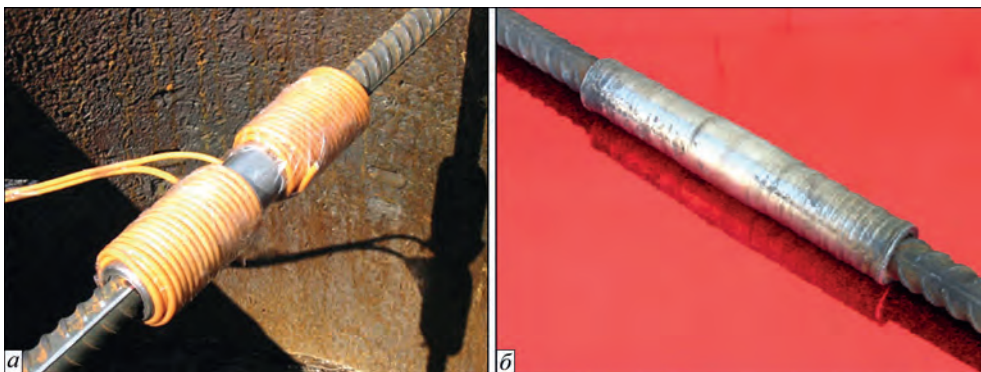


Рис. 10. Приклад обтискання муфти зарядом із детонуючого шнура до вибуху заряду (а) та після вибуху (б)

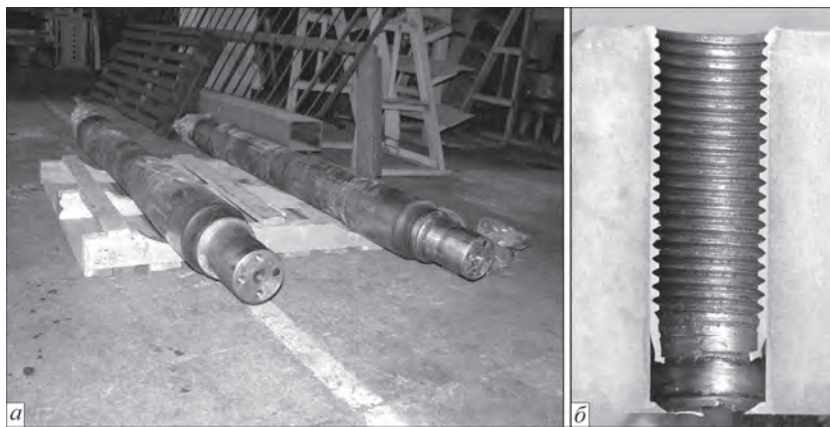


Рис. 11. Ремонт різбових отворів за допомогою зварювання вибухом: а – загальний вигляд осі колісної пари з чотирма різбовими отворами; б – макрошліф відновленого вибухом отвору з різбою

Як ВР використовувалася суміш амоніту з селітрою. Крайовий непровар, характерний для ЗВ, у верхній частині був відсутній, а в нижній частині не впливав на якість з'єднання в цілому, оскільки довжина знову нарізаної різби перевищувала довжину робочих витків болта. Газоутворення від вибуху не вплинуло на якість зварювання і не створило в отворі дефектів.

Мінімальне значення циклічної довговічності осей з різбовими отворами, відновленими методом зварювання вибухом, склало 122 000 циклів навантаження, що лише на 4 % нижче за базове значення для нових осей.

Дві колісні пари з відновленими вибухом отворами було встановлено на вагон та пройшли робочі випробування на полігоні Укрзалізниці. Після пробігу 100 000 км без утворення дефектів випробування було припинено.

Висновки

1. Міцність і довговічність коаксіальних зварених вибухом з'єднань, як правило, не нижче, ніж у таких же з'єднань, які отримані іншими способами.

2. Виготовлення складних виробів комбінацією зварювання вибухом та плавленням дозволяє уникнути утворення небажаних інтерметалідів та забезпечити необхідні робочі властивості виробу.

3. Вибухові технології можуть бути ефективно використані для створення коаксіальних з'єднань різного призначення.

Список літератури

1. Crossland B. Bahrani, A.S. Willia, J.D. Shribman, Victor (1967) Explosive welding of tubes to tubeplates. *Welding and Metal Fabrication*, **35**, 88–94.
2. Harry, J. Addison, Jr. James, F. Kowalick, Winston W. Cavtll (1969) *Explosion welding of cylindrical shapes. Report A69-3 of the department of the army frankford arsenal*, Philadelphia.
3. Yong, Yu, Honghao, Ma, Kai, Zhao et al. (2017). Study on Underwater Explosive Welding of Al-Steel Coaxial Pipes. *Central European J. of Energetic Materials*, **14** (1), 251–265. DOI: 10.22211/cejem/68696
4. Moujin Lin, Junjie Liao, Bing Xue, Dingjun Xiao, Jiangliang Li, Jing Ling (2023) Expansion velocity of metal pipe in underwater explosive welding. *J. of Materials Processing Technology*, **319**, October 2023, 118071. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118071>
5. Sina Gohari Rad, Siamak Mazdak, Ali Alijani (2023) Proposing an analytical model for predicting the dimensions of interfacial waves produced in the explosive welding of coaxial cylinders. *Thin-Walled Structures*, **190**, September 2023, 110982. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110982>
6. ДСТУ EN 13601:2010 Мідь та мідні сплави. Прутки, шина та дріт мідні загальної електричної призначеності. Технічні умови.
7. Брызгалін А.Г., Добрушин Л.Д., Шленский П.С. и др. (2015) Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых прутков с помощью сварки взрывом и протяжки. *Автомат. сварка*, **3-4**, 72–76.
8. Лысак В.И., Кузьмин С.В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение.
9. Pervukhin, L.B., Shishkin, T.A., Pervukhina, O.L. (2012) Specificity of explosive welding in marginal zones. *Materials of symposium «Explosive production of new materials: Science, Technology, Business, and Innovations»*. Moscow, Torus Press Ltd.
10. Пашин М.О., Шльонський П.С., Брызгалін А.Г. та ін. (2021) Особливості формування структури коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при зварюванні вибухом з вакуумуванням зварювального проміжку. *Автомат. зварювання*, **2**, 3–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.01>
11. Спосіб виготовлення біметалічних трубних перехідників за допомогою зварювання вибухом. Заявка на винахід №а 2022 02799 від 05.08.2022. Бюлетень промислової власності № 6, 07.02.2024.
12. Шльонський П.С. (2020) Зварювання вибухом мідно-алюмінієвих труб по «зворотній» схемі. *Автомат. зварювання*, **8**, 51–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.08.08>
13. Брызгалін А.Г., Пекарь Е.Д., Шленский П.С. (2017) Применение сварки взрывом для создания триметаллических переходников криомодулей линейного коллайдера. *Автомат. зварювання*, **12**, 34–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.12.04>
14. Basti, A., Bedeschi, F., Bryzgalin, A. et al. (2020) Upgrade of the ILC cryomodule. *arXiv.org > physics > arXiv:2004.05948*.
15. Sabirov, B., Basti, A., Bedeschi, F. et al. (2016) High Technology Application to Modernization of International Electron-Positron Linear Collider (ILC). *International Conference «New Trends in High-Energy Physics»*, Montenegro.
16. Брызгалін А.Г., Пекарь Е.Д., Шльонський П.С. та ін. (2022) З'єднання будівельної арматури за допомогою муфт, що обтискаються вибухом. *Автомат. зварювання*, **11**, 35–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.11.05>
17. ДСТУ Б В.2.6-169:2011 З'єднання зварні арматури та закладних виробів залізобетонних конструкцій.

18. Лобанов Л.М., Илларионов С.Ю., Добрушин Л.Д. и др. (2012) Восстановительное плакирование взрывом резбового канала вагонных осей. *Автомат. сварювання*, **2**, 42–46.

References

1. Crossland, B. Bahrani, A.S. Willia, J.D. Shribman, V. (1967) Explosive welding of tubes to tubeplates. *Welding and Metal Fabrication*, **35**, 88–94.
2. Harry, J. Addison, Jr. James, F. Kowalick, Winston W. Cavtll (1969) *Explosion welding of cylindrical shapes. Report A69-3 of the department of the army frankford arsenal*, Philadelphia.
3. Yong, Yu, Honghao, Ma, Kai, Zhao et al. (2017) Study on Underwater Explosive Welding of Al-Steel Coaxial Pipes. *Central European J. of Energetic Materials*, **14** (1), 251–265. DOI: 10.22211/cejem/68696
4. Moujin Lin, Junjie Liao, Bing Xue, Dingjun Xiao, Jiangliang Li, Jing Ling (2023) Expansion velocity of metal pipe in underwater explosive welding. *J. Mater. Proc. Technol.*, **319**, October 2023, 118071. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118071>
5. Sina Gohari Rad, Siamak Mazdak, Ali Alijani (2023) Proposing an analytical model for predicting the dimensions of interfacial waves produced in the explosive welding of coaxial cylinders. *Thin-Walled Structures*, **190**, September 2023, 110982. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110982>
6. DSTU EN 13601:2010 *Copper and copper alloys. Copper rod, bar and wire for general electrical purposes. Specifications*.
7. Bryzgalin, A.G., Dobrushin, L.D., Shlensky, P.S. et al. (2015) Manufacture of coaxial copper-aluminium rods using explosion welding and drawing. *The Paton Welding J.*, **3-4**, 69-73.
8. Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Pervukhin, L.B., Shishkin, T.A., Pervukhina, O.L. (2012) Specificity of explosive welding in marginal zones. In: *Proc. of Symp. on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations*. Moscow, Torus Press Ltd.
10. Pashchin, M.O., Shlonskiy, P.S., Bryzgalin, A.G. et al. (2021) Features of formation of structure of coaxial joints of copper and aluminium in explosion welding with vacuuming of welding gap. *The Paton Welding J.*, **2**, 2-7. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.01>
11. *Method of manufacturing of bimetal pipe adapters using explosion welding*. Appl. for invent. No. 2022 02799 from 05.08.2022.
12. Shlyonskiy, P.S. (2020) Explosion welding of copper-aluminium pipes by the "reverse scheme". *The Paton Welding J.*, **8**, 51–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.08.08>
13. Bryzgalin, A.G., Pekar, E.D., Shlensky, P.S. et al. (2017) Application of explosion welding for manufacture of trimetallic transition pieces of cryomodules of linear collider. *The Paton Welding J.*, **12**, 34–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.12.04>
14. Basti, A., Bedeschi, F., Bryzgalin, A. et al. (2020) *Upgrade of the ILC cryomodule*. arXiv.org > physics > arXiv:2004.05948.
15. Sabirov, B., Basti, A., Bedeschi, F. et al. (2016) High Technology Application to Modernization of International Electron-Positron Linear Collider (ILC). In: *Proc. of Int. Conf. on New Trends in High-Energy Physics, Montenegro*.
16. Bryzgalin, A.G., Shlyonskiy, P.S., Pekar, E.D. et al. (2022) Joining building rebars using couplings compressed by explosion. *The Paton Welding J.*, **11**, 35–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.11.05>
17. DSTU B V. 2.6-169:2011 *Welded joints of rebars and embedded products of concrete structures*.
18. Lobanov, L.M., Illarionov, S.Yu., Dobrushin, L.D. et al. (2012) Repair explosion cladding of threaded channel of car axles. *The Paton Welding J.*, **2**, 42–46.

PRODUCING OF COAXIAL JOINTS OF DISSIMILAR METALS WITH THE HELP OF EXPLOSION

A.G. Bryzgalin¹, E.D. Pekar¹, S.D. Ventsev, M.O. Pashchin¹, P.S. Shlionskiy²

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

E-mail: andreybag60@ukr.net

²Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing company Ltd № 1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China. E-mail: shlensk@ukr.net

Unlike different type of fusion welding, explosion welding allows joining metals and alloys in almost any combinations, which provides the possibility of manufacturing products with a combination of service properties of the used materials at a high level of strength, tightness, fatigue strength, etc. Except of bimetals produced in fairly large volumes for chemical and oil equipment, explosion welding is used to manufacture products with special characteristics for different industries. It is possible to attribute the production of coaxial joints of different metals (welding occurs along generatrices of axisymmetric co-axial pipes), which are more complex and interesting from a scientific point of view, and more economical in practice than alternative methods of their production, as a special class of tasks. In some cases, dissimilar joint can be created by explosion crimping without welding the elements to be joined. This work presents a number of technological processes for manufacture of coaxial products developed at the PWI, using both explosion welding and crimping. The presented developments testify that a wide range of practical tasks can be solved with the help of explosion. 18 Ref., 11 Fig.

Key words: coaxial joints, explosion welding, bimetal, adapter, rod, coupling, permanent joint

Отримано 15.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 24.04.2024

Прийнято 18.07.2024

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Передплата доступна
у друкованому та цифровому
форматах!

Підпишіться сьогодні.

Тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua