

644
14.04.2021

ВІДЗИВ

офиційного опонента д.т.н., проф. Кvasницького В.В.
на дисертаційну роботу **Шльонського Павла Сергійовича**
«Технологія зварювання вибухом мідно-алюмінієвих коаксіальних
струмопроводів» представленої на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси
і технології

Дисертаційна робота має загальний обсяг 176 сторінок, включає 79 малюнків, 24 таблиці, і складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел зі 139 найменувань на 14 сторінках та 2 додатків.

Дисертаційна робота Шльонського П.С присвячена дослідженю особливостей формування коаксіальних з'єднань алюмінію та міді із застосуванням технології зварювання вибухом та створенню спеціалізованого обладнання для реалізації технологічного процесу в різних газових середовищах.

Актуальність обраної теми дисертації. Коаксіальні мідно-алюмінієві струмопровідні вузли та переходні елементи широко використовують у різних галузях промисловості, зокрема в енергетиці, машинобудуванні, авіабудуванні, при створенні елементів ракетно-космічної техніки, у металургії тощо. Зварні з'єднання повинні мати низький електричний опір, володіти високими пластичними властивостями та надійністю в умовах експлуатації. Отримання з'єднань міді з алюмінієм зварюванням плавленням утруднене через велику різницю температур плавлення, високу термодинамічну міцність оксидних плівок, особливості фізико-хімічної взаємодії з'єднуваних металів, тому для їх виготовлення застосовують технології зварювання матеріалів у твердому стані, серед яких зварювання вибухом (ЗВ) є одним із поширених методів. Однак відомості щодо впливу параметрів режимів ЗВ при виготовленні коаксіальних довгомірних з'єднань міді з алюмінієм вкрай обмежені, а дані щодо взаємозв'язку між умовами ведення процесу та їх впливу на формування структури та фізико-механічні характеристики отриманих з'єднань у літературі практично відсутні. Тому дослідження спрямовані на встановлення закономірностей впливу параметрів та умов ЗВ на формування структури та характеристики якості довгомірних коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм, створення нових схем реалізації процесу і обладнання є безумовно актуальними, а робота своєчасною.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з науково-дослідними темами Інституту електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, які виконані в рамках прикладних досліджень і відомчої тематики за безпосередньої участі автора.

Метою роботи є створення технології зварювання вибухом коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопровідних вузлів, переходних елементів і обладнання для її реалізації.

У **вступі** наведена загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтована її актуальність, сформульовані мета та завдання досліджень, визначена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, показаний зв'язок роботи з науковими програмами та темами; визначений

особистий внесок здобувача та наведені відомості щодо апробації та публікації результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проаналізовані способи виготовлення мідно-алюмінієвих біметалевих заготовок і вузлів електротехнічного призначення. Доведено, що ефективним способом отримання з'єднань з міді й алюмінію з високими характеристиками якості є ЗВ. Описані особливості ведення процесу та основні параметри ЗВ, представлені можливі схеми отримання плоских і циліндричних заготовок.

Відзначено, що одним із суттєвих факторів, що впливає на властивості мідно-алюмінієвих з'єднань отриманих ЗВ є газове середовище, а в літературі фактично відсутні відомості щодо досліджень зони з'єднання довгомірних мідно-алюмінієвих заготовок циліндричної форми. Показана актуальність використання вибухових камер для ЗВ та необхідність автоматизації процесу зварювання.

На основі ретельного аналізу світового досвіду отримання таких з'єднань автором визначена мета та сформульовані завдання досліджень.

У **другому розділі** описані матеріали, методи, методики та устаткування, які застосовувались для проведення досліджень.

Описане обладнання для комбінованих технологій: обладнання для протягування, установка для зварювання тертям.

Зокрема, для дослідження механічних властивостей біметалевих з'єднань використовували методики випробувань міцності на сплющування, біметалевих гільз на розрив, коаксіальних провідників на розрив та загин.

Наведені методики виготовлення мікрошліфів та мікроструктурних досліджень, обладнання для дослідження структури і фізико-механічних характеристик зони з'єднання міді з алюмінієм.

У **третьому розділі** наведені результати досліджень впливу довжини циліндричних мідно-алюмінієвих заготовок на формування мікроструктури отриманих ЗВ різnorідних з'єднань. Показано, що вакуумування зварювального проміжку зменшує вплив ударно-стисненого газу.

Встановлено, що інтенсифікація режимів зварювання вибухом (підвищення швидкості до 2600 м/с) призводить до формування границі з'єднання з нестабільними параметрами хвиль та утворення суцільного прошарку інтерметалідів, в тому числі й при вакуумуванні зварювального проміжку.

Обґрунтований ефект зменшення характеристик якості з'єднань при віддаленні від точки ініціювання детонації. Зменшення якості з'єднань пояснюється виникненням «канального ефекту» при ЗВ. Експериментальним шляхом здійснена оцінка впливу «канального ефекту» та встановлено, що товщина шару металу винесеного кумулятивним струменем із поверхонь контакту в 4...7 разів більша, ніж визначена шляхом теоретичних розрахунків.

Експериментально визначена залежність відносного подовження отриманих з'єднань від режиму термічної обробки мідно-алюмінієвого стрижня після ЗВ і протягування.

У **четвертому розділі** наведені результати досліджень формування напружено-деформованого стану (НДС) трубчастої вибухової камери для ЗВ при підриві плоского заряду.

Обґрунтований вибір розміру і типу скінчених елементів для забезпечення адекватності моделювання вибухового навантаження та оптимізації тривалості розрахунків. Для побудови скінченно-елементної сітки заряду вибухової речовини і повітря рекомендовано використовувати елементи кубічної форми з розмірами 6 і 12 мм відповідно.

За результатами проведених розрахункових досліджень встановлено, що траєкторії ліній-напружень у трубах камери не є паралельними твірній труб, а нахилені під деяким кутом. Показано, що у трубах другого і третього ряду показники компонентів НДС відрізняються. Результати розрахунку дозволили пояснити характер руйнування труб розрахованої на 200 кг вибухової речовини (ВР) у тротиловому еквіваленті камери.

Шляхом експериментальних досліджень при поетапному навантаженні підривом серії зарядів з поступовим збільшенням їх маси визначені напруження, що виникають у трубах камери. Показано, що результати математичного моделювання мають задовільну збіжність з отриманими експериментальним шляхом даними.

Встановлено, що максимальна маса ВР при одноразовому підриві у трубчастій вибуховій камері складає 2,4 кг у тротиловому еквіваленті.

У п'ятому розділі наведена схема технологічного процесу виготовлення коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопровідних елементів.

Представлені результати випробувань мідно-алюмінієвих з'єднань на згин після різних режимів термообробки та наведені результати вимірювань питомого електричного опору. За результатами руйнівних випробувань отриманих зварних з'єднань доведено, що після зламу відшарування міді від алюмінію не виявлено, а кількість перегинів з'єднань до руйнування та питомий електроопір відповідають вимогам технічних умов.

Розроблена технологія ЗВ за «зворотною» схемою. Показано, що для мінімізації деформації трубки, яка плакується, необхідно в її середню частину встановлювати сталевий стрижень із зазором, який заповнюється легкоплавким сплавом Вуда.

Розроблена комбінована (ЗВ + зварювання тертям) технологія отримання біметалевих мідно-алюмінієвих муфт для з'єднання гнучких багатожильних мідних та алюмінієвих кабелів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків дисертації.

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи мають теоретичні та експериментальні підтвердження. Обґрунтованість наукових положень і рекомендацій доведена методами математичного моделювання із застосуванням сучасних програмних комплексів для визначення кінетики розвитку процесу детонації ВР, параметрів повітряної ударної хвилі (УХ) і потоку продуктів детонації (ПД) при взаємодії з елементами конструкції трубчастої вибухової камери (ТВК), формування НДС в елементах ТВК під дією створених вибухом імпульсних високошвидкісних навантажень, результатами комплексних експериментальних досліджень по визначеню впливу умов и параметрів процесу ЗВ на структуроутворення зварних з'єднань та механічними випробуваннями отриманих з'єднань міді з алюмінієм. При проведенні досліджень мікроструктурної будови з'єднань застосовані методи оптичної та растрової

електронної мікроскопії, дослідження хімічного і фазового складу зварних з'єднань проводили методом Оже-мікрозондування з використанням енергодисперсійного спектрометра. Випробування фізико-механічних властивостей зварних з'єднань виконані із застосуванням стандартизованих методик та обладнання.

Отримані автором теоретичні та експериментальні закономірності щодо впливу параметрів та умов ведення процесу ЗВ на характеристики мікроструктурної будови та фазового складу зварних з'єднань міді та алюмінію, формування НДС в елементах конструкції ТВК, кінетики взаємодії УХ та ПД з трубчастими елементами та стрижневими зв'язками вибухової камери при ЗВ коаксіальних біметалічних струмоведучих елементів не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями і накопиченим досвідом по застосуванню ЗВ при з'єданні матеріалів. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджується визнанням на відомих міжнародних конференціях з матеріалознавства та зварювання, застосування високошвидкісних ударних навантажень та вибухових речовин для модифікування поверхневих шарів матеріалів.

Достовірність одержаних результатів. Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи мають теоретичні та експериментальні підтвердження. Про достовірність наукових положень роботи свідчить використання сучасних методів математичного моделювання кінетики процесів детонації ВР та взаємодії УХ і ПД з трубними елементами та стрижневими зв'язками конструкції ТВК, а також формування в них НДС під дією створеного вибухом ВР імпульсного тиску з урахуванням фізичних характеристик середовища та фізико-механічних властивостей труб та зав'язків камери зі сталі 09Г2С. Достовірність результатів та висновків роботи підтверджена експериментально шляхом порівняння розрахункових значень діючих тисків та створених в елементах конструкції ТВК напружень з результатами проведених на реальній конструкції камери вимірювань. Отримані розрахунковим шляхом результати мають добру збіжність з експериментальними даними.

Достовірність отриманих автором результатів та висновків підтверджена також результатами чисельних експериментальних досліджень по визначенням будови, хімічного та фазового складу різнопідрідних мідь-алюміній зварних з'єднань та результатами досліджень розподілу мікротвердості в зоні формування зварного шва, результатами фізико-механічних випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів:

Сукупність теоретичних положень і практичних результатів роботи може бути кваліфікована як аналіз, теоретичне узагальнення і рішення важливої науково-прикладної задачі, що можуть бути використані при створенні ЗВ довгомірних коаксіальних з'єднань з міді та алюмінію з високими характеристиками електропровідності, міцності, пластичності та надійності при виготовленні виробів електротехнічного призначення, а також при створенні обладнання для реалізації технологічного процесу ЗВ.

Вперше встановлено, що «канальний ефект» істотно посилюється при ЗВ за циліндричною схемою внаслідок унеможливлення бокового відтоку ударно-

стисненого газу і продуктів кумуляції із зварювального проміжку, а потік часток кумулятивних викидів металу та ударно-стиснутого газу, що рухається в зварювальному проміжку має значно більший вплив на поверхні з'єднувань заготовок циліндричної форми. Це призводить до збільшення кількості оплавленого металу уздовж довжини коаксіальних заготовок при ЗВ, що впливає на формування фазового складу зварного шва та зростанню об'ємної частки інтерметалідних включень на границі розподілу мідь-алюміній, фізико-механічні властивості отриманих з'єднань, супроводжується зменшенням пластичності та міцності зварних з'єднань на ділянках віддалених від точки ініціювання детонації.

Автором вперше запропоновано проводити ЗВ коаксіальних циліндричних з'єднань довжиною більше 10 діаметрів з вакуумуванням зварювального проміжку, досліджений механізм впливу вакуумування на утворення структури та характеристики якості з'єднань біметалу Al-Cu. Доведено, що вакуумування зварювального проміжку дозволяє зменшити ширину інтерметалідного прошарку в 1,4 рази при швидкості руху точки контакту 2000 м/с та у 1,2 рази при 2600 м/с, зменшити об'ємну долю інтерметалідів на ділянці з'єднання у 1,1 рази та в 1,15 рази відповідно.

Вперше, за результатами чисельного моделювання методом скінчених елементів за запропонованою автором оригінальною методикою та експериментальних досліджень визначені параметри силової дії продуктів вибуху на елементи конструкції ТВК та характеристики НДС, що формується в трубних елементах та силових зв'язках вибухової камери. Показано, що максимальна інтенсивність силової дії ударної хвилі від підриву плоского заряду спрямована вертикально, що необхідно враховувати при створенні нового обладнання для ЗВ.

Практичне значення роботи полягає в створенні оригінальної промислової технології виготовлення ЗВ з подальшим протягненням мідно-алюмінієвих біметалевих коаксіальних струмопроводів для систем управління авіатехніки та комбінованої (ЗВ та конвенційне зварювання тертям) технології отримання біметалевих переходників для з'єднання мідних і алюмінієвих багатожильних кабелів. Для реалізації технології ЗВ на основі встановлених автором закономірностей взаємодії високошвидкісних продуктів детонації ВР з елементами обладнання створена ТВК з автоматизованою системою завантаження заготовок, яка забезпечує підвищення продуктивності процесу ЗВ та розрахована на підрив до 2,4 кг ВР у ТНТ еквіваленті.

До практичного значення роботи слід віднести також запропоновану автором оригінальну методику визначення НДС конструкцій при високошвидкісному вибуховому навантаженні, визначені закономірності формування структурно-фазового складу довгомірних циліндричних коаксіальних з'єднань з міді та алюмінієм залежно від умов та параметрів ведення процесу ЗВ, запропоновану спеціальну конструкцію корпусу заряду, яка дозволяє забезпечити рівномірність ущільнення заряду ВР. Отримані автором відомості та результати можуть бути корисними для створення технологій ЗВ різномірних з'єднань інших матеріалів та виробів.

Впровадження результатів роботи. Розроблені автором технології ЗВ + **холодне протягнення** плакованої міддю алюмінієвої заготовки та **плакування** міддю **внутрішньої** поверхні алюмінієвої трубної заготовки з наступним

конвенційним зварюванням тертям застосовані при виготовленні на замовлення ДП «Антонов» дослідно-промислової партії мідно-алюмінієвих провідників діаметрами 8 та 8,8 мм із товщиною плакувального шару міді 300 мкм та для виготовлення на замовлення компанії «Eltech» (Республіка Корея) біметалевих перехідників діаметром 29 мм для з'єднання мідних і алюмінієвих багатожильних кабелів відповідно.

За результатами роботи розроблені і затверджені ДП «Антонов» та ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України технічні умови «ТУ У28.7-5416923-001 «Пруток алюмомідний електротехнічний, марки ПАМ».

Запропоновані автором технологічні рішення можуть бути рекомендовані до впровадження у виробництво в галузях енергетики, ракетно-космічної техніки, машинобудування, металургії та ін.

Повнота викладення основних результатів роботи в наукових фахових виданнях. Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 16 наукових роботах, 8 з них - у спеціалізованих наукових журналах, що входять до переліку ВАК України як фахові, 1 – опублікована у виданні, що входить до наукометричної бази Web of Science, 7 робіт у збірках міжнародних науково-технічних конференцій та 1 патент України.

Результати роботи достатньо широко висвітлені публікаціями в різних фахових виданнях, наприклад, журналах «Автоматичне зварювання», «Ізвестия ВолгГТУ, серія «Сварка взрывом и свойства сварных соединений», «Вісник НТУУ «КПІ». Серія. Машинобудування», «Проблемы прочности», матеріалах міжнародних конференцій «Shock waves in condensed matter», «Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials», «Explosive Production of New Materials», «Строительные конструкции спортивных и пространственных сооружений», «Прогресивна техніка і технологія».

Висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати роботи, у якій теоретично обґрунтовані та експериментально підтвердженні закономірності формування довгомірних коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при ЗВ, створені технологія та автоматизоване обладнання для виготовлення мідно-алюмінієвих струмопровідних вузлів та перехідних елементів циліндричного перерізу з високими показниками електропровідності, міцності та пластичності.

Висновки сформульовані коректно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Зміст дисертації і автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює наведені в самій дисертаційній роботі результати.

У цілому дисертація оформлена ретельно і грамотно, побудована логічно і зрозуміло, але є деякі зауваження та коментарі.

Зауваження та коментарі по дисертації

1. Для спрощення сприйняття та кращого розуміння наведених у дисертаційній роботі результатів бажано було б навести загальний перелік використаних скорочень. В розділі 2 навести фізичні властивості досліджених середовищ та фізико-механічні властивості матеріалів, зокрема і сталі 09Г2С, застосовані хімічні розчини та режими травлення зразків при вивчені мікроструктури зварюваних з'єднань.

2. Робота має деякі некоректності, неточності та описки. Наприклад, «...біля основи горбів деформації», стор. 3; «...відносне подовження після холодного протягування зростає з 11,6% у стані до 57,5%», стор. 4; «...отримання сполук, що мають міцність на відрив...», стор. 25; «...метаючої пластиини...», табл. 1.1; «...в умовах негативних температур...», стор. 37; «...у ділянці інтерметаліду», стор. 62; «...зростання обсягової частки...», стор. 67; «...напруги...», рис. 4.11 та стор. 118, 4 абзац та ін., що дещо ускладнює сприйняття роботи.

3. Положення 2 та 3 наукової новизни бажано було б конкретизували.

4. В описі підготовки зразків на стор. 67 автор вказує, що «...алюмінієві стрижні зачищали наждачним папером із величиною зерна Р120», однак при підготовці до зварювання високопластичних матеріалів не рекомендовано застосовувати абразивні матеріали в наслідок шаржування в метал дисперсних часток абразиву. Зокрема на рис. 3.13 на ділянці з'єднання зі сторони алюмінію чітко виділяються компактні включення кубічної форми невідомої фази.

5. На стор. 63 вказано, що «Величину вакууму встановлювали на рівні 20 кПа», на стор. 67 «Зварювання вибухом проводилося у двох режимах, при швидкості зіткнення 320 м/с і 390 м/с та швидкості точки контакту 2000 м/с і 2600 м/с відповідно». Бажано пояснити, чому автор обрав саме такі умови та режими ЗВ. Як вимірювали ширину інтерметалідного прошарку та об'ємну частку інтерметалідів (рис. 3.3 та 3.4), оскільки товщина шару інтерметалідів згідно рис. 3.2 та інших не є постійною, яким чином здійснено вимірювання «..ширини зони пластичної деформації в Al...», стор. 76, рис. 3.7?

6. Ствердження автора на стор. 77, що «...при ЗВ за циліндричною схемою відбувається більш інтенсивне нагрівання поверхневого шару, порівняно з плоскою схемою, і тонкий шар алюмінію, що має низьку температуру плавлення, частково відпалюється і стає м'якшим» викликає сумніви, оскільки такі вимірювання або оцінка впливу високошвидкісної деформації та кумулятивного струменю на розподіл температур не проводилися.

7. На стор. 94 автор вказує, що «Для проведення комп'ютерного моделювання в ролі матеріалу ВР був взятий склад заряду HNS-1 (США), за характеристиками близький до амоніту №6 ЖВ», однак початкова щільність заряду HNS-1 дорівнює $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, а швидкість детонації 5100 м/с, при цьому в табл. 2.6 вказано, що насипна щільність амоніту №6 ЖВ складає $680 - 980 \text{ кг}/\text{м}^3$, а швидкість детонації 2,3...4,6 м/с, що як мінімум на 10 % менше за HNS-1. В подальшому при моделюванні впливу вибухових навантажень на НДС елементів ТВК на стор. 106 автор розрахував значення параметрів рівняння стану (4.1) у формі Джонса-Уілкінса-Лі (JWL) для амоніту №6 ЖВ, тому не зрозуміло чому автор не використав ці данні при визначені зміни тиску на фронті детонаційної хвилі при моделюванні процесу вибуху заряду ВР на скінченно-елементних сітках з різною роздільною здатністю. За якою методикою визначений приріст величини похибики у %, наведений в табл. 4.2.

8. На рис. 4.8 – 4.10 не зовсім вдало обрані шкали тисків та напружень, бажано було б навести схему для кращого розуміння пояснень наведених на стор. 112, 4 абзац.

9. Наведені на рис. 4.18 дані важко проаналізувати, оскільки за результатами експерименту визначені лише деякі значення компонент НДС конструкції ТВК, а за результатами моделювання еквівалентні напруження.

10. Бажано пояснити, з якою метою були проведені дослідження по обтисненню вибухом алюмінієвого стрижня мідною трубкою за відсутності проміжку між рухомою та нерухомою заготовками (стор. 123), оскільки відомо, що наявність проміжку є необхідною умовою формування з'єднання при ЗВ, та стрибкоподібну зміну мікротвердості алюмінієвої поверхні біметалічної гільзи, що наведена на рис. 5.24.

Однак відзначені недоліки та зауваження не зменшують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

Загальний висновок. Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота Шльонського П.С. є завершеною науково-дослідною розробкою, яка присвячена актуальній проблемі встановлення закономірностей формування довгомірних коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при зварюванні вибухом, створенню технології та автоматизованого обладнання для виготовлення мідно-алюмінієвих струмопровідних елементів циліндричного перерізу з високими експлуатаційними характеристиками.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем представлена робота відповідає вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою КМ України від 24 липня 2013 р. за № 567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор **Шльонський Павло Сергійович** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

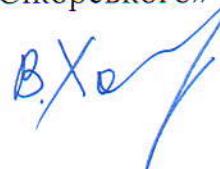
Офіційний опонент,
в.о. завідувача кафедри зварювального виробництва
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
доктор технічних наук, професор


B.V. Кvasničkij

Підпис в.о. завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», д.т.н, проф. Кvasničkого В.В. засвідчує:

Вчений секретар
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»




B.V. Холявко