

В.К. М. С.П. 08. 04. 2021

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу ШЛЬОНСЬКОГО ПАВЛА СЕРГІЙОВИЧА
на тему «ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ
КОАКСІАЛЬНИХ СТРУМОПРОВОДІВ»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Актуальність обраної теми

Тема дисертаційної роботи Шльонського П.С. присвячена розробці технології отримання мідно-алюмінієвих струмопровідних коаксіальних з'єднань з використанням процесу зварювання вибухом і обладнання для її реалізації.

Біметалічні електропровідні вироби широко використовуються в електроенергетиці, авіабудуванні, металургії та інших галузях промисловості. Одним з найважливіших практичних завдань є необхідність з'єднання між собою матеріали і сплави істотно різні за фізико-хімічними властивостями (сталь-алюміній, сталь-титан, мідь-титан та інші). Найбільш затребуваними при цьому є з'єднання міді з алюмінієм.

В процесі експлуатації зазначені вироби сприймають суттєві термічні, механічні навантаження, корозійний та електрохімічний вплив. Завдання створення технології зварювання різнорідних металів ускладнюються ще й тим, що більшість з цих пар має обмежену розчинність один в одному, в результаті чого на границі з'єднання цих металів, як правило, утворюються інтерметалідні з'єднання, які суттєво погіршують як технологічні, так і експлуатаційні властивості біметалічного виробу.

Найбільш ефективним способом отримання струмопровідних біметалів є зварювання вибухом. Про це свідчить успішний досвід використання даного процесу для отримання плоских мідно-алюмінієвих заготовок.

У той же час, виготовлення за допомогою зварювання вибухом коаксіальних провідників і перехідників являє собою досить складну науково-технічну задачу. Незважаючи на очевидні переваги зварювання вибухом, даний спосіб має ряд обмежень для отримання якісних композиційних матеріалів циліндричної форми. При плакуванні довгомірних циліндричних заготовок виникає проблема зниження міцності по мірі віддалення від точки ініціювання процесу зварювання, а характер вибухового впливу на зварювані метали складно піддається розрахунку. Розігрітий ударно-стиснений газ, що утворюється в зварювальному проміжку, розігріває поверхні, що зварюються, інтенсивніше, ніж при плакуванні плоских виробів. Це обумовлює необхідність пошуку шляхів зниження впливу ударно-стиснутого газу.

В якості обладнання для зварювання вибухом використовуються вибухові камери. Їх автоматизація дозволить підвищити продуктивність процесу зварювання вибухом, а

математичне моделювання процесу вибухового навантаження при їх проектуванні дозволить заощадити час та матеріали.

Враховуючи викладене, тематика якій присвячена дисертаційна робота, є актуальною та повністю відповідає спеціальності 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології».

Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові результати, сформульовані принципи і висновки мають наукову значимість та практичну цінність.

У роботі використані експериментальні та теоретичні (розрахункові) методи досліджень. Достовірність отриманих результатів в цілому, пояснення наукових положень, висновків і рекомендацій, що випливають з роботи, не викликають ніяких сумнівів, оскільки вони теоретично обґрунтовані і мають експериментальне підтвердження. Результати роботи апробовано на міжнародних наукових конференціях та опубліковано у фахових виданнях.

Повнота викладу основних результатів дисертаційної роботи в наукових публікаціях

Основні наукові результати дисертаційної роботи Шльонського П.С. викладені у 16 публікаціях: 8 – у вигляді статей у фазових журналах, з яких одна в наукометричній базі Web of Science, 7 тез доповідей на міжнародних конференціях та 1 патент України. Опубліковані роботи повною мірою відображають зміст дисертації.

Ідентичність за змістом автореферату й основних положень дисертації

Автореферат за змістом ідентичний дисертації. В дисертаційній роботі та авторефераті повно відображено актуальність роботи, мету та завдання, основні наукові положення, практичну значущість і загальні висновки.

Загальна характеристика змісту дисертації

Дисертаційна робота викладена на 176 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Робота ілюстрована 79 рисунками та включає 24 таблиці та 19 формул. Список використаних джерел складається зі 139 найменувань.

У вступі обґрунтовано вибір та актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами та темами; визначено особистий внесок здобувача та наведено відомості про апробацію та публікації результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі проводиться аналіз способів виготовлення мідно-алюмінієвих біметалевих матеріалів і вузлів електротехнічного призначення. В Розділі проаналізовані існуючі способи виготовлення і області застосування біметалевих мідно-алюмінієвих коаксіальних з'єднань, описані особливості і основні параметри зварювання вибухом.

Проаналізовано роботи, присвячені структурній та хімічній неоднорідності мідно-алюмінієвих з'єднань, і вплив атмосфери в зварювальному проміжку на їх властивості. У літературі питання впливу температуро-часових умов на структурні і фазові перетворення на межі розділу шарів мідно-алюмінієвого біметалу освітлено досить повно. Разом з тим показано, що отримані результати носять суперечливий характер.

Проведено аналіз існуючого захисного обладнання для зварювання вибухом.

На підставі комплексного аналізу літературних джерел підтверджено актуальність обраної теми та сформульовано мету і основні завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалу і використаних методів, методик та устаткування для проведення досліджень. У роботі в якості зварювальних матеріалів були використані алюміній марки АД1 і мідь марки М1. Наведено склад і механічні властивості використовуваних матеріалів.

В якості вибухових речовин для зварювання металів вибухом застосовували амоніт № 6ЖВ.

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

Наведено методи дослідження механічних властивостей біметалевих з'єднань, отриманих за комбінованою технологією: методика випробування міцності на сплющування, методика випробувань біметалевих гільз на розрив, методика випробувань коаксіальних струмопроводів на розрив і загин.

Наведено методику виготовлення мікрошліфів і обладнання для дослідження структури біметалевих матеріалів.

Описано методику вакуумування зварювального проміжку.

У третьому розділі досліджено вплив довжини коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок на мікроструктуру з'єднань, отриманих зварюванням вибухом.

Встановлено, що при зварюванні вибухом міді з алюмінієм за коаксіальною схемою з вакуумуванням зварювального проміжку можливо отримати заготовку без дефектів плакування довжиною до 500 мм, при діаметрі 26 мм, а при зварюванні без вакуумування зварювального проміжку тільки до 200..250 мм при тому ж діаметрі.

Металографічні дослідження показали, що вакуумування зварювального проміжку дозволяє знизити ширину інтерметалідного прошарку майже в 1,4 рази по довжині при швидкості точки контакту $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і в 1,2 рази при $V_k = 2600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Це дозволило знизити об'ємну частку інтерметалідів на 10 % і на 15 % при зварюванні на вищевказаних режимах відповідно.

Вперше введено і описано явище «канального ефекту» при зварюванні вибухом, який полягає у виникненні у зварювальному проміжку потоку кумулятивних викидів металу і ударно-стиснутого газу, фронт якого рухається з надзвуковою швидкістю.

Показано, що при зварюванні вибухом міді з алюмінієм за плоскою схемою утворюється менша кількість інтерметалідів, ніж при зварюванні на аналогічному режимі за циліндричною схемою

Експериментально визначено режим термічної обробки мідно-алюмінієвого стрижня після холодного протягування зі ступенем деформації 90%, при якому відносне подовження збільшується з 11,6 % в початковому стані до 27,5 % без утворення на границі з'єднання інтерметалідного прошарку.

У четвертому розділі представлена розробка трубчастої вибухової камери для зварювання вибухом малогабаритних виробів.

Проведена автоматизація роботи і представлено експериментальне дослідження напружено-деформованого стану в елементах трубчастої вибухової камери.

Розроблено методику чисельного моделювання плоского заряду для зварювання вибухом у вибуховій камері та методику визначення напружено-деформованого стану силових елементів трубчастої вибухової камери під час вибуху в ній плоского заряду вибухової речовини кінцевих розмірів. Проведено моделювання впливу вибухових навантажень на напружено-деформований стан елементів трубчастої камери. Зіставлені розрахункові та експериментальні значення напружень, що виникають в трубах вибухової камери. Величини розрахункових напружень, які визначаються за допомогою запропонованої методики, добре корелюють з експериментальними результатами.

Встановлено, що напруження, які виникають в елементах конструкції, залежать від «широтної» координати таким чином, що в нижніх рядах труб вони мінімальні, а в рядах труб поблизу вертикальної труби – максимальні. Показано, що напруження в елементах камери однакові при використанні зарядів однакової маси з амоніту № 6ЖВ і його сумішей з селітрою, а при використанні сумішей амоніту з піском вони зменшуються.

На основі проведених досліджень створено автоматизовану трубчасту вибухову камеру з допустимою масою підриву заряду 2,4 кг у тротиловому еквіваленті.

П'ятий розділ присвячений розробці комплексної технології виготовлення мідно-алюмінієвих струмопроводів і гільз для з'єднання багатожильних кабелів.

Результати проведених досліджень стали основою для розробки технології виготовлення мідно-алюмінієвих струмопроводів для систем управління авіатехніки за допомогою зварювання вибухом біметалічних заготовок коаксіальної форми і подальшого їх протягання. Розроблено спеціальну форму алюмінієвої заготовки зі змінним діаметром, яка має ряд переваг, порівняно з циліндричною заготовкою сталого діаметру

Розроблено метод розрахункової оцінки оптимальних геометричних параметрів вихідних заготовок алюмінієвого стрижня і мідної трубки, з метою отримання після протягування товщини плакуючого шару, який відповідає технічним умовам.

Розроблено комбіновану (зварювання вибухом + зварювання тертям) технологію отримання біметалевих мідно-алюмінієвих муфт для з'єднання гнучких багатожильних мідних і алюмінієвих кабелів.

У загальних висновках, що сформульовані в дисертаційній роботі, в повній мірі відображено результати проведених автором досліджень

Наукова новизна отриманих результатів

Автором вперше визначено проявлення «канального ефекту» при зварюванні вибухом. Визначено його спільні риси та відмінності від традиційного «детонаційного канального ефекту», які полягають у впливі на поверхні, що зварюються, потоку кумулятивних викидів металу і ударно-стиснутого газу, який рухається в зварювальному проміжку. Встановлено, що канальний ефект істотно посилюється при зварюванні вибухом за циліндричною схемою внаслідок відсутності бокового відтоку із зварювального проміжку ударно-стисненого газу і продуктів кумуляції.

В роботі розвинуто уявлення про основні причини, що призводять до збільшення кількості оплавленого металу по мірі віддалення від точки ініціювання детонації для коаксіальних заготовок при зварюванні вибухом. Встановлено, що при зварюванні вибухом плоских і циліндричних виробів з міді і алюмінію на близьких режимах, об'ємна доля інтерметалідних включень на границі циліндричних виробів суттєво збільшується завдяки посиленню «канального ефекту».

Дисертантом вперше встановлено та досліджено механізм впливу вакуумування зварювального проміжку на структуру та якість з'єднання біметалу Al-Cu при зварюванні вибухом.

Автором розроблено оригінальну методику визначення напружено-деформованого стану в силових елементах трубчастої вибухової камери, при зварюванні вибухом за допомогою чисельного моделювання методом скінченних елементів. Встановлено, що максимальна дія ударної хвилі від підриву плоского заряду направлена вертикально.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження

Розроблено технологію виробництва зварюванням вибухом з подальшим протяганням мідно-алюмінієвих біметалевих коаксіальних струмопроводів для систем управління авіатехніки. Якість біметалевих стрижнів відповідає технічним умовам і конструкторській документації ДП «Антонов». На замовлення Підприємства була виготовлена партія стрижнів діаметрами 8,0 і 8,8 мм, з товщиною мідного шару 300 мкм.

На замовлення компанії **Eltech (Республіка Корея)** виготовлена партія біметалевих перехідників діаметром 29 мм для з'єднання мідних і алюмінієвих багатожильних кабелів.

Зауваження до автореферату та дисертаційної роботи

Разом з високою оцінкою представленої кандидатської дисертації, слід відзначити такі зауваження:

1. У розділі 2 не описано методику вимірювання швидкості детонації.

2. Роблячи висновок про відмінність швидкості зіткнення поверхонь, які зварюються вибухом, при вакуумуванні і наявності повітря, автор не робить кількісної оцінки швидкостей. На мою думку, визначення значень швидкостей зіткнення у вакуумі і без, дозволить регулювати якість зварного з'єднання не тільки для пари «мідь-алюміній», а й для інших пар металів, що утворюють інтерметаліди.

3. Основна увага у дисертації приділена впливу частки і ширини інтерметалідної фази. При цьому, оцінка впливу цих параметрів на такі властивості матеріалу, як міцність, пластичність та в'язкість в зоні зварювання вибухом залишилися не вивченими.

4. Вибір розміру сітки для моделювання (розділ 4 дисертації, пункт 4.1) наведено із надмірними подробицями.

Наведені зауваження на знижують загальної позитивної оцінки та практичного значення дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що представлена дисертаційна робота Шльонського Павла Сергійовича є завершеною науково-дослідною роботою, що присвячена розробці технології отримання мідно-алюмінієвих струмопровідних коаксіальних з'єднань зварювання вибухом.

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.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем, представлена дисертаційна робота відповідає вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо кандидатських дисертацій, а її автор Шльонський Павло Сергійович заслуговує присудження наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та спорідненні процеси і технології.

Офіційний опонент,

ректор Національного університету

«Чернігівська політехніка»

доктор технічних наук, доцент



О.О. Новомлинець