

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

**Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона**

**Шльонський Павло Сергійович**



УДК 621.791.76:621.7.044.2

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ МІДНО-  
АЛЮМІНІЄВИХ КОАКСІАЛЬНИХ СТРУМОПРОВОДІВ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Пацин Микола Олександрович,**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент

**Новомлинець Олег Олександрович,**  
Національний університет «Чернігівська  
політехніка» МОН України, ректор

доктор технічних наук, професор

**Квасницький Віктор В'ячеславович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського» МОН України, завідувач кафедри  
зварювального виробництва, Інститут  
матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона

Захист відбудеться «27» квітня 2021 р. о 12<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України: Україна, 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України: Україна, 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

Автореферат розіслано «23» березня 2021 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.182.01,  
кандидат технічних наук



Є.В. Шаповалов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми:** Отримання нових високоякісних матеріалів із заданими властивостями завжди відносилось до головних завдань науково-технічного прогресу. Одним з напрямків його вирішення є розробка нових прогресивних технологій, в тому числі заснованих на комбінуванні різних способів зварювання або зварювання з наступним механічним впливом (наприклад, прокатка або протягання).

Біметалічні вироби циліндричної форми широко використовуються в електроенергетиці, авіабудуванні, різних галузях машинобудування, металургії і т. і. Дані вироби працюють під дією механічних навантажень, є провідниками електричного струму і схильні до електрокорозійного руйнування. Наприклад, струмопровідні елементи систем управління авіатехніки повинні мати низький електроопір, високі пластичні властивості і низьку питому вагу. Мідь задовольняє тільки першим двом з вище перерахованих властивостей. Також для з'єднання різнорідних (мідних і алюмінієвих) багатожильних кабелів електричних мереж доцільно використовувати мідно-алюмінієві коаксіальні перехідники. Зварювання вибухом (ЗВ), в силу притаманних йому особливостей і переваг, є одним із ефективних методів отримання біметалічних мідно-алюмінієвих елементів.

Незважаючи на успіхи, досягнуті в дослідженні процесу ЗВ міді і алюмінію завдяки роботам українських і зарубіжних вчених В. М. Кудінова, Л. Д. Добрушина, В. Г. Петушкова, А. А. Дерібаса, В. С. Сєдих, В. І. Лусака, Ю. П. Трикова., С. В. Кузьміна, Л. Б. Первухіна, В. Crossland, А. Bahrani. та ін., відкритим залишається питання отримання коаксіальних з'єднань з даних матеріалів. Це пов'язано з тим, що на процес утворення з'єднання при коаксіальному зварюванні вибухом міді з алюмінієм впливає середовище, яке утворюється в проміжку між поверхнями, що зварюються. Перед точкою контакту утворюється «пробка» із розігрітого ударно-стисненого повітря і продуктів кумуляції. При коаксіальному розташуванні заготовок, які зварюються, ускладнена можливість бокового витоку «пробки» із проміжку. В результаті чого наростає її довжина і, як наслідок, час впливу температури. Враховуючи низьку міцність матеріалів, які зварюються, та низьку температуру плавлення алюмінію, задача ЗВ за коаксіальною схемою для даної пари металів ускладнюється у порівнянні зі зварюванням за плоскою схемою. Це вказує на необхідність проведення досліджень, що направлені на більш глибоке розуміння процесів у зварювальному проміжку та розробку спеціальних заходів для підвищення якості зварювання.

Разом з тим, при зварюванні вибухом існує необхідність захисту обслуговуючого і виробничого персоналу від вражаючих факторів вибуху. Вибухові камери є універсальним засобом захисту від дії вибуху. До їх переваг відносяться: автоматизація роботи, дистанційне керування, невеликі габарити, можливість установки у межах міста.

Питанням розробки вибухових камер присвячено багато експериментальних і теоретичних робіт. Оскільки розрахунки навантажень від дії вибуху по відомим методикам дають результати, які суттєво відрізняються, то при проектуванні камер проводять масштабне моделювання. Це призводить до витрат матеріалів та часу. На сьогоднішній день існують потужні математичні пакети, що дозволяють проводити чисельне моделювання процесу вибуху і його впливу на конструкційну міцність камери. У зв'язку з цим актуальним є використання математичного моделювання для визначення напруженого стану вибухової камери.

**Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дана робота виконана в рамках наступних тем НАН України: “Дослідження фізичних відмінних рис процесу зварювання металів вибухом при атмосферному тиску і в умовах глибокого розрідження (вакууму) та розробка відповідних технологічних схем реалізації процесу” (2013-2015 рр.) згідно постанови Бюро ВФТПМ НАН України від 06.11.12 № 16, № державної реєстрації 0113U000787 (08.01.13 р.), “Дослідження вибухових процесів зварювання у захисних газах та різання гнучким кумулятивними зарядами, а також розробка відповідних технологій металообробки вибухом” (2006-2008 рр.) згідно постанови Бюро

ВФТПМ НАН України від 26.09.06 № 16, № державної реєстрації 0103U012281 (20.01.06 р.). “Дослідження структури, механічних властивостей та параметрів електропровідності коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопроводів систем керування авіатехніки, що отримані шляхом обтискання вибухом – протягання” (2011 р.) за протоколом засідання директорату ІЕЗ ім. Є.О. Патона від 15.11.10 р. № 5, № державної реєстрації 0111U00737 (23.02.11 р.)

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної дисертаційної роботи є створення із застосуванням зварювання вибухом технології отримання коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопровідних вузлів, перехідних елементів і устаткування для її реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв’язати наступні завдання:

1. Дослідити вплив довжини мідно-алюмінієвих коаксіальних заготовок на структуру і якість з’єднань, які одержані зварюванням вибухом. Вивчити вплив вакуумування зварювального проміжку на формування з’єднання міді з алюмінієм в процесі зварювання вибухом довгомірних циліндричних виробів.

2. Вивчити вплив каналного ефекту на структуру мідно-алюмінієвих коаксіальних з’єднань, отриманих зварюванням вибухом.

3. Вивчити вплив термічної обробки на структуру зони коаксіального з’єднання міді з алюмінієм після зварювання вибухом і подальшого протягання. Розробити режими термічної обробки, що забезпечують задані пластичні властивості коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок при мінімальній кількості утворених інтерметалідів.

4. На підставі комп’ютерного моделювання визначити найбільш навантажені зони трубчастої вибухової камери.

5. Експериментально дослідити вплив маси зарядів, що підриваються, на напружено-деформований стан елементів камери і оцінити точність виконання моделювання.

6. Розробити технологію виробництва на базі зварювання вибухом коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопроводів для систем управління авіатехніки та біметалевих мідно-алюмінієвих гільз для з’єднання багатожильних кабелів.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

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

2. Розвинуто уявлення про основні причини, що призводять до збільшення кількості оплавленого металу уздовж довжини 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 «каналного ефекту».

3. Вперше встановлено та досліджено механізм впливу вакуумування зварювального проміжку на структуру та якість з’єднання біметалу Al-Cu при зварюванні вибухом.

4. Розроблена оригінальна методика 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.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено промислову технологію отримання 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». Виготовлена промислова партія стрижнів діаметрами 8,0 мм і 8,8 мм і товщиною мідного шару 0,3 мм.

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

Для виконання зварювання вибухом створена трубчаста вибухова камера з підвищеною продуктивністю завдяки автоматизації системи завантаження заготовок, які зварюються. Камера розрахована на підрив до 2,4 кг вибухової речовини у ТНТ еквіваленті.

**Об'єкт досліджень:** біметалеві коаксіальні мідно-алюмінієві електротехнічні вироби, які отримані зварюванням вибухом.

**Предмет досліджень:** структура, електрофізичні властивості і міцність коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм, отриманих зварюванням вибухом із застосуванням різних технологічних схем обробки після зварювання.

**Методи досліджень.** У роботі використані сучасні методи і методики досліджень: світлова та растрова електронна мікроскопія, статичні механічні випробування, математичне моделювання, тензометрія.

**Особистий внесок здобувача** полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи, формулюванні мети і завдань дослідження, виборі загальних і створенні спеціальних методів їх вирішення, безпосередньої участі в плануванні та проведенні експериментів, участь в розробці технологічних процесів виготовлення мідно-алюмінієвих провідників і перехідників для з'єднання мідних кабелів з алюмінієвими, участь у проектуванні і виготовленні трубчастої вибухової камери. Сформульовано загальні концептуальні підходи до розробки математичної моделі. Здобувачем також сформульовано основні положення наукової новизни і загальні висновки дисертаційної роботи.

В роботах, виконаних у співавторстві здобувачу належить наступне: у праці [1] – досліджено та здійснено аналіз впливу довжини заготовки і вакуумування зварювального проміжку на мікроструктуру зони з'єднання; [2, 13, 14] – експериментально досліджено вплив вакуумування проміжку при зварюванні вибухом довгомірних коаксіальних заготовок; [3] – запропоновано розрахункову методику оцінювання геометричних параметрів для вибору типорозміру заготовок; [4, 10] – запропоновано схему проведення експерименту; [5] – систематизовано інформацію про наявні сучасні камери для зварювання металів вибухом; [6, 7, 15, 16] – здійснено постановку завдань для проведення чисельного моделювання розльоту продуктів детонації і поширення повітряних ударних хвиль під час вибуху плоского заряду, оцінено напружено-деформований стан елементів трубчастої вибухової камери; [9] – запропоновано спосіб автоматизації трубчастої вибухової камери та герметизації візка-опори; [11, 12] – проведено аналіз результатів досліджень.

**Апробація роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних наукових конференціях: VIII Межд. конф. «Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials». - Москва, 11-14.09.2006; X International Symposium Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. - Bechichi, Montenegro 7-11, 2010; XI International Symposium Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. - Strasbourg, France 2-5, May 2012; XIV International Symposium Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. – St. Peterbourg, Russia 14-18, May 2018; Материали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Строительные конструкции спортивных и пространственных сооружений» Київ 06-10. 09. 2010; XII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка і технологія» Київ-Севастополь 20-24 червня, 2011; International Conference Shock waves in condensed matter, Kyiv, Ukraine, 16-21 September 2012.

#### **Публікації.**

По темі даної дисертації опубліковано 16 наукових праць, в тому числі 8 статей у фахових журналах, з яких 1 в наукометричній базі Web of Science, 7 тез доповідей на міжнародних конференціях та 1 патент України.

#### **Структура і об'єм роботи.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і 1 додатка. Дисертація має загальний

обсяг 176 сторінок, включаючи 79 рисунків, 24 таблиць, 19 формул та список літературних джерел із 139 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** дана загальна характеристика роботи, обґрунтована її актуальність, сформульовано мету та визначено основні завдання, які необхідно вирішити для її досягнення. Показана наукова новизна і практичне значення отриманих результатів.

**У першому розділі** на основі опублікованих даних виконано аналіз способів отримання мідно-алюмінієвих з'єднань. Розглянуто основні переваги та недоліки кожного зі способів. Дослідження В. М. Кудінова, В. С. Сєдих, А. Г. Кобелева, В. І. Лисака, Н.П Козака, С.В Кузьміна, Л. Б Первухина, Ю. П Трикова, Ю.А Конона, Л. Д Добрушина, В. Г. Петушкова, В. Г Шморгуна, А. П. Пєєва, Е. А. Чугунова та ін. показали, що способом, який забезпечує отримання якісних з'єднань міді з алюмінієм, є зварювання вибухом. Слід зазначити, що більшість цих робіт присвячено проблемі отримання листового біметалу або тришарового композитного матеріалу, одержуваного за батареиною схемою.

Проведено аналіз робіт щодо впливу середовища в зварювальному проміжку при зварюванні вибухом на якість одержуваного з'єднання. Розглянуто літературні дані, що стосуються впливу температурно-часових і деформаційних дій на розвиток хімічної неоднорідності і сполук на границі розділу шарів, отриманих зварюванням вибухом.

Показано перспективність використання вибухових камер для локалізації шкідливих факторів вибуху та необхідність автоматизації процесу зварювання.

На підставі аналізу матеріалів попередніх досліджень були сформульовані мета і завдання дисертаційної роботи, вирішення яких послужить основою при розробці нових науково обґрунтованих технологічних процесів отримання коаксіальних мідно-алюмінієвих з'єднань для підприємств авіабудування і енергетичного комплексу.

**У другому розділі** визначено матеріали, методики та обладнання для проведення досліджень. У якості матеріалів, які зварюються, були використані сплав алюмінію (АД1) і електротехнічна мідь (М1). У якості вибухових речовин використовували суміш амоніту №6ЖВ з піском у різних відсоткових співвідношеннях.

Металографічні дослідження структури металів після зварювання вибухом і термічної обробки проводили за допомогою оптичних мікроскопів ММО-1600НА зі збільшенням до 1600х, Versamet-2 і Неофот-32. Фотографування мікроструктури здійснювалося за допомогою камери CMOS (фірма KONUS, Італія) з розеткою USB. Також дослідження структури, хімічного і фазового складу поверхні зразків проводилися на Оже-Мікрозонд JAMP-9500F фірми "JEOL" (Японія). Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3, при навантаженні 0,1 Н.

Механічні випробування на розрив виконували на установці ЦД-4. Випробування на сплющування, враховуючи низьку міцність і високу пластичність використаних матеріалів, проводили в слюсарних лещатах. Міцність зчеплення шарів коаксіального з'єднання міді і алюмінію після протягування виконували згідно ГОСТ 1579-93, із застосуванням спеціалізованого оснащення.

Протягування зварених вибухом коаксіальних мідно-алюмінієвих стрижнів виконували на установці для протягання подовжених кумулятивних зарядів ОБ2067, яка була розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Зварювання тертям мідно-алюмінієвих трубок з трубкою із чистого алюмінію виконували на установці СТ-120.

Вимірювання падіння електричної напруги на мідно-алюмінієвих стрижнях були проведені на стенді ДП «Антонов».

Для вакуумування зварювального проміжку використовували форвакуумний насос.

У **третьому розділі** представлені результати дослідження впливу довжини коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок, що зварюються вибухом, на мікроструктуру отриманих з'єднань. Для зменшення впливу ударно-стиснутого повітря виконували вакуумування зварювального проміжку.

Зварювання вибухом проводили на двох режимах, при швидкості точки контакту  $2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  і  $2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , які характеризують верхню та нижню границі зварювання даної пари металів. Параметри режиму зварювання визначали, виходячи з досвіду плакування плоских заготовок біметалу мідь-алюміній. Зразки для проведення досліджень із заготовок вирізали у трьох місцях: початок, середина і кінець біметалічного зразка (відповідно 100 мм, 500 мм і 900 мм від точки ініціювання).

У результаті проведеного дослідження встановлено, що при зварюванні вибухом міді із алюмінієм на режимі при швидкості точки контакту  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , лінія з'єднання має профіль близький до хвилеподібного з присутністю на ньому ділянок оплавленого металу біля основи горбів деформації. Крім того, пластична течія у металах, які зварюються, однорідна в напрямку вектору швидкості точки контакту. Інтенсифікація режимів зварювання (збільшення швидкості точки контакту до  $2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) призводить до формування хвильового профілю з'єднання з нестабільними параметрами хвиль і утворення суцільного прошарку з інтерметалідів як у вакуумі, так і без нього. При цьому утворюються завихрення біля впадин хвиль, всередині якого спостерігаються рихлості, частки міді і інші включення (рис. 1).

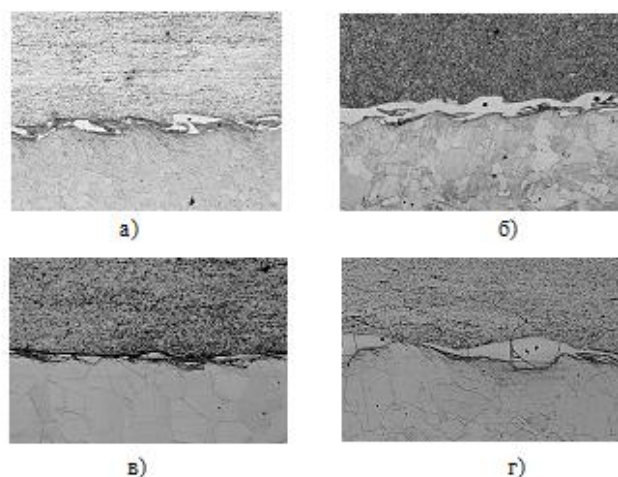


Рис. 1. Мікроструктура межі з'єднань алюміній-мідь ( $\times 150$ , алюміній зверху):

- а) -  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі;
- б) -  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі;
- в) -  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі;
- г) -  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі

меншій мірі – за рахунок канального ефекту. Тобто, канальний ефект слабо виражений на малій відстані від початку ініціювання процесу ЗВ.

Схожим чином виглядає і графік залежності ширини інтерметалідного прошарку від режиму і відстані від початку зварювання (рис. 3).

Таким чином, можна стверджувати, що вакуумування зварювального проміжку при ЗВ довгомірних коаксіальних з'єднань дозволяє знизити ширину і об'ємну частку інтерметалідного прошарку, але водночас не дозволяє уникнути утворення інтерметалідів.

За результатами порівняння мікроструктури з'єднань після ЗВ за плоскою і циліндричною схемами, виявлено, що при близьких параметрах режиму зварювання в циліндричних зразках кількість інтерметалідних включень значно більше (рис. 4). Це пов'язано з впливом розігрітого ударно-стиснутого газу, який, не маючи можливості

Зростання об'ємної частки інтерметалідів в зоні з'єднання (рис. 2) в міру віддалення від точки ініціювання, незалежно від середовища в зварювальному проміжку (повітря або вакуум), пов'язане з канальним ефектом при зварюванні вибухом. Встановлено, що при зварюванні в повітрі на режимі при  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  на початку зразка об'ємна частка інтерметалідів дорівнює 60%, а при зварюванні у вакуумі на тому ж режимі – 48%. При цьому відношення об'ємної частки інтерметалідів в повітрі до цієї ж частки в вакуумі на початку зразка при зварюванні на режимі  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  приблизно однакова. Це свідчить про те, що при збільшенні швидкості точки контакту перехід кінетичної енергії в теплову відбувається переважно за рахунок пластичної деформації металу біля зони з'єднання і в

бокового витоку, набагато інтенсивніше впливає на коаксіальні поверхні, що зварюються, ніж у випадку з плоскими зразками. При цьому виключається можливість розширення зварювального проміжку попереду фронту детонації через жорсткість труби.

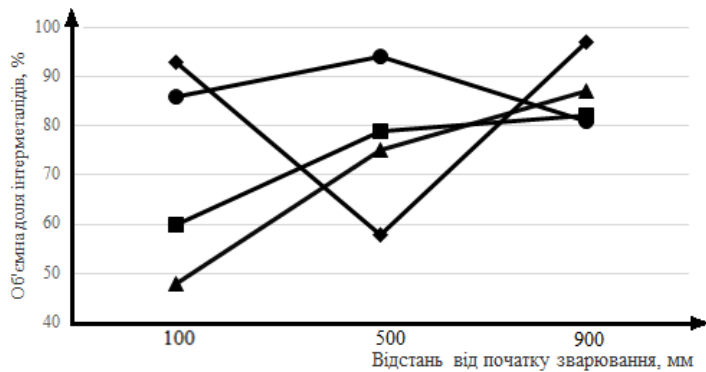


Рис. 2. Залежність об'ємної частки інтерметалідів у % від режиму і відстані від початку зварювання:

- –  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі;
- ▲ –  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі;
- ◆ –  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі;
- –  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі

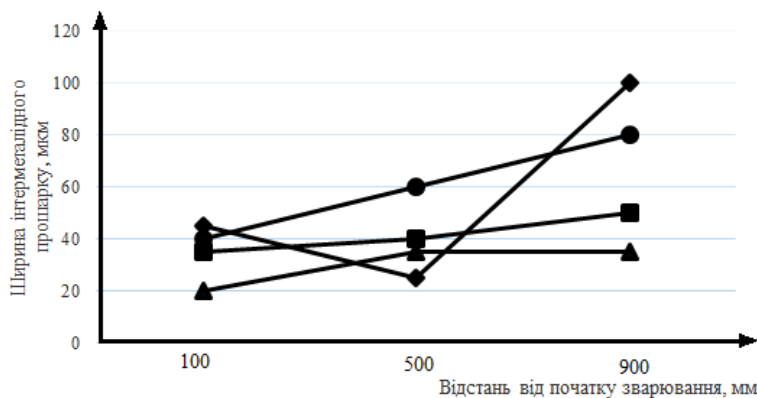
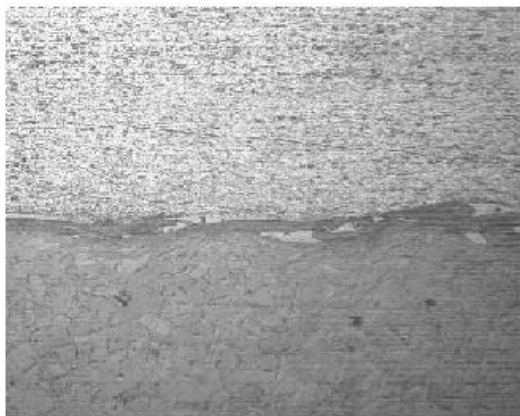
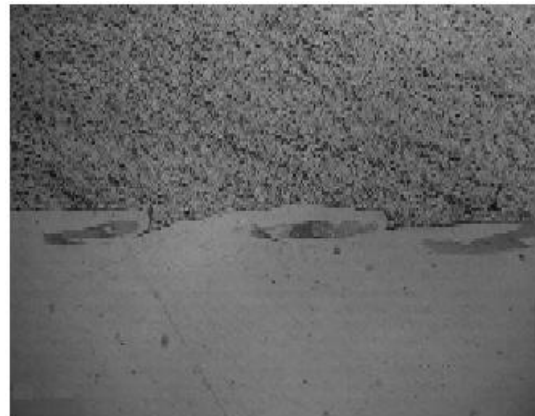


Рис. 3. Залежність ширини інтерметалідного прошарку (мкм) від режиму і відстані від початку зварювання:

- –  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі;
- ▲ –  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі;
- ◆ –  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі;
- –  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі



*а*



*б*

Рис. 4. Мікроструктура з'єднання міді з алюмінієм, отриманого при близьких параметрах режиму зварювання ( $\times 100$ , алюміній зверху): *а* – циліндрична схема; *б* – паралельна схема

За результатами дослідження закономірності пластичного деформування основного металу (алюмінію) встановлено, що ширина зони пластичної деформації Al на різних ділянках заготовок (початок, середина, кінець) при ЗВ у вакуумі в 1,4 – 1,6 рази перевищує величину пластичної деформації при зварюванні з повітрям у проміжку. Це є свідченням того, що повітря протидіє польоту міді. Тому швидкість зіткнення зварювальних поверхонь у вакуумі вища, ніж при наявності повітря у зазорі.

Дослідження мікротвердості зони зварного з'єднання коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок (рис. 5), отриманих ЗВ у вакуумі і без нього на різних режимах ( $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  і  $2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  відповідно) показало, що в зоні з'єднання спостерігається типовий для ЗВ характер



розподілу мікротвердості зі значеннями 946 МПа - 1100 МПа, що на 10%...15% перевищує значення 860 МПа – 940 МПа для біметалу мідь-алюміній, отриманого за плоскою схемою.

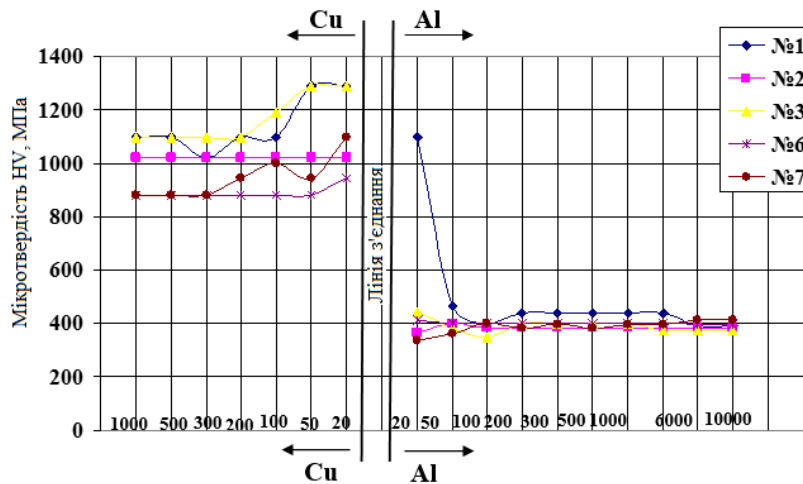


Рис. 5. Зміна мікротвердості у зварному з'єднанні залежно від режиму зварювання і наявності повітря у проміжку  
Зразки №1, №2, №3 - режим  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі, відповідно початок, середина, кінець; зразок №6 режим  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі, кінець заготовки; зразок №7 режим  $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у повітрі, кінець заготовки

Мікротвердість міді при зварюванні вибухом на режимі  $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  у вакуумі становить 1190 МПа, що на 150 МПа вище, ніж у приконтатних шарів при зварюванні на аналогічному режимі у повітрі (зразки №6 і №3 відповідно). Це свідчить про зміцнення приконтатних шарів. Ширина зона максимальної мікротвердості міді (946 МПа – 1100 МПа) досягає 0,05 мм – 0,15 мм. Це є підтвердженням того, що швидкість зіткнення при зварюванні у вакуумі перевищує швидкість зіткнення при зварюванні в повітрі.

При виробництві довгомірних біметалічних заготовок знижується якість з'єднання при віддаленні від точки ініціювання детонації. Це пов'язано з «канальним ефектом» при ЗВ, який можна визначити як виникнення в проміжку потоку кумулятивних викидів металу та ударно-стиснутого газу, фронт якого рухається з наддетонаційною швидкістю. Схему каналного ефекту при ЗВ зображено на рис. 6.

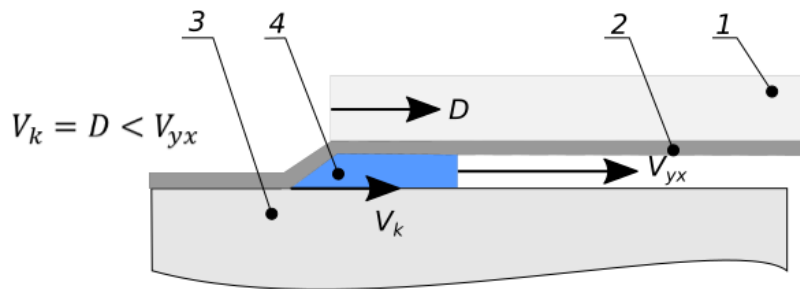
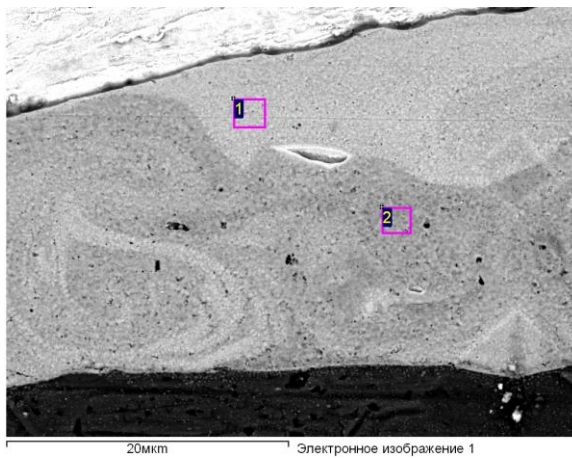


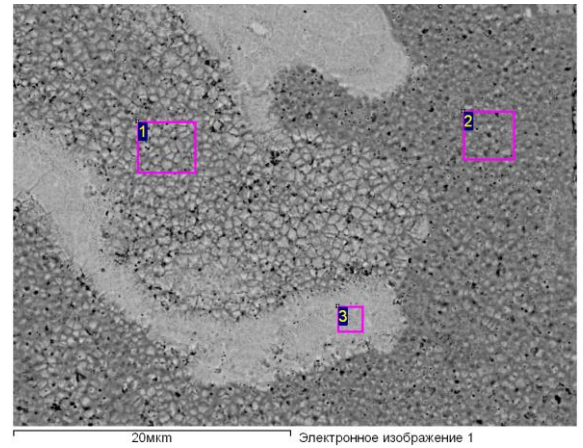
Рис. 6. Схематичне зображення каналного ефекту  
1 – Вибухова речовина;  
2 – Пластина, яка кидається;  
3 – Основна пластина;  
4 – Область ударно-стиснутого газу

Одночасний розгляд ударної хвилі в газі та потоку кумулятивних часток вдається дуже складно. У зв'язку з цим оцінювання «канального ефекту» здійснювали шляхом прямих експериментів. Експериментально встановлено, що товщина шару металу, винесеного в кумулятивний струмінь із кожної з поверхонь, що з'єднуються, в 4...7 разів вище теоретично розрахованого виносу. Таким чином, збільшення повної маси кумулятивного струменя призводить до значного зниження його швидкості, яка стає менше швидкості точки контакту і детонації. У результаті точка контакту обганяє сповільнений каналний потік і захоплює його у завихрення, в так звані «кишені».

Дослідження хімічного і фазового складу вмісту вихрових зон проводилося на зразках біметалу мідь-алюміній, отриманих ЗВ у вакуумі і в повітрі (рис. 7).



а)



б)

Рис. 7. Мікроструктура з'єднань, отриманих при наявності повітря у проміжку (а) і вакуумі (б)

Результати аналізу фазового складу показали наявність шару литих включень з інтерметалідів міді й алюмінію. При цьому під час зварювання без вакуумування утворюються тверді розчини міді в алюмінії на основі інтерметалідів типу  $Al_2Cu$  ( $\theta$ -фаза, ~ 28,2%-29% Al) та  $AlCu$  ( $\eta$ -фаза, ~ 46%-46,7% Al). При зварюванні у вакуумі утворюється  $Al_3Cu$  ( $\zeta$ -фаза, ~ 24,6%-25,3% Al). При вмісті міді в алюмінії ~ 67% утворюється легкоплавка евтектика  $Al-Al_2Cu$ . При зварюванні у вакуумі утворюються евтектики, які мають більшу електропровідність і кращі механічні властивості, ніж евтектики, утворені при зварюванні у повітрі.

Таким чином, виявлено, що склад литих включень залежить від атмосфери у зварювальному проміжку.

Після зварювання вибухом отримані біметалічні заготовки піддавали протягуванню з сумарним обтисненням 90%, у результаті чого відбувалось зміцнення металу (наклеп). Для зняття наклепу проводили термічну обробку. З метою вивчення впливу температури на збільшення інтерметалідного прошарку було досліджено мікроструктуру мідно-алюмінієвого з'єднання після термообробки (ТО) при різних температурах і залежно від часу витримки зразків, табл. 1.

Проведений аналіз мікроструктури зони з'єднання після протягування і термообробки за різних режимів показав, що при температурі 300°C і часу витримки 60 хв. на межі з'єднання утворюється суцільний інтерметалідний прошарок товщиною 1 мкм – 2 мкм, а при 350°C і 60 хв – досягає 4 мкм – 5 мкм. Наявність інтерметалідного прошарку негативно позначається на електропровідності й механічних властивостях біметалічної заготовки.

Таблиця 1

#### Режими термічної обробки після протягання

№ ТО	1	2	3	4	5
Температура, °C	180	250	300	300	350
Час, хв	30	60	45	60	60

При температурі 300°C і часу витримки 45 хв. на межі з'єднання суцільний інтерметалідний прошарок не утворюється і при витримці одну годину за температури 250°C і 180°C також.

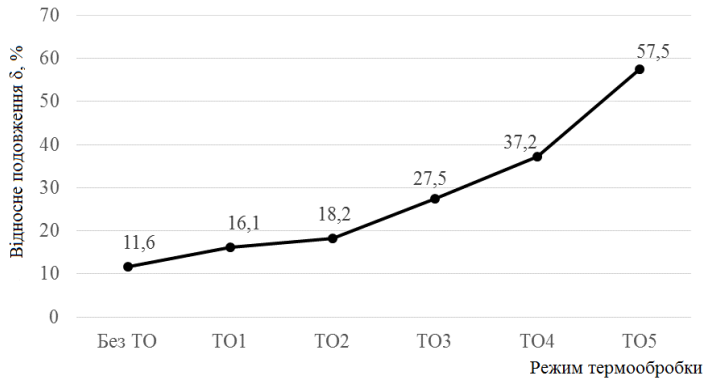


Рис. 8. Графік залежності відносного подовження  $\delta$ , % від режиму термообробки

межі з'єднання відбувається зростання інтерметалідного прошарку, що знижує його якість в цілому.

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню напружено-деформованого стану (НДС) обладнання (трубчатої вибухової камери) для зварювання вибухом експериментально та шляхом математичного моделювання. Методики розрахунку НДС для камери такої конструкції не існують.

Для дослідження НДС конструкції трубчатої вибухової камери (ТВК) шляхом моделювання визначали параметри повітряної ударної хвилі (УХ) і потоку продуктів детонації (ПД), що досягають усіх трубчастих елементів конструкції. На початку визначали розрахункову схему і метод моделювання.

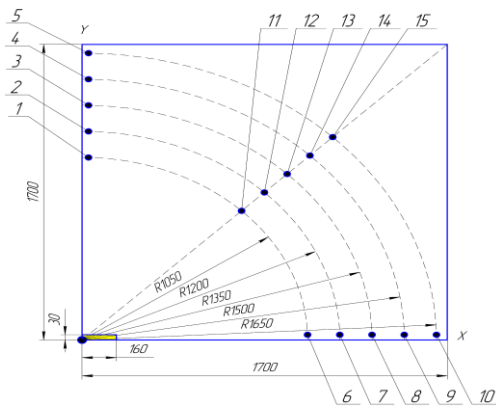


Рис. 9. Розрахункова схема задачі при вибуху плоского заряду вибухової речовини; 1 – 15 маркери, у яких розраховували тиск продуктів детонації.

Порівняльна картина моделювання процесу руху детонаційної хвилі по заряду ВР на скінченно-елементних сітках із різним розміром елемента представлена на рис. 10. Отримані дані підтверджують, що зменшення розміру скінченного елемента підвищує точність вирішення, але при тому зростає тривалість розрахунку одного варіанта задачі. Тому було розглянуто кілька варіантів з скінченно-елементною сіткою меншої роздільної здатності, а саме для її побудови були взяті скінченні елементи у формі куба зі стороною 2 мм, 3 мм, 4 мм, 5 мм, 6 мм і 10 мм. У результаті проведеного моделювання підриву вибухової речовини видно, що фронт УХ має форму перевернутого дзвону (рис. 11). Основний вплив вибуху зосереджено у вертикальному напрямку.

Після термічної обробки проводили дослідження механічних властивостей коаксіальних з'єднань шляхом випробування на розрив (рис. 8).

У результаті проведених досліджень встановлено, що після ТО на режимах №3 і №4 досягається пластичність, яка задана в технічних вимогах і при цьому не відбувається зростання інтерметалідного прошарку. При режимі ТО №5 пластичні властивості помітно покращуються, але при цьому на

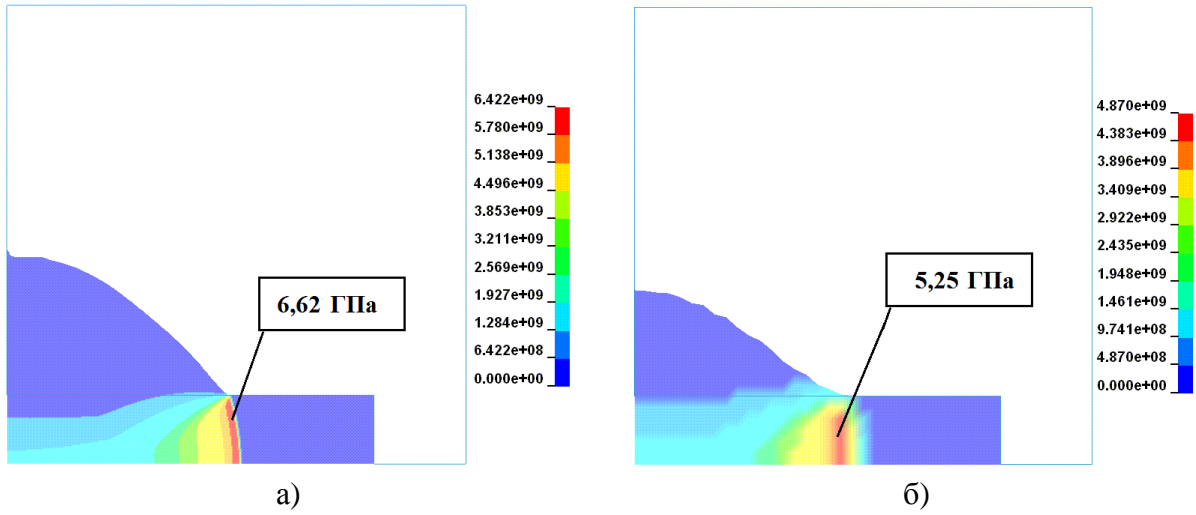


Рис. 10. Кадри комп'ютерного моделювання процесу руху детонаційної хвилі зарядом вибухової речовини при використанні скінченно-елементної сітки різної роздільної здатності: **а** – характерний розмір скінченного елемента 0,5 мм; **б** – характерний розмір скінченного елемента 5 мм

Тому до розрахункової моделі задачі визначення найбільш навантажених зон ТВК було включено три труби: вертикальна (№1) і дві із відхиленою від вертикалі віссю симетрії на кут 9° (№2) та відхиленою на кут 18° (№3).

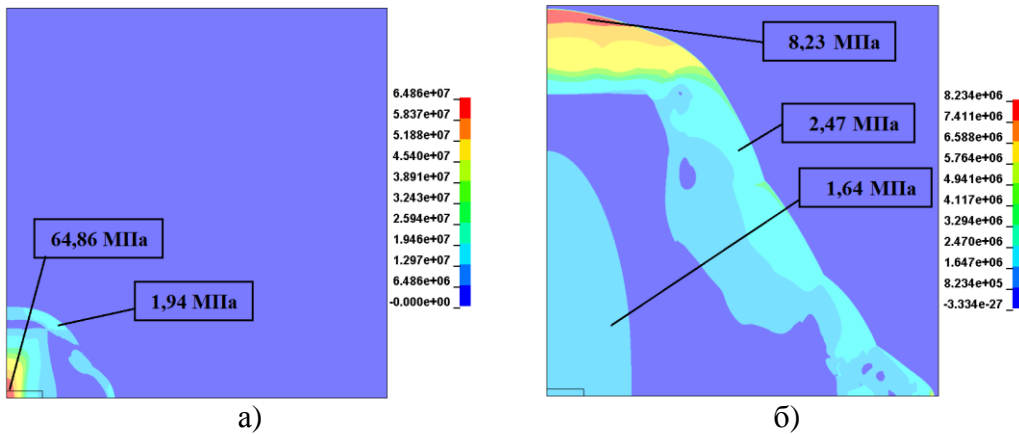


Рис. 11. Кадри двовірного комп'ютерного моделювання повітряної ударної хвилі від вибуху плоского заряду в повітрі: **а** – 100 мкс, **б** – 500 мкс

Кінетика розрахунку процесу формування повітряної УХ і потоку ПД, якими навантажуються силові елементи трубчастої ВК, представлено на рис. 12.

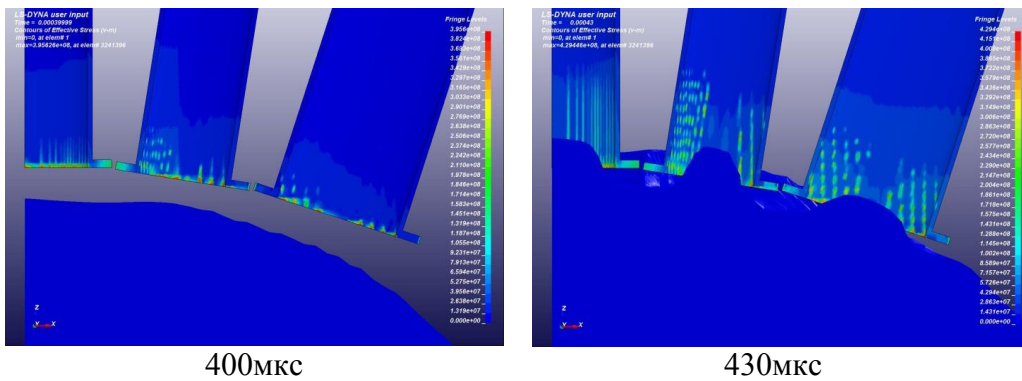


Рис. 12. Кінетика процесу взаємодії повітряної ударної хвилі з силовими елементами трубчастої вибухової камери

З (рис. 12) видно, що осередки напружень шикуються в лінійно-ланцюжок. Процес формування ліній напружень у трубах ВК закінчується до

800 мкс. Зберігається різна відстань між осередками напружень в різних трубах, і як наслідок, їх кількість відрізняється (рис. 13).

У результаті математичного моделювання встановлено, що найбільш навантаженими є верхні труби на відстані 40 мм від зовнішнього торця труби.

Експериментальне дослідження НДС вісесиметричної конструкції ТВК було проведено на трубах і зв'язках за методикою електротензометрування. Датчики були наклеєні таким чином, щоб реєструвати осьові й поздовжні деформації на відстані 40 мм від зовнішнього торця труби другого ряду і деформацію на стрижнях між другим и третім рядом труб (рис. 14).

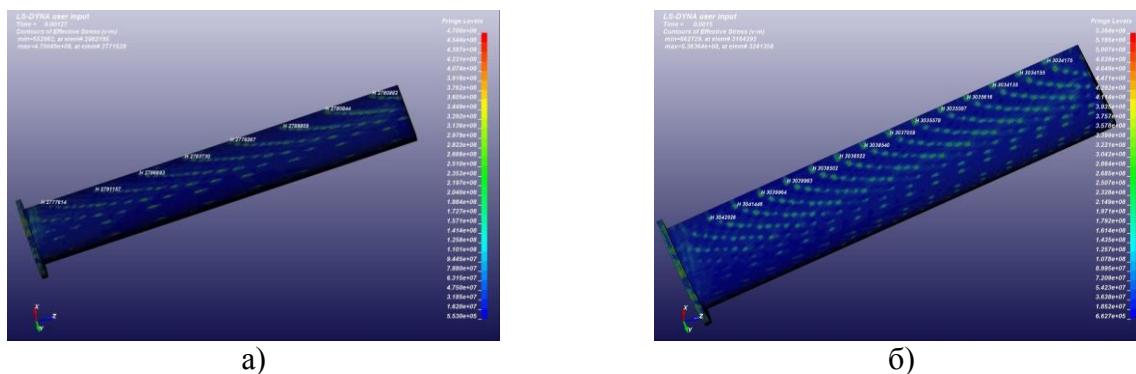


Рис.13. Лінії внутрішніх напружень у трубах вибухової камери ( $t=1500\text{мкс}$ ): а) – труба №2; б) – труба №3

Для реєстрації динамічних напружень було використано спеціальну методику, яка розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Експериментальне дослідження характеристик міцності ТВК проводили за схемою поетапного навантаження підривом серії зарядів з поступовим збільшенням їх маси. В якості ВР використовувався амоніт № 6ЖВ і його суміші з селітрою і піском.

Як свідчать результати обробки осцилограм, значний внесок у формування деформаційного процесу на різних ділянках труб належить деформації розтягування у поздовжньому і окружному напрямках. Стрижні при цьому зазнають деформацію розтягування. Так, поблизу заглушок труб 2-го ряду окружні напруження перевищують поздовжні у 1,5 рази. У міру віддалення від торця заглушок величини окружних напружень зменшуються і на відстані 220 мм стають майже у двічі менше, ніж поздовжні.

У широтному напрямку ця закономірність зберігається, але величини самих напружень зменшуються і в трубах 8-го ряду вони не перевищують 50% рівня напружень, що виникають в трубах 2-го ряду.

Результати експерименту (рис. 14) показали, що при підриві заряду 2,4 кг окружні напруження досягають величини статичної межі міцності. У зв'язку з цим було прийнято рішення про обмеження максимальної маси ВР при однократному підриві на рівні 2,4 кг.

Також слід зазначити, що поблизу зовнішнього торця труби окружні напруження перевищують осьові. Це пояснюється тим, що хвиля стисненого повітря, яка контактує із заглушкою, розширюється і створює тиск на стінки труби в радіальному напрямку.

Результати вимірювань напружень при навантаженні камери сумішевыми ВР показали, що під час вибуху заряду однієї і тієї ж маси амоніту №6 ЖВ і суміші цього ж амоніту з піском (відповідно 55/45), величина напружень у разі використання чистого амоніту збільшується практично в 1,5 рази. Під час вибуху зарядів однієї і тієї ж маси амоніту №6 ЖВ і суміші цього амоніту з селітрою (55/45), величини напружень практично рівні між собою.

Для порівняння отриманих даних експерименту в розрахунковій моделі задачі бралися відповідні скінченні елементи, розташовані на відстані 40 мм від зовнішнього торця в трубі №2.

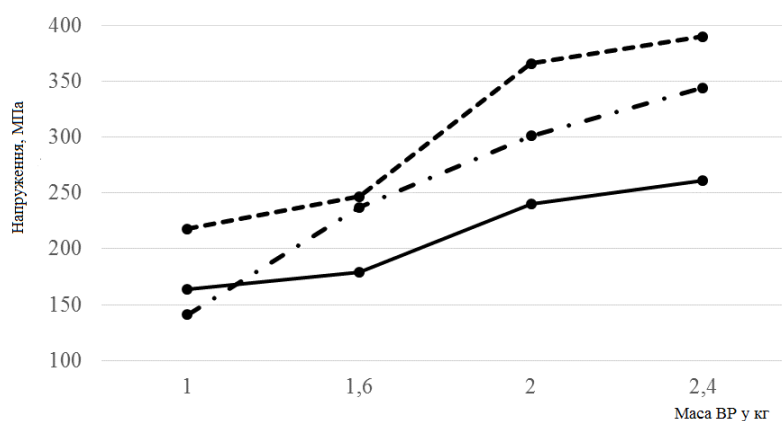


Рис. 14. Графік залежності напружень від маси вибухової речовини

— поздовжні напруження;  
 ..... окружні напруження;  
 - · - · - напруження у зв'язках

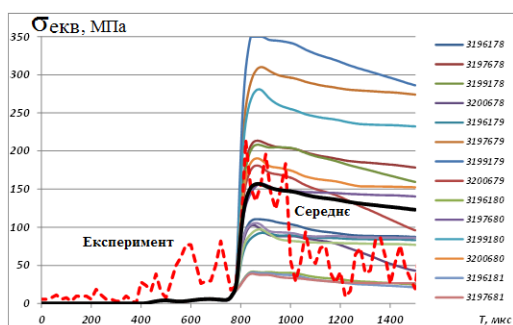


Рис. 15. Кінетика внутрішніх еквівалентних напружень в трубі №2 на відстані 40 мм від зовнішнього торця

використовувати для попередніх оцінок міцності конструкцій подібного класу.

У результаті проведених досліджень розроблена та виготовлена високопродуктивна трубчаста вибухова камера з автоматизованим завантаженням заготовок (Пат. України №100280).

**П'ятий розділ** присвячено розробці технології виготовлення коаксіальних мідно-алюмінієвих провідників для з'єднання елементів ланцюгів відповідального призначення, які працюють на струмах високої частоти і біметалічних гільз для з'єднання гнучких багатожильних кабелів.

**Розробка комплексної технології виготовлення коаксіальних струмопроводів з використанням зварювання вибухом та наступного протягування.**

На основі результатів досліджень розроблена комплексна технологія отримання біметалічного мідно-алюмінієвого стрижня з тонким шаром міді (300 мкм). Для вибору оптимального типорозміру вихідних заготовок алюмінієвого стрижня і мідної трубки розроблено розрахункову методику оцінки їх геометричних параметрів. Запропонована принципово нова форма алюмінієвої заготовки (рис. 16). Така форма має ряд переваг, порівняно з циліндричною, а саме:



Рис. 16. Вигляд заготовки спеціальної форми

об'єм для витікання і, як наслідок, знижується температура ударно стисненого газу і час його впливу на зварювані поверхні, в результаті чого поліпшується якість отриманого з'єднання.

1. На відстані 160 мм від початку процесу зварювання передбачено поступове зменшення діаметра заготовки до 10 мм. Таким чином, для повітря, що знаходиться у зазорі, з'являється додатковий

2. Хвостовик діаметром 10 мм вільно проходить через фільтр і служить для затискання в протяжному верстаті, що виключає трудомістку операцію обтиснення хвостовика на пресі.

3. Конусна форма верху заготовки сприяє рівномірності розподілу (поширенню) фронту детонації у кільцевому заряді.

4. Нижня і верхня проточка для центрування під конусом дозволяють виконувати точну установку стрижня в мідну трубу з необхідним проміжком.

5. Нижній конус забезпечує поступовий перехід від більшого діаметра до меншого, що запобігає відриванню хвостовика при вибуховому навантаженні.

Після виготовлення ЗВ біметалевих заготовок здійснювали їх протягання за спеціальним маршрутом. Після протягання контролювали товщину мідного шару.

Для контролю суцільності з'єднання готові вироби випробовували на згин (рис. 17).

За результатами випробувань встановлено, що відшарування міді від алюмінію не виникало, таким чином забезпечена висока якість з'єднання.

Електрофізичні та механічні випробування показали, що питомий електричний опір і пластичність отриманих струмопроводів відповідає заданому у Технічних умовах.



Рис. 17. Випробування на міцність зчеплення алюмінію і міді (а) та результат випробування (б)

**Розробка комплексної технології виготовлення біметалевих мідно-алюмінієвих гільз для з'єднання багатожильних кабелів з використанням зварювання вибухом та тертям.**

У межах міжнародного контракту з компанією (Eltech, Республіка Корея) розроблено

технологічний процес отримання біметалевих гільз за комбінованою технологією ЗВ і зварюванням тертям для з'єднання багатожильних кабелів.

Особливістю даної технології було те, що у якості елемента, який метається, використовували трубку з алюмінієвого сплаву АД1 товщиною стінки 6 мм, а в ролі основи – трубка з міді М1 з товщиною стінки лише 1,5 мм. Підібраний у результаті досліджень наповнювач для мідної трубки (стальний стрижень вставлений з зазором 1 мм і залитий сплавом Вуда) дозволив запобігти її деформації та отримати гладку внутрішню поверхню. Після проведення ЗВ проводили механічні випробування отриманого з'єднання на міцність зчеплення шарів, шляхом сплюснення кільця, яке вирізали з біметалічної трубки. В результаті проведених випробувань розшарування міді і алюмінію не відбувалось. З отриманих ЗВ біметалічних трубок вирізались заготовки, які за допомогою зварювання тертям з'єднували з трубками із алюмінієвого сплаву АД1. Після зварювання тертям видаляли ґрат та виконували механічну обробку для отримання біметалічної гільзи.

## ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що для отримання коаксіальних з'єднань з міді та алюмінію без дефектів плакувального шару довжиною більше 10 діаметрів заготовки необхідно здійснювати вакуумування зварювального проміжку.

2. Вперше введено термін «канального ефекту» для зварювання вибухом і експериментально вивчено механізм цього явища, що дозволило пояснити зниження якості зварного з'єднання із віддаленням від точки ініціювання детонації.

3. Встановлено, що при виборі режимів зварювання вибухом міді з алюмінієм за коаксіальною схемою, слід призначати параметри процесу, які б забезпечували мінімальний

енергетичний внесок у зону з'єднання, обмежуючи швидкість точки контакту граничною величиною  $2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

4. За результатами досліджень визначено режими ТО коаксіальних з'єднань міді та алюмінію після зварювання вибухом і протягання (сумарним обтиснення 90%), що забезпечують задані пластичні властивості коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок. Показано, що для запобігання утворенню інтерметалідного прошарку ТО необхідно виконувати при температурі  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  і часу витримки 45 хв.

5. Розроблено розрахункову модель процесу детонації плоского заряду ВР у трубчастій вибуховій камері, показано, що основна дія УХ зосереджена у вертикальному напрямку. На основі даної моделі визначені напруження в елементах трубчастої вибухової камери.

6. Створена і випробувана вдосконалена камера, яка є масштабною моделлю трубчастої вибухової камери, розрахованої на 200 кг ТНТ у еквіваленті і яка відрізняється від вихідної конструкції пристосованістю до умов масового виробництва (вдосконалено вхідний пристрій, є обладнання для автоматизованого завантаження / розвантаження). Трубчаста вибухова камера успішно пройшла випробування на вибух плоских зарядів вибухової речовини розрахункової маси (2,4 кг амоніту №6 ЖВ).

7. За розробленою імпортозамінною технологічною схемою зварювання вибухом + холодне протягування було виготовлено дослідно-промислово партію мідно-алюмінієвих струмопроводів діаметром 8 мм і 8,8 мм із товщиною мідного плакувального шару 300 мкм для систем управління авіатехніки на замовлення ДП «Антонов». Розроблено і вперше затверджено технічні умови «ТУ У 28.7-5416923-001 «Пруток алюмомідний електротехнічний, марки ПАМ». На замовлення компанії «Eltech» (Республіка Корея) розроблено технологію «зварювання вибухом + зварювання тертям» біметалевих перехідників діаметром 29 мм для з'єднання мідних і алюмінієвих багатожильних кабелів.

#### **Основні публікації за темою дисертації:**

1. Пашин М. О. Особливості формування структури коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при зварюванні вибухом з вакуумуванням зварювального проміжку / М. О. Пашин, **П. С. Шльонський**, А. Г. Брызгалін, О. С. Кушнар'ова, Н. Л. Тодорович // Автоматичне зварювання, 2021, №2. С. 3 – 9.

2. **Шлєнский П.С.** Особенности применения вакуума при сварке взрывом коаксиального медно-алюминиевого прутка / П. С. **Шлєнский**, Е. Д. Пекар'єв, А. Г. Брызгалін, С. Д. Венцев // Известия ВолгГТУ, серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений», 2017. – № 6. – С. 62-67.

3. Брызгалін А.Г. Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых прутков с помощью сварки взрывом и протяжки / А. Г. Брызгалін, Л. Д. Добрушин, **П. С. Шлєнский** и др. // Автоматическая сварка, 2015. – №3, 4. – С. 72-76.

4. Добрушин Л.Д., Фадеенко Ю.И., Илларионов С.Ю., **Шлєнский П.С.** Канальный эффект при сварке взрывом / Л. Д. Добрушин, Ю. И. Фадеенко, С. Ю. Илларионов, **П. С. Шлєнский** // Автоматическая сварка, 2009. – № 11. – С. 19-21.

5. **Шленский П. С.** Камеры для сварки металлов взрывом (Обзор) / **Шленский П. С.**, Л. Д. Добрушин, Ю. И. Фадеенко, С. Д. Венцев // Автоматическая сварка, 2011. – № 5. – С. 57 – 61.

6. **Шлєнский П.С.** Численное моделирование разлета продуктов детонации и распространения воздушных ударных волн при взрыве плоского заряда конечных размеров / **П. С Шлєнский**, Ю. М. Сидоренко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія. Машинобудування, 2011. – №62. – С. 223 – 232.

7. Сидоренко Ю.М. К оценке напряженно-деформированного состояния силовых элементов конструкции трубчатой взрывной камеры / Ю. М Сидоренко, **П. С. Шленский** // Проблемы прочности, 2013, – №2 – С. 121 – 134.



8. **Шльонський П.С.** Зварювання вибухом мідно-алюмінієвих труб за зворотною схемою / **П. С. Шльонський** // Автоматичне зварювання, 2020. – № 8. – С. 51–53.
9. Патент №100280 «Камера для обробки металів взривом» Патон Б. Е., Шимановский В. А., Добрушин Л. Д., Буштедт Ю. П., **Шлєнський П. С.** и др.
10. Dobrushin L.D. , Yu.I. Fadeenko, S.Yu. Illarionov, **P.S. Shlensky** Channel effect in parallel-scheme explosive welding of long-length parts / L. D Dobrushin, Yu.I. Fadeenko, S. Yu . Illarionov, **P. S. Shlensky** // Int. conf. «Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials». – Moscow, September 11-14, 2006. – P. 45.
11. Dobrushin L.D Deformation modes in tubular explosion chambers / L.D. Dobrushin, **P. S. Shlensky**, Yu. I. Fadeenko // Int. conf. «Explosive Production of New Materials». – Bechichi, Montenegro June 7–11, 2010. – P.20.
12. **Шленський П.С.** Динамика напружено-деформованого стану трубчастої вибувної камери / **П. С. Шленський**, Л. Д Добрушин, В. Г. Ярещенко, Н. Д. Чорномыз, М. П Попов // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Строительные конструкции спортивных и пространственных сооружений» Київ 06-10. 09. 2010. – С. 176 – 177.
13. Bryzgalin Problems of explosion welding of long-length coaxial Cu +Al rods with a thin cladding layer / A. G. Bryzgalin, **P. S. Shlonskii**, S. D.Ventsev, E. D. Pekar // Int. conf. «Explosive Production of New Materials». – Saint-Petersburg, Russia 14-18 May 2018. – P.38.
14. Dobrushin L. D. Combined explosive cladding/drawing technology for production of coaxial Cu-Al electric conductors for aerospace application / L. D Dobrushin, A. G. Bryzgalin, **P. S. Shlonskii**, I. G. Lavrenko, I. M. Romashko, H. D. Groeneveld // Int. conf. «Explosive Production of New Materials». – Strasbourg, France, May 2–5, 2012. – P.35.
15. Сидоренко Ю.М. Чисельне моделювання розльоту продуктів детонації і розповсюдження повітряних ударних хвиль при вибуху плоского заряду кінцевих розмірів / Ю. М Сидоренко, **П. С Шльонський** // Прогресивна техніка і технологія. XII міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. Київ – Севастополь, Україна, 20-24 червня, 2011. – С. 27.
16. Сидоренко Ю.М., **Шлєнський П.С.** Напружено-деформоване стану елементів трубчастої вибувної камери / Ю. М Сидоренко, **П. С. Шлєнський** // International Conference Shock waves in condensed matter, Kyiv, Ukraine, 16-21 September 2012. – С 413-417.

#### АНОТАЦІЯ

*Шльонський П.С.* Технологія зварювання вибухом мідно-алюмінієвих коаксіальних струмопроводів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 “Зварювання та споріднені процеси і технології». – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробці технологій отримання мідно-алюмінієвих коаксіальних струмопроводів із застосуванням зварювання вибухом і обладнання для їх реалізації. У роботі проведено аналіз способів отримання коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм.

Введено термін і експериментально вивчено явище «канального ефекту» при ЗВ. «Канальний ефект» – виникнення у проміжку потоку кумулятивних викидів металу та ударно-стисненого нагрітого газу, що заповнює проміжок.

Встановлено, що зростання об'ємної частки і товщини прошарку інтерметалідів в зоні з'єднання при ЗВ міді з алюмінієм за коаксіальною схемою при віддаленні від точки ініціювання, незалежно від середовища в зварювальному проміжку (повітря або вакуум), пояснюється «канальним ефектом» при зварюванні вибухом.

Показано, що на отримання коаксіальних з'єднань є обмеження за довжиною. Показано, що вакуумування зварювально проміжку має позитивний вплив на структуру з'єднання. Встановлено фактори, які впливають на утворення інтерметалідів у зоні з'єднання

міді з алюмінієм. Зокрема, одним із таких факторів є наявність ударно-стиснутого газу у зварювальному проміжку.

Досліджено хімічний склад завихрень на зразках біметалу мідь-алюміній та мікроструктуру і механічні властивості мідно-алюмінієвого біметалічного стрижня після протягування.

Розроблено розрахункову модель визначення НДС силових елементів ТВК під час вибуху в ній плоского заряду кінцевих розмірів. Розраховані величини напружень задовільно корелюють з експериментальними результатами. Експериментально досліджено НДС стан в елементах ТВК. Запропонований критерій критичних напружень в металі камери.

Результати проведених досліджень покладені в основу розробки технології виготовлення мідно-алюмінієвих струмопроводів з тонким (300 мкм) шаром міді для систем керування авіатехніки на замовлення ДП «Антонов». Розроблено технологію (ЗВ + зварювання тертям) отримання біметалевих гільз для з'єднання гнучких багатожильних проводів.

Розроблено та виготовлено ТВК з автоматизованим процесом завантаження заготовок для ЗВ, що забезпечує збільшену продуктивність процесу ЗВ.

**Ключові слова:** зварювання вибухом, ударно-стиснений газ, інтерметаліди, трубчаста вибухова камера, напружено-деформований стан.

### ABSTRACT

Shlonsky P.S. Explosive welding technology of copper-aluminum coaxial conductors – Qualifying scientific work with the rights of the manuscript.

The dissertation for a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.06 "Welding and related processes and technologies". - E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kiev, 2021.

The dissertation is devoted to the studying of the structure and mechanical properties of copper and aluminum coaxial joints obtained by explosion welding (EW) and the creation of equipment for this process.

The analyzes of the methods of coaxial joints obtaining was fulfilled. The advantages of EW over other methods of copper with aluminum joining were established. The relevance of equipment for EW creating is also shown.

The peculiarities of the copper and aluminum joint structure obtained by EW were considered. It was shown that the production of coaxial joints is limited by the length and range of materials to be applied. It was shown that vacuuming of the welding gap have a positive effect on the joint structure. Factors which influencing on the formation of intermetallics at the junction of copper with aluminum have been identified. In particular, one of such factors is the presence of impact-compressed gas in the welding gap. The lack in researching of the production of coaxial joints of copper with aluminum by explosion welding, as well as the complexity of the formation of such joints due to the intermetallics, determines the feasibility of fulfilling researchings in this direction.

The conditions of copper with aluminum coaxial joints obtaining by EW is investigated. EW was performed on the modes with the speed of the point of contact.

$V_k = 2000$  and  $2600$  m/s. Also in these modes performed welding with vacuuming of the welding gap. The volume fraction of intermetallics and the width of the intermetallic layer were measured on the boundary of joint.

As a result of the studing of the microstructure, it was found that at the speed of the point of contact  $V_k = 2000$  m/s the connection line has a profile close to wavy, with the presence of areas of molten metal at the base of the deformation humps. In addition, the plastic flow in the welded metals is homogeneous in the direction of the point of contact velocity vector. Intensification of welding modes due to the increasing of the contact point velocity to  $2600$  m / s leads to the formation of a wave profile of the connection with non-stable wave parameters and the formation of a continuous layer of intermetallics both in vacuum and without it. This creates a vortex near the bottom of the wave, inside which there are looseness, copper particles and other inclusions.

It is also found increasing of the volume fraction and thickness of the intermetallic layer in the zone of connection in the coaxial scheme depending of distance from the initiation point, regardless of the environment in the welding gap (air or vacuum), and it can be explained by "Channel effect" appeared during EW. "Channel effect" is a common influence of heated shock-compressed gas in the gap and the products of cumulating effect, which moves with superdetonation speed, on welding surfaces. It increases with distance from the beginning of the EW.

The width of the plastic deformation zone of the joint was investigated. It is established that the width of plastic deformation of aluminum at EW in vacuum is 1.4 - 1.6 times greater than the value of plastic deformation in the presence of air in the gap.

The study of microhardness in the joint zone showed that there is a typical for explosion welding nature of the distribution. It values of 946 - 1100 MPa in coaxial scheme are 10..15% higher than the value of 860 - 940 MPa for bimetal obtained in the parallel scheme.

The microstructure of the connection of copper and aluminum obtained by means of EW in flat and coaxial schemes is investigated. It has been established that welding on the same energy mode more intermetallics are formed in the coaxial joint, which is due to the absence of lateral leakage of shock-compressed gas.

The term was introduced and the phenomenon of "channel effect" in EW was experimentally studied. The mass transfer ratio of metal particles from the surfaces to be joined was evaluated during EW of the plates of steel 20. It was found that the thickness of the metal layer, which is ripped off to the surface of the plate was 30  $\mu\text{m}$ , which is 4.7 times higher than the estimating calculation. This increase in the mass of the cumulative jet leads to a decrease in its velocity and the capture of its content in a vortex.

The chemical composition of vortices on copper-aluminum bimetal samples was studied. It is established that  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ( $\theta$ -phase, ~ 28.2-29% Al) and  $\text{AlCu}$  ( $\eta$ -phase, ~ 46-46.7% Al) structures are formed during welding in air, and when welding in vacuum-type  $\text{Al}_3\text{Cu}$  ( $\zeta$ -phase, ~ 24.6-25.3% Al) and alloy eutectic Al-Al<sub>2</sub>Cu. Phases appeared in vacuum have more electrical conductivity.

The microstructure and mechanical properties of a copper-aluminum bimetallic rod with a degree of compression of 90% during drawing and subsequent exposure at different temperatures were studied. It was found that during exposure for a period of one hour at a temperature of 300 ° C a layer of intermetallics 1-2  $\mu\text{m}$  thick is formed, and during the same period at a temperature of 350 ° C a layer of intermetallics 4-5  $\mu\text{m}$  thick is formed. The relative elongation of tensile samples after cold drawing increases from 11.6% in the initial state to 57.5% after heat treatment.

A numerical method for determination of the stress-strain state of the tubular chamber power elements during an explosion of a flat explosive charge has been developed. The calculated values of stresses are satisfactorily correlated with the experimental results. Additionally the stress-strain state in the elements of the tubular explosive chamber was experimentally investigated and a criteria of the critical stress state in elements of the chamber was suggested.

A tubular explosive chamber with an automated process of billets loading into EW has been developed, it increases the productivity of the process.

The calculation method of optimal geometrical parameters choice for an aluminum bar and a copper tube was developed. A special form of aluminum billet is proposed, which has a number of practical advantages.

The results of the research are the basis for the development of the technology of copper-aluminum power lines manufacturing with a thin (300  $\mu\text{m}$ ) copper layer for control systems of aircraft company "Antonov". The influence of the filler matter inside inner tube during external cladding was experimentally investigated to preserve the shape of the workpiece.

A special design of the container for backfilling explosives was developed, which ensured uniformity of backfilling. A combined technology (EW + friction welding) for obtaining bimetallic sleeves for connecting flexible multi-core wires at the request of a South Korean company has been developed.

**Keywords:** explosive welding, shock-compressed gas, intermetallics, tubular explosive chamber, stress state.

