

# ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ КОАКСІАЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ МІДІ ТА АЛЮМІНІЮ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВИБУХОМ З ВАКУУМУВАННЯМ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРОМІЖКУ

М.О. Пашин, П.С. Шльонський, А.Г. Бризгалін, О.С. Кушнарєва, Н.Л. Тодорович

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Викладено результати дослідження утворення інтерметалідів при зварюванні вибухом коаксіальних з'єднань міді і алюмінію в залежності від довжини з'єднання і середовища в зварювальному проміжку (повітрі і вакуумі). Проведений металографічний аналіз границі коаксіального з'єднання в мідно-алюмінієвих стрижнях показав, що на різних ділянках біметалевих стрижнів при зварюванні в різних режимах і в повітрі, і при наявності вакууму в зазорі, утворюються інтерметалідні прошарки різної товщини. Зростання, яке спостерігалось в об'ємній частці і товщині прошарку інтерметалідів в зоні з'єднання, по мірі віддалення від точки ініціювання, незалежно від середовища в зварювальному проміжку (повітря або вакуум), має закономірний характер і пояснюється канальним ефектом при зварюванні вибухом. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 9.

*Ключові слова:* зварювання вибухом, канальний ефект, інтерметаліди, швидкість точки контакту

Як відомо, в авіабудівній галузі виробники прагнуть до зниження маси літальних апаратів, тому виготовлення струмопровідних елементів із суцільним зазором з міді, що має високу електропровідність, але, при цьому, і високу щільність, недоцільне. У струмопровідних елементах (рис. 1) проходить змінний струм високої частоти і, з урахуванням скін-ефекту, струм розподіляється нерівномірно у перетині – переважно в тонкому поверхневому шарі [1].

Довгомірність плакування труби можна охарактеризувати коефіцієнтом довгомірності у вигляді співвідношення її довжини  $L_{\text{тр}}$  до діаметру  $d_{\text{тр}}$ :

$$K_{\text{дл}} = L_{\text{тр}} \cdot d_{\text{тр}}^{-1}.$$

Серед причин, що викликають необхідність плакування довгомірних заготовок, можна виділити дві основні:

- отримання або відновлення стандартних виробів;
- підвищення продуктивності та економія дорогих матеріалів.

До теперішнього часу можливості технологій плакування вибухом труб і стрижнів обмежувалися короткомірними виробами ( $K_{\text{дл}} < 5 \dots 10$ ) [2] і номенклатурою матеріалів нанесених покриттів (нержавіюча сталь, титан) [3–6]. У цих робо-

тах показана необхідність подальшого розвитку і вдосконалення технологій, зокрема, для освоєння діапазону  $K_{\text{дл}} > 5 \dots 10$  і плакування електротехнічними матеріалами.

В роботі [7] представлена можливість отримання довгомірних коаксіальних з'єднань ( $K_{\text{дл}} \sim 30$ ), але при цьому вказується, що суцільність з'єднання, в середньому, становить 50 % від загальної площі контакту поверхонь, які зварюються, що, можливо, є цілком прийнятним для електропровідності і не задовольняє, коли виріб піддається механічній дії (вигин, розплющення та ін.).

Незважаючи на численні успіхи, досягнуті в галузі вивчення процесу зварювання вибухом міді і алюмінію, завдяки дослідженням українських і зарубіжних вчених Кудинова В.М., Добрушина Л.Д., Петушкова В.Г., Дерибаса А.А., Седих В.С., Лисака В.І., Трикова Ю.П., Кузьміна С.В., Первухина Л.Б., Crossland B., Vahrani та ін. більшість робіт присвячено проблемі отримання листового біметалу або тришарового композитного матеріалу, отриманого за батареїною схемою (одночасне плакування з двох сторін).

Великий вплив на процес утворення з'єднання при зварюванні вибухом коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм має ударно-стиснений газ, що



Рис. 1. Вигляд струмопровідного елемента літаючих апаратів

Пашин М.О – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Шльонський П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3566-1752>, Бризгалін А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-5886-3069>, Кушнарєва О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>, Тодорович Н.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-3872-5790>

© М.О. Пашин, П.С. Шльонський, А.Г. Бризгалін, О.С. Кушнарєва, Н.Л. Тодорович, 2021

заповнює зазор між поверхнями, що зварюються, і рухається зі швидкістю, що перевищує швидкість точки контакту [8]. Для поєднання (сполучення) мідь–алюміній атмосфера в зварювальному зазорі впливає на формування структури з'єднання через низьку температуру плавлення алюмінію і евтектики  $Al_2Cu+k$ , яка має температуру плавлення  $548\text{ }^\circ\text{C}$  [9]. Висока температура газу перед точкою контакту призводить до нагрівання поверхонь, що зварюються [10–12]. Збільшення розмірів вихрових зон (аж до розплавів і руйнування плакуючого шару) з віддаленням від початку процесу зварювання свідчить про підвищення кількості енергії, що поглинається металом в зоні утворення зварного з'єднання. Наведені вище результати досліджень дозволили сформулювати мету цієї роботи.

Метою даної роботи було дослідження впливу довжини та вакуумування зварювального зазору на структуру з'єднання міді з алюмінієм при зварюванні вибухом довгомірних циліндричних виробів.

**Матеріали і методики досліджень.** Для визначення максимальної довжини, на якій можливе отримання якісного зварного коаксіального з'єднання міді і алюмінію, а також впливу вакуумування, були проведені експерименти зі зварювання вибухом на режимах, зазначених у таблиці, з вакуумуванням і без вакуумування зварювального зазору.

В якості зварюваних матеріалів використовувалися трубка з міді марки М1 з зовнішнім діаметром 28 мм і товщиною стінки 1 мм і стрижня з алюмінію марки АД1 (рис. 2), ділянка, що зварювалася, проточувалася до діаметра 24 мм. Довжина заготовок, що зварювалися, становила 1000 мм. Зварювання вибухом проводилося на двох режи-

мах, при швидкостях зіткнення 320 та 390 м/с, швидкість точки контакту 2000 і 2600 м/с відповідно, з вакуумуванням зварювального зазору і без. Перед зварюванням мідні трубки травили в 10%-му розчині азотної кислоти для зняття окалини після відпалу, а алюмінієві стрижні зачищали наждачним папером з величиною зерна Р120. При вакуумуванні зварювального зазору величина вакууму складала 20 кПа. Для рівномірності засипки використовували контейнер, який складається з декількох частин (рис. 2, б).

Вирізання зразків для подальшого виготовлення з них шліфів проводилося механічним способом за допомогою кутової пилки, за схемою, що представлена на рис. 3. У всіх випадках вирізання проводилося з використанням охолоджувальної рідини для запобігання перегріву зони з'єднання.

У таблиці наведено опис місця вирізання зразка для вивчення мікроструктури і вказано режим, на якому здійснювалося зварювання вибухом.

Зразок мікрошліфа мідно-алюмінієвих з'єднань після зварювання вибухом показано на рис. 4. Для виявлення мікроструктури виконувалося травлення по міді. Травлення мікрошліфів виконували в суміші з 1 частини азотної кислоти (50 %) і 1 частини води (50 %).

Випробування на твердість проводили методом Віккерса. В поверхню матеріалу вдавлюється чотиригранна алмазна пірамідка з кутом при вершині  $\alpha = 136\text{ }^\circ$ .

Вимірювання мікротвердості здійснювали на мікротвердомірі ПМТ-3. Вимірювання проводили методом відновленого відбитка, який полягає в нанесенні на випробувану поверхню відбитка після прикладання до алмазного наконечника статич-



Рис. 2. Заготовки під зварювання вибухом (а), засипка ВВ в складений контейнер (б)

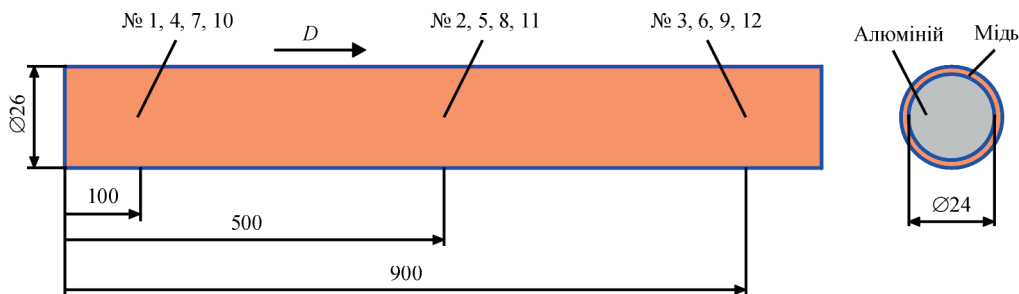


Рис. 3. Схема вирізання шліфів з біметалічного стрижня

Номера шліфів, вирізаних зі стрижнів, які зварені на різних режимах

Режим	$V_k = 2000$ , м/с	$V_k = 2600$ , м/с
Повітря	№ 1 – початок 70...100 мм	№ 7 – початок 70...100 мм
«-»	№ 2 – середина 450...500 мм	№ 8 – середина 450...500 мм
«-»	№ 3 – кінець 870...900 мм	№ 9 – кінець 870...900 мм
Вакуум	№ 4 – початок 70...100 мм	№ 10 – початок 70...100 мм
«-»	№ 5 – середина 470...500 мм	№ 11 – середина 470...500 мм
«-»	№ 6 – кінець 870...900	№ 12 – кінець 870...900 мм

ного навантаження 0,1Н для міді М1 і алюмінію АД1. Крок вимірювання встановлювали в межах від 0,05 до 0,2 мм в залежності від твердості матеріалу і відстані від границі з'єднання  $d$  (зі збільшенням  $d$  крок збільшувався). Налаштування при-

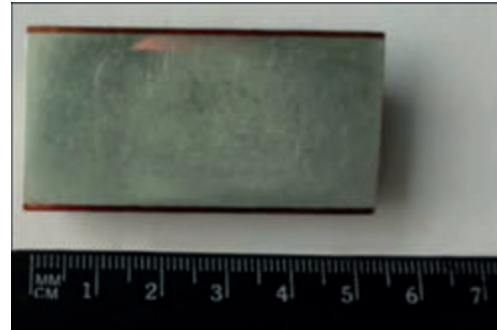


Рис. 4. Зразок мікрошліфа біметалічного стрижня для металографічних досліджень після зварювання вибухом

ладу ПМТ-3 на дотик зразка, що досліджувався, здійснювали при навантаженні  $P = 0,005$  Н.

**Результати експериментів та їх обговорення.** Отримані зразки піддавалися металографічним дослідженням, результати яких представлені на рис. 5. Були вивчені об'ємна частка інтерметалідів

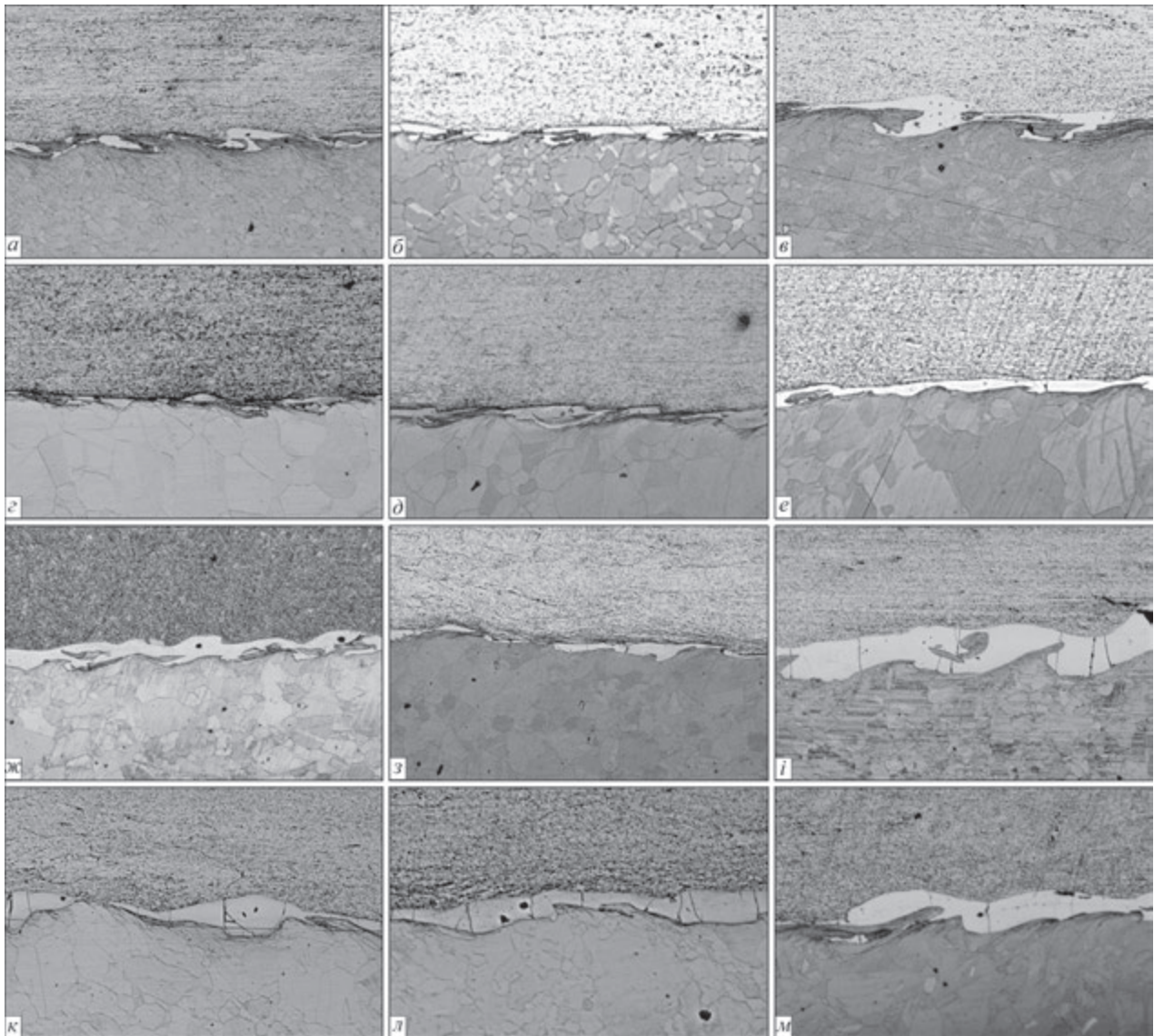


Рис. 5. Зміна мікроструктури зони з'єднання в залежності від відстані від початку зварювання і середовища в зварювальному зазорі при різних швидкостях точки контакту ( $\times 150$ , алюміній вгорі): а, б, в – початок, середина, кінець,  $V_k = 2000$  м/с в повітрі; г, д, е – початок, середина, кінець,  $V_k = 2000$  м/с у вакуумі; ж, з, і – початок, середина, кінець,  $V_k = 2600$  м/с в повітрі; к, л, м – початок, середина, кінець,  $V_k = 2600$  м/с у вакуумі

і ширина інтерметалідного шару, за результатами яких були побудовані графіки залежності вищевказаних параметрів від режиму зварювання вибухом і наявності або відсутності вакууму в зварювальному зазорі (рис. 6, 7).

На рис. 5, а, б, в представлені фото мікроструктури різних зон (початок, середина, кінець) біметалічного стрижня, отриманого при  $V_k = 2000$  м/с в повітрі, а на рис. 5, г, д, е вакуумі. Фото мікроструктури різних зон біметалічного стрижня (початок, середина, кінець), що отриманий в повітрі і вакуумі при  $V_k = 2600$  м/с, представлені на рис. 5 (ж, з, і) та рис. 5 (к, л, м) відповідно.

Проведений металографічний аналіз границі коаксіального з'єднання в мідно-алюмінієвих стрижнях показав, що на різних ділянках біметалевих стрижнів при зварюванні на різних режимах і в повітрі, і при наявності вакууму в зазорі, неможливо отримати з'єднання без утворення інтерметалідів.

При зварюванні вибухом міді з алюмінієм на швидкості точки контакту  $V_k = 2000$  м/с лінія з'єднання має конфігурацію, близьку до хвилеподібної, з наявністю ділянок оплавленого металу біля основи бугрів деформації. Інтенсифікація режимів зварювання (збільшення швидкості точки контакту до 2600 м/с) призводить до формування хвильової конфігурації з'єднання з нестабільними параметрами хвиль і утворення суцільного прошарку з інтерметалідів як у вакуумі, так і без нього.

При цьому утворюється завихрення на початку утворення хвилі, всередині якої спостерігають рихлості, частки міді та інші включення (див. рис. 5).

Зростання об'ємної частки, яке спостерігалось (рис. 6) і товщини прошарку (рис. 7) інтерметалідів в зоні з'єднання по мірі віддалення від точки ініціювання, незалежно від середовища в зварювальному зазорі (повітря або вакуум), носить закономірний характер і пояснюється каналним ефектом при зварюванні вибухом [13].

При зварюванні в повітрі на режимі  $V_k = 2000$  м/с на початку зразка об'ємна частка ін-

терметалідів дорівнює 60 %, при зварюванні у вакуумі, у тому ж режимі – вона дорівнює 48 % (рис. 6), що в 1,25 рази менше. При цьому співвідношення об'ємної частки інтерметалідів в повітрі до цієї ж частки в вакуумі на початку зразка при зварюванні на режимі  $V_k = 2600$  м/с становить 1,08. Це свідчить про те, що при збільшенні швидкості точки контакту перехід кінетичної енергії в теплову переважно відбувається за рахунок пластичної деформації металу навколошовної зони, і в меншій мірі за рахунок каналного ефекту, який слабо виражений на малій відстані від початку ініціювання процесу зварювання вибухом.

В середині і наприкінці зразка співвідношення об'ємної частки інтерметалідів в повітрі до цієї ж частки у вакуумі при зварюванні на режимі  $V_k = 2000$  м/с становить 1,05 і 1,03 відповідно, тобто вони практично вирівнюються. Це свідчить про те, що на відстані більше десяти діаметрів заготовки в зварювальному зазорі при зварюванні з вакуумуванням накопичується повітряна «пробка» з ударно-стисненого повітря і частинок матеріалів, що зварюються, яка розігріває зварювані поверхні.

Як видно з рис. 6 співвідношення об'ємної частки інтерметалідів в повітрі до цієї ж частки у вакуумі в середині зразка при зварюванні на режимі  $V_k = 2600$  м/с, дорівнює 0,61. Таким чином об'ємна частка інтерметалідів, отриманих при зварюванні у вакуумі, більше в 1,5 рази, ніж при зварюванні в повітрі. Це пояснюється тим, що при зварюванні у цьому режимі на відстані 250 мм від початку процесу відбувається розрив плакованого шару (рис. 8), результатом якого є витікання розігрітого ударно-стисненого повітря. При цьому на заготовці, яка отримана з вакуумуванням зварюваного зазору, початок дефектів у вигляді розриву плакованого шару спостерігається на відстані близько 500 мм від ближчого до точки ініціювання краю заготовки.

Подібним чином виглядає і залежність ширини інтерметалідного прошарку від режиму і відстані від початку зварювання (рис. 7). Можна бачити, що на початковій ділянці зразка ширина интерме-

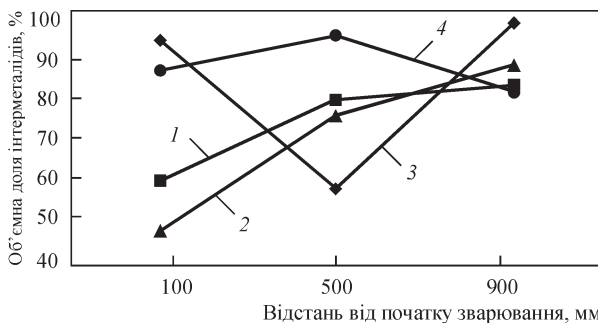


Рис. 6. Залежність об'ємної частки інтерметалідів від режиму й відстані від початку зварювання: 1 -  $V_k = 2000$  м/с - у повітрі; 2 -  $V_k = 2000$  м/с - у вакуумі; 3 -  $V_k = 2600$  м/с - у повітрі; 4 -  $V_k = 2600$  м/с - у вакуумі

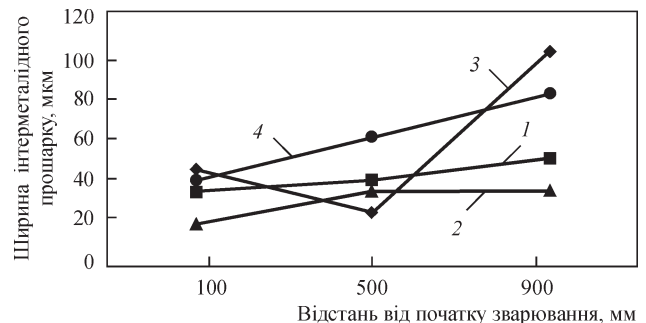


Рис. 7. Залежність ширини інтерметалідного прошарку від режиму і відстані від початку зварювання: 1 -  $V_k = 2000$  м/с - у повітрі; 2 -  $V_k = 2000$  м/с - у вакуумі; 3 -  $V_k = 2600$  м/с - у повітрі; 4 -  $V_k = 2600$  м/с - у вакуумі



Рис. 8. Коаксіальна заготовка після зварювання вибухом. Загальний вигляд, зверху – з вакуумом, знизу – без вакууму, напрямки детонації зліва направо. Вигляд А – розрив плакованого шару, зверху – з вакуумом, знизу – без вакууму

талідного прошарку при зварюванні в повітрі на режимі  $V_k = 2000$  м/с становить 35 мкм, що істотно більше (в 1,75 рази), ніж при зварюванні у вакуумі 20 мкм. При цьому ширина інтерметалідного прошарку при зварюванні в повітрі на режимі  $V_k = 2600$  м/с становить 45 мкм, що можна порівняти зі зварюванням у вакуумі – 40 мкм. Це свідчить про те, що на початковому етапі зварювання основним механізмом переходу механічної енергії в теплову є пластична деформація металу навколошовної зони.

На середній ділянці заготовки при зварюванні на режимі  $V_k = 2000$  м/с ширина інтерметалідного прошарку збільшується щодо початкової ділянки при зварюванні як у вакуумі, так і в повітрі. При цьому знижується співвідношення ширини інтерметалідного прошарку, отриманого в повітрі, до ширини, отриманого в вакуумі, до 1,14 рази. В кінці заготовки при зварюванні в повітрі на режимі  $V_k = 2000$  м/с спостерігається зростання ширини інтерметалідного прошарку в 1,25 рази в порівнянні з середньою ділянкою, а при зварюванні у вакуумі зростання ширини не спостерігається.

Таким чином, вакуумування зварювального зазору при зварюванні вибухом довгомірних коаксіальних з'єднань дозволяє знижувати ширину і об'ємну частину інтерметалідного прошарку, але не виключає утворення інтерметалідів.

Менша кількість інтерметалідів при зварюванні у вакуумі свідчить про те, що основний енергетичний внесок в створення інтерметалідів дає каналний ефект, який особливо виявляється при зварюванні вибухом коаксіальних з'єднань.

Дослідження мікротвердості зони зварного з'єднання коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок (рис. 9), які отримані при зварюванні вибухом у вакуумі і без нього на різних режимах ( $V_k = 2000$

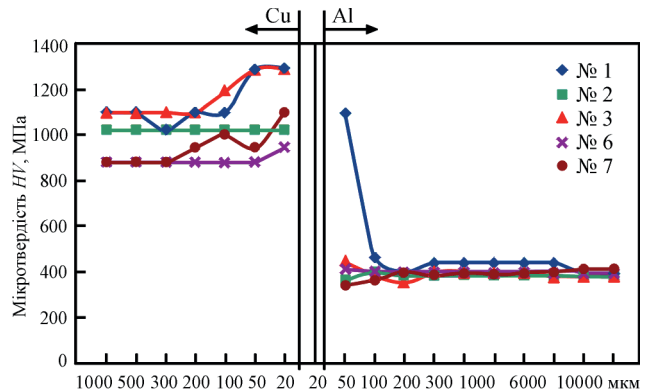


Рис. 9. Зміна мікротвердості в зварному з'єднанні в залежності від режиму зварювання і наявності повітря в зазорі (номери зразків відповідають рис. 2)

та  $V_k = 2600$  м/с) показали, що в зоні з'єднання спостерігається типовий для зварювання вибухом характер розподілу мікротвердості зі значеннями 946...1100 МПа, що на 10..15 % перевищує значення 860...940 МПа для плоского біметалу мідь–алюміній [14].

Спостерігається зміцнення приконттактних шарів, мікротвердість міді при зварюванні вибухом на режимі  $V_k = 2000$  м·с<sup>-1</sup> у вакуумі становить 1190 МПа, що вище, ніж мікротвердість приконттактних шарів при зварюванні у такому ж режимі у повітрі на 150 МПа (зразки №6 і №3 відповідно). Зона максимальної мікротвердості міді (946...1100 МПа) досягає 0,05...0,15 мм. Це також є підтвердженням того, що швидкість зіткнення при зварюванні у вакуумі перевищує швидкість зіткнення при зварюванні в повітрі.

Мікротвердість алюмінію в приконттактній зоні знаходиться в діапазоні 336...413 МПа, що на 5...12 % нижче, ніж максимальна мікротвердість алюмінію (400...460 МПа) для біметалу мідь–алюміній, отриманого за плоскою схемою

[14], при цьому в приконтактній зоні на глибині 0,02...0,05 мм мікротвердість має нижче значення, ніж на більшій глибині. Ймовірно, це пов'язано з тим, що при зварюванні вибухом за коаксіальною схемою відбувається більш інтенсивний нагрів поверхневого шару в порівнянні з паралельною схемою і тонкий шар алюмінію, що має низьку температуру плавлення, частково відпалюється і стає м'якшим.

### Висновки

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

2. На підставі металографічних досліджень встановлено, що вакуумування зварювального зазору дозволяє знизити ширину інтерметалідного прошарку майже в 1,4 в середньому по довжині на режимі  $V_k = 2000$  м/с і в 1,2 рази на режимі  $V_k = 2600$  м/с, і знизити об'ємну частку інтерметалідів в 1,1 рази і в 1,15 рази при зварюванні на вказаних вище режимах відповідно. Це пояснюється тим, що основний енергетичний внесок в створення інтерметалідів дає каналний ефект.

3. Встановлено, що створення вакууму (~ 20 кПа) в зазорі при зварюванні вибухом міді з алюмінієм, які зібрані коаксіально, знижує кількість інтерметалідів, які виникають після зварювання на 20 %.

### Список літератури

1. Брызгалін А. Г., Добрушин Л. Д., Шлєнський П. С. и др. (2015) Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых прутков с помощью сварки взрывом и протяжки. *Автоматическая сварка*, **3-4**, 72–76.
2. Мелихов В.П. (1979) *О длине устойчивости сварки взрывом эксцентрично расположенных цилиндров. Сварка и резка взрывом*. Кудинов В.М. (ред.). Киев, Изд-во ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 25–28.
3. Цемахович Б.Д. (1987) Перспективы сварки взрывом в атомном машиностроении. *VII Всесоюз. совещ. по сварке и резке взрывом, г. Киев, 29–30 сент. 1987 г.: Сб. тез. докл.* Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 60–66.
4. Ковалевский В.Н., Алексеев Ю.Г., Сагарда Е.В. (1985) *Плакирование толстостенных труб энергией взрыва. Применение энергии взрыва в сварочной технике*. Кудинов В.М. (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 103–108.
5. Ковалевский В.Н., Алексеев Ю.Г., Сенченко Г.М. и др. (2001) *К вопросу о теории процесса сварки труб взрывом. Сварка и родственные технологии*. Минск, Республ. межвед. сб., сс. 37–39.
6. Атрощенко Э.С., Розен А.Е., Лось И.С. и др. (2000) *Расчет параметров сварки взрывом при метании цилиндрической оболочки. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр.* Лысак В.И. (ред.). Волгоград, ВолгГТУ, сс. 24–30.
7. Малахов А.Ю. (2019) *Плакирование взрывом длинномерных цилиндрических изделий функциональными покрытиями*. Авт. реф. дис. ... канд. техн. наук. Черноголовка.

8. Дерибас А.А., Захаренко И.Д. (1974) О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин. *Физ. горения и взрыва*, **10**, **3**, 409–423.
9. Хансин М., Андерго К. (1962) *Структуры двойных сплавов*. Новикова И.И., Рольберг И.Л. (ред.). Пер. с англ. Москва, Металлургия, Т. 1.
10. Ишуткин С.Н., Кирко В.И., Симонов В.А. (1980) Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин. *Физика горения и взрыва*, **6**, 69–73.
11. Бердыченко А.А., Злобин Б.С., Первухин Л.Б., Штерцер А.А. (2003) О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом. *Там же*, **2**, 128–136.
12. Первухин Л.Б., Первухина О.Л., Денисов И.В. и др. (2016) К вопросу о предельных размерах листов, получаемых сваркой взрывом. *Известия ВолгГТУ*, **10**, 76–86.
13. Добрушин Л.Д., Фадеев Ю.И., Илларионов С.Ю., Шлєнський П.С. (2009) Канальный эффект при сварке взрывом. *Автоматическая сварка*, **11**, 19–21.
14. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгун В. (2004) *Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов*. Москва, Metallurgizdat.

### References

1. Bryzgalin, A.G., Dobrushin, L.D., Shlensky, P.S. et al. (2015) Manufacture of coaxial copper-aluminium rods using explosion welding and drawing. *The Paton Welding J.*, **3/4**, 69-73.
2. Melikhov, V.P. (1979) About length of explosion welding stability of eccentrically located cylinders. In: *Explosion welding and cutting*. Ed. by V.M. Kudinov. Kiev, PWI, 25–28 [in Russian].
3. Tsemakhovich, B.D. (1987) Prospects of explosion welding in nuclear machine-building. In: *Proc. of 7<sup>th</sup> All-Union Meeting on Explosion Welding and Cutting (Kiev, 29-30 September, 1987)*, Kiev, PWI, 60-66 [in Russian].
4. Kovalevsky, V.N., Alekseev, Yu.G., Sagarda, E.V. (1985) *Cladding of thick-wall pipes by explosion energy. In: Application of explosion energy in welding engineering*. Ed. by V.M. Kudinov. Kiev, PWI, 103-108 [in Russian].
5. Kovalevsky, V.N., Alekseev, Yu.G., Senchenko, G.M. et al. (2001) *To the problem of theory of explosion welding of pipes. In: Welding and related technologies*. Minsk, Pepubl. Interdept. Transact., 37-39 [in Russian].
6. Atroshchenko, E.S., Rozen, A.E., Los, I.S. et al. (2000) *Calculation of explosion welding parameters in throwing a cylindrical shell. In: Explosion welding and properties of welded joints: Interuniv. Transact.* Ed. by V.I. Lysak, Volgograd, VolgGTU, 24-30 [in Russian].
7. Malakhov, A.Yu. (2019) *Explosion cladding of long-length cylindrical products by functional coatings*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Chernogolovka [in Russian].
8. Deribas, A.A., Zakharenko, I.D. (1974) On surface effects in oblique collisions of metallic plates. *Fiz. Goreniya i Vzryva*, **10**(3), 409–423 [in Russian].
9. Khansin, M., Andergo, K. (1962) *Structures of binary alloys*. Ed. by I.I. Novikova, I.L. Rolberg. Vol. 1. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
10. Ishutkin, S.N., Kirko, V.I., Simonov, V.A. (1980) Study of thermal action of shock-compressed gas on surface of colliding plates. *Fiz. Goreniya i Vzryva*, **6**, 69–73 [in Russian].
11. Berdychenko, A.A., Zlobin, B.S., Pervukhin, L.B., Shtertser, A.A. (2003) On possible inflammation of particles ejected into the gap in explosion welding of titanium. *Ibid.*, **2**, 128–136 [in Russian].
12. Pervukhin, L.B., Pervukhina, O.L., Denisov, I.V. et al. (2016) To problem about limit of size of sheets produced by explosion welding. *Izvestiya VolgGTU*, **10**, 76-86 [in Russian].
13. Dobrushin, L.D., Fadeenko, Yu.I., Illarionov, S.Yu., Shlensky, P.S. (2009) *Channel effect in explosion welding*, **11**, 16-17 [in Russian].
14. Trykov, Yu.P., Gurevich, L.M., Shmogun, V. (2004) *Layered composites based on aluminium and its alloys*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].

## FEATURES OF FORMATION OF STRUCTURE OF COAXIAL JOINTS OF COPPER AND ALUMINIUM IN EXPLOSION WELDING WITH VACUUMING OF WELDING GAP

M.O. Pashchin, P.S. Shlonsky, A.G. Bryzgalin, O.S. Kushnaryova, N.L. Todorovych

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

The results of the study of intermetallics formation in explosion welding of coaxial joints of copper and aluminium depending on the length of the joint and the environment in the welding gap (air and vacuum) are presented. The metallographic analysis of the boundary of the coaxial joint in copper-aluminium rods showed that at different areas of bimetallic rods in welding under different conditions both in air as well as in the presence of vacuum in the gap, intermetallic layers of different thickness are formed. The growth, observed in the volume fraction and thickness of the intermetallic layer in the joint area, as it moves away from the initiation point, regardless of the environment in the welding gap (air or vacuum), is natural and is explained by the channel effect in explosion welding. 14 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

*Key words: explosion welding, channel effect, intermetallics, contact point speed*

Надійшла до редакції 22.01.2021

### Нові книги

Макаренко В.Д., Білик С.І., Джон Ньюхук, Чеботар І.М., Коваленко М.А., Винников Ю.Л., Харченко М.О., Максимов С.Ю., Кусков Ю.М., Макаренко Ю.В. **Сталеві резервуари. Основи корозійно-механічної стійкості.** Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020 – 523 с.



Приведені відомості про основні причини, чинники і умови корозійно-механічних ушкоджень і руйнувань сталевих вертикальних резервуарів та обґрунтовані основні аспекти водневої деградації резервуарних сталей тривалого терміну експлуатації при змінних навантаженнях і дії хімічно-агресивних середовищ. Розглянуті особливості експлуатації резервуарів для тривалого зберігання нафти і нафтопродуктів. Систематизовані і узагальнені результати досліджень впливу умов, факторів і технологічних особливостей робочих середовищ на корозійно-механічну тріщиностійкість резервуарних сталей, які тривалий час експлуатуються в агресивних зонах нафтових родовищ. Запропонована науково-системна технологічна методологія подовження експлуатаційного ресурсу резервуарних конструкцій, яка дозволяє суттєво збільшити безаварійний і безвідмовний термін їх експлуатації. В роботі вперше застосований нейромережевий метод аналізу і прогнозування залишкового ресурсу сталевих резервуарів.

Монографія призначена для спеціалістів нафтогазової промисловості, може бути корисною для аспірантів і студентів машинобудівельних напрямів та нафтогазових спеціальностей ВНЗ.

Макаренко В.Д., Максимов С.Ю., Винников Ю.Л. **Морські бурові платформи. Т.1.** Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020 – 420 с.



Приведені відомості про основні причини, чинники і умови корозійно-механічних ушкоджень і руйнувань сталевих трубних конструкцій морських бурових платформ та обґрунтовані основні аспекти локальної мікробіологічної корозії та водневої деградації конструктивних сталей морських платформ тривалого терміну експлуатації при змінних навантаженнях і дії хімічно-агресивних середовищ, в тому числі морської води. Систематизовані і узагальнені результати досліджень впливу умов, факторів і технологічних особливостей робочих середовищ на корозійно-механічну тріщиностійкість сталей конструктивних елементів морських бурових платформ, які тривалий час експлуатуються в агресивних зонах нафтових родовищ морських шельфів. Запропонована науково-системна технологічна методологія подовження експлуатаційного ресурсу морських сталевих конструкцій, яка дозволяє суттєво збільшити безаварійний і безвідмовний термін їх експлуатації. В роботі вперше застосований нейромережевий метод аналізу

і прогнозування залишкового ресурсу сталевих конструкцій морських бурових платформ. Монографія призначена для спеціалістів нафтогазової промисловості, може бути корисною для аспірантів і студентів машинобудівельних напрямів та нафтогазових спеціальностей ВНЗ.

Макаренко А.Д., Чигарьов В.В., Максимов С.Ю. **Морські бурові платформи. Т.2.** Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020 – 424 с.



Приведені відомості про основні причини, чинники і умови корозійно-механічних ушкоджень і руйнувань сталевих трубних конструкцій морських бурових платформ та обґрунтовані основні технологічні операції підводної частини будівництва та ремонту джекетів — трубчастих сталевих конструкцій опор основ і фундаментів морських бурових платформ. Систематизовані і узагальнені результати досліджень впливу умов, факторів і технологічних особливостей робочих середовищ на корозійно-механічну тріщиностійкість сталей конструктивних елементів морських бурових платформ, які тривалий час експлуатуються в агресивних зонах нафтових родовищ морських шельфів. Запропонована науково-системна технологічна модель подовження експлуатаційного ресурсу морських сталевих конструкцій, яка дозволяє суттєво збільшити безаварійний і безвідмовний термін їх експлуатації. Монографія призначена для спеціалістів

нафтогазової промисловості, може бути корисною для аспірантів і студентів машинобудівельних напрямів та нафтогазових спеціальностей ВНЗ.