

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

**НОВОМЛИНЕЦЬ ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**



УДК 621.791.4:539.378.3

**НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОТРИМАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ  
НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ ЗВАРЮВАННЯМ ТИСКОМ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Краматорськ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Чернігівському національному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Чернігів.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Фальченко Юрій В'ячеславович**,  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, завідувач відділу фізико-  
металургійних процесів зварювання легких  
металів та сплавів

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Биковський Олег Григорович**,  
Запорізький національний технічний  
університет, професор кафедри обладнання  
та технології зварювального виробництва

доктор технічних наук, професор  
**Гулаков Сергій Володимирович**,  
Приазовський державний технічний  
університет, професор кафедри деталей  
машин та підйомно-транспортних пристроїв

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Філатов Олександр Валентинович**,  
Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова  
НАН України, завідувач відділу фізики  
атомних транспортних процесів

Захист відбудеться 30 березня 2018 р. о 09<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 2, ауд. 2313.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 1 або web-адресою: <http://www.dgma.donetsk.ua/zahistiu-radi-d12.105.02.html>.

Автореферат розісланий 28 лютого 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.02,  
кандидат технічних наук, доцент



С.Л. Міранцов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток сучасної науки і техніки потребує застосування нових конструкційних матеріалів, що володіють високими механічними та спеціальними властивостями, а також використання виробів складної конфігурації з однорідних та різнорідних матеріалів (метали, неметалеві матеріали, інтерметаліди, наноматеріали та інші). При цьому, в більшості випадків, отримання якісних виробів з таких матеріалів зварюванням плавленням неможливе внаслідок зміни їх властивостей. Крім цього, багато з таких матеріалів, а також виробів, при отриманні нероз'ємних з'єднань, окрім обмеження температури потребують ще й обмеження макро- та мікродеформацій. Ця проблема особливо актуальна при виготовленні сучасних деталей машин, конструкцій, виробів з фольги, а також виробів з матеріалів, що мають дуже низьку деформаційну здатність.

Найбільш перспективними для отримання прецизійних з'єднань таких матеріалів є способи зварювання тиском коли з'єднання утворюються в результаті пластичної деформації основних матеріалів. Широко розповсюдженими способами зварювання тиском є дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) та електроконтактне зварювання (ЕКЗ). На сьогодні відсутні дані щодо визначення кількісних характеристик прецизійності зварних з'єднань, отриманих способами зварювання тиском, але більшість дослідників говорячи про прецизійні з'єднання оцінюють при цьому деформацію основних матеріалів на рівні не більше 1-2 % вихідного розміру деталей. Тому основною проблемою, на вирішення якої направлено виконання роботи, є активація поверхонь, що зварюються, для утворення якісних нероз'ємних з'єднань при мінімально можливому рівні деформації основних матеріалів.

Відомо, що основними механізмами активації поверхонь, тобто механізмами руйнування хімічних зв'язків між адсорбованим киснем та атомами металу при зварюванні в твердій фазі металевих матеріалів, є наступні: термічний, деформаційний (енергетичний), механічний та хімічний. У переважній більшості всі відомі технології способів зварювання тиском направлені на використання саме деформаційної та механічної активації, що, на жаль, пов'язано з достатньо високим рівнем пластичної деформації основних матеріалів. Відомі роботи, в яких для прецизійного дифузійного зварювання матеріалів, які мають низьку деформаційну здатність, використовували проміжні рідкі прошарки, вібраційні коливання ультразвукової частоти, циклічне прикладання тиску, циклічну зміну температури в процесі зварювання, попереднє напилювання, введення в стик м'яких прошарків; а для електроконтактного прецизійного зварювання пластичних металів – спеціальні цикли зварювання, які сприяють локалізації в стику механічної та теплової енергії, а також пришвидшують активацію зварних поверхонь та утворення зварних з'єднань. Але ці роботи носять безсистемний характер. Відсутня інформація щодо основ, принципів та засобів отримання таких прецизійних з'єднань зварюванням тиском.

На нашу думку, застосування рідкої фази за рахунок внесення в стик проміжних прошарків евтектичного складу, модифікації поверхневих шарів, використання поверхневих фізико-хімічних процесів, хімічна активація, а також

локалізація енергії в стику повинно дати можливість для вирішення проблеми прецизійного зварювання однорідних та різнорідних матеріалів.

Актуальність роботи визначається необхідністю проведення системних досліджень по вивченню основних закономірностей формування прецизійних нероз'ємних з'єднань із різних однорідних та різнорідних матеріалів при зварюванні тиском.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота проводилась у Чернігівському національному технологічному університеті за держбюджетними темами прикладних та фундаментальних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України та державного фонду фундаментальних досліджень України: 2006-2008 рр. – «Створення новітніх технологій зварювання виробів електронної техніки із різнорідних матеріалів», № держреєстрації 0106U000426; 2007 р. – проект №Ф25.4/155 «Дослідження та розробка засобів модифікації поверхонь при зварюванні в твердій фазі», договір № Ф25/630-207, № держреєстрації 0107U010840; 2008 р. – проект GP/F26/0060 «Розроблення нового способу дифузійного зварювання через нанорозмірні сублимовані прошарки», договір № Ф26/436-2008, № держреєстрації 0108U005081; 2009-2010 рр. – «Дослідження та розробка технології низькотемпературного дифузійного з'єднання вольфрамкобальтових сплавів», № держреєстрації 0109U000002; 2012-2014 рр. – «Наукові основи отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском», № держреєстрації 0112U003008.

**Об'єкт досліджень** – процеси отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском.

**Предмет досліджень** – закономірності формування структури та механічних властивостей прецизійних зварних з'єднань зварюванням тиском.

**Мета і завдання досліджень.**

Метою роботи є встановлення закономірностей формування прецизійних нероз'ємних з'єднань із різних однорідних та різнорідних матеріалів і розробка на цій основі технологій прецизійного зварювання тиском.

Для реалізації цієї мети в роботі вирішувались такі завдання:

1. Дослідити вплив термомеханічного циклу на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань та розробити методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском залежно від допустимого рівня деформації основних матеріалів.
2. Вивчити здатність до прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів з модифікацією поверхневих шарів та локалізацією теплової і механічної енергії в стику.
3. Дослідити можливість використання хімічної активації, багат шарових, пористих та м'яких прошарків для прецизійного зварювання тиском.
4. Вивчити здатність до прецизійного зварювання тиском різнорідних металевих матеріалів із використанням поверхневих фізико-хімічних процесів, які відбуваються в стику.
5. Дослідити перехідну зону зварних з'єднань та вивчити основні закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском.

6. Розробити технологічні основи отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань та нові технології прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів.

**Методи досліджень.** Для приготування шліфів використовували хімічне, електролітичне та іонне травлення. Дослідження структури та фазового складу отриманих з'єднань проводили за допомогою методів оптичної мікроскопії на мікроскопах MIM-8 та «Neophot-32», растрової електронної мікроскопії на мікроскопі: JSM-840 «JEOL», Японія. Мікрорентгеноспектральний аналіз (МРСА) розподілу елементів проводили на установці «Comebax» SX50, (Франція). Дослідження мікротвердості проводили на мікротвердомірі M400 фірми LECO (США).

Елементний склад окремих ділянок поверхні зварних зразків вивчали методом енергодисперсійного аналізу на електронному мікроскопі JSM-35CF «JEOL», (Японія) з приставкою «INCA-350» (Великобританія).

Для дослідження дифузійних процесів у зоні з'єднання використовували метод авторадіографії та радіоактивні ізотопи  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ , які наносили гальванічним шляхом на поверхні, що підлягають зварюванню. Обробку авторадіограм проводили на мікрофотометрі МФ-4.

Моделювання процесу нагрівання та аналіз напруженого стану з'єднань здійснювали за допомогою комплексного програмного пакета ANSYS 11.0, (підстава для використання: договір про передачу ліцензованого програмного забезпечення між Чернігівським національним технологічним університетом та ЗАТ «Кадфем Си-Ай-Ес» від 2010 року). Моделювання процесів пружно-пластичного деформування матеріалів при зварюванні тиском здійснювали на спеціалізованому програмному забезпеченні «Weldpredictions» спільно з ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

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

1. Отримали подальшого розвитку теоретичні основи твердофазного з'єднання та встановлено закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском. Показано, що основною вимогою для забезпечення прецизійності є перетворення в процесі зварювання ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину за рахунок: 1 – локалізації теплової та механічної енергії в стику; 2 – модифікації поверхонь; 3 – використання проміжних багатошарових, пористих наноструктурованих прошарків та хімічно активних шарів; 4 – використання поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно. Створено методологію управління процесом перетворення ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину.

2. Уперше розроблено термомеханічну модель процесу прецизійного зварювання, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати режими зварювання ( $T_{зв}$ ,  $P_{зв}$  та  $t_{зв}$ ). Розроблено методику розрахунку, яка дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється, та температуру нагріву отримувати значення тиску та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації основного матеріалу.

3. Уперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової та механічної енергії в стику при електроконтактному зварюванні є застосування перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір.

Показано, що використання проміжного перфорованого прошарку з титану при електроконтактному зварюванні твердих сплавів дозволяє локалізувати температуру в стику, яка в 2 рази більше, ніж при безпосередньому зварюванні цих сплавів без використання прошарку, та забезпечити утворення якісних нероз'ємних з'єднань.

4. Уперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику та активації поверхонь при електроконтактному зварюванні є використання тонких прошарків зі зварювального матеріалу. Застосування тонких прошарків із зварювального матеріалу дозволяє підвищити прецизійність та міцність зварних з'єднань. Показано, що міцність зварних з'єднань з алюмінію отриманих електроконтактним зварюванням через тонкі прошарки з алюмінію складає 95-100 % міцності основного металу при відносній деформації основного матеріалу порядку 2 %.

5. Отримало подальшого розвитку дослідження процесу хімічної активації поверхонь та розроблено технологічні рекомендації щодо його застосування для прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів. Уперше встановлено, що отримання прецизійного зварного з'єднання ( $\varepsilon \leq 1\%$ ) при зварюванні тиском у твердій фазі вуглецевої сталі визначається механічною підготовкою поверхонь, параметрами процесу ( $T_{зв}$ ,  $P_{зв}$  та  $t_{зв}$ ) і наявністю проміжного шару вуглеводневої суміші, що наноситься до зварювання на поверхні. Вдосконалено технологічний процес видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні за рахунок використання нового засобу створення рідких металевих прошарків шляхом внесення в контакт суміші складу  $Na_2SiO_3-HCl-Mg$ .

6. Отримало подальшого розвитку дослідження поверхневих фізико-хімічних процесів (адсорбція, автовакуумування, розчинення, самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація). Уперше встановлено ефективність використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском у вакуумі різнорідних металів. Показано, що конденсований шар одного з металів, що зварюється, на поверхні іншого дозволяє підвищити на 15-20 % міцність з'єднань при інших рівних умовах.

**Практична цінність.** Створено наукові підходи та технологічні основи прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів.

Встановлені закономірності впливу технологічних параметрів на особливості формування прецизійних зварних з'єднань. Розроблено методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском у залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.

Розроблена нова типова загальна технологія прецизійного зварювання тиском різних матеріалів, ефективність якої було апробовано при виготовленні: твердосплавного інструменту при зварюванні алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом; високоміцних інтерметалідних багат шарових пластин на основі інтерметаліду – алюмініду титану при зварюванні алюмінію з титаном; прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення з алюмінієвих сплавів при дифузійному зварюванні.

Отримані результати можуть бути використані при розробці технологій виготовлення різних прецизійних деталей та вузлів приладів і механізмів з однорідних та різнорідних матеріалів.

**Особистий внесок здобувача.** Автором сформульовано мету, завдання досліджень, основні висновки, розроблено постановку досліджень. Експериментальні дослідження прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів проведені автором безпосередньо. Вивчення структури зварних з'єднань та узагальнення результатів досліджень проводилися за участю автора.

У публікаціях, наведених в авторефераті, автору належить: постановка задачі, проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів з використання поверхневих фізико-хімічних процесів для активації поверхонь при зварюванні різнорідних металевих матеріалів: [2], [4], [21], [22], [26], [28], [47]; аналіз літературних даних, запропонована ідея використання тонких проміжних прошарків зі зварювального матеріалу та з матеріалу з високим питомим опором, розробка технологій та визначення оптимальних параметрів для зварювання тиском металевих матеріалів із локалізацією теплової та механічної енергії в стику: [5], [7], [12], [17], [20], [24], [25], [30-33], [35], [48], [49], [52]; розробка методики експериментів та узагальнення результатів при використанні хімічної активації для зварювання сталі, алюмінію та його сплавів: [8], [13], [23], [36], [40], [43], [45], [50]; аналіз літературних даних, розробка методики проведення експериментів, узагальнення результатів щодо використання для зварювання тиском пористих, багат шарових та м'яких прошарків: [1], [3], [6], [9-11], [15], [34], [37-39], [41], [42], [46], [51]; аналіз літературних даних та розробка методики проведення експериментів для дифузійного зварювання жароміцних сплавів через багат шарові та пористі прошарки: [16], [18]; планування та проведення експериментів із визначення оптимальних режимів модифікації поверхневих шарів та дослідження дифузійних процесів при зварюванні через такі шари: [14], [27], [29], [44]; запропонована ідея розробки методики розрахунку режимів зварювання для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань та узагальнення результатів: [19].

**Апробація роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних і національних галузевих науково-технічних конференціях: «Зварювання та споріднені технології» (м. Київ, Україна ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005, 2007, 2013 рр.); «Сварка и родственные процессы в промышленности» (м. Київ, Україна, 2006 р.); «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (м. Москва, МАПІ, Росія, 2008 р.); «Spanish Technical Sessions on Welding» (м. Мадрид, Іспанія, 2010 р.); «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, ЧНТУ, Україна, 2011, 2012, 2016 рр.); «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития» (м. Краматорськ, ДГМА, Україна, 2012 р.); «Университетская наука-2014» (м. Маріуполь, ПГТУ, Україна, 2014 р.); «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» (м. Миколаїв, НУК, Україна, 2014 р.); «Ukraine – EU. Modern technology, business and law» (Словаччина, м. Кошице, 2015 р., м. Братислава, 2016 р.); «International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)» (м. Київ, НТУУ «КПІ», Україна, 2016 р.); «International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering «YSF-2016»» (м. Харків, ІРЕ ім. О.Я.Усикова, Україна, 2016 р.).

**Публікації.** За темою дисертації оприлюднено 52 роботи: 25 статей у фахових виданнях, з яких 11 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних (у т. ч. Web of Science, Scopus, Index Copernicus та інших) та 4 у фахових

виданнях інших держав; 21 – у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій (матеріали 2 конференцій входять до наукометричної бази даних Scopus); отримано 6 патентів України.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 9 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури. Робота викладена на 354 сторінках машинописного тексту, містить 147 рисунків, 36 таблиць, список літератури з 253 найменувань на 27 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та визначено основні задачі досліджень. Описано об'єкт і методи досліджень, визначена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, обґрунтовано достовірність результатів роботи, відображено особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію роботи.

**У першому розділі** дисертації проведено аналіз процесів, відповідальних за утворення зварного з'єднання при зварюванні тиском, проаналізовано основні процеси і фактори, які можуть впливати на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при дифузійного зварювання у вакуумі та електроконтактному зварюванні. Проведено огляд літератури щодо існуючих способів інтенсифікації процесу зварювання тиском та способів обмеження деформації деталей при цьому.

На підставі аналізу робіт закордонних та українських учених: М. Ф. Казакова, Е. С. Каракозова, А. С. Гельмана, Б. Д. Орлова, Г. В. Конюшкова, Р. А. Мусіна, А. В. Люшинського, В. Ф. Квасницького, Г. К. Харченко, С. І. Кучука-Яценка щодо технологічних основ дифузійного зварювання у вакуумі та електроконтактного зварювання, зроблено висновок, що основним технологічним прийомом для прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів є застосування додаткових засобів активації поверхонь та вибір оптимальних параметрів режиму зварювання, що забезпечить при цьому допустимий рівень деформації основних матеріалів. Показано, що обмеження деформації основних матеріалів обумовлює необхідність застосування додаткових засобів для активації поверхонь: використання рідкої фази, використання поверхневих фізико-хімічних процесів, проміжних прошарків, хімічної активації, модифікації поверхонь та локалізації теплової енергії в стику. Аналіз основних процесів та факторів, які можуть впливати на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском різних матеріалів, показав, що для кожної окремої групи конструкційних матеріалів, властивості яких утруднюють отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань, існує ймовірність, що застосування певних технологічних прийомів з активації поверхонь (інтенсифікації процесу зварювання) може сприяти отриманню якісних прецизійних з'єднань.

Відсутність відомостей щодо основ, принципів та засобів отримання прецизійних з'єднань різних однорідних та різнорідних матеріалів зварюванням тиском визначають мету та задачі дисертаційної роботи.

**У другому розділі** наведено перелік матеріалів, які використовуються в роботі, їхні властивості, описано технологічні параметри устаткування, методика підготовки зразків до зварювання, досліджень та випробувань. Дослідження



проводили на твердих вольфрамкобальтових сплавах ВК10, ВК15, алмазотвердосплавних пластинах (АТП), інтерметалідному сплаві  $\gamma$ -TiAl, вуглець-вуглецевих композиційних матеріалах, сплавах титану ВТ1, ВТ6, молібдені марки МЧ, сплаві хрому ВХ-2К, міді М1, сталі 45, жароміцних сплавах на нікелевій основі, напівпровідниковому матеріалу  $Vi_2Te_3$ , алюмінію марки АД00 та сплавах алюмінію АМц, АМцМ, АД31, АМг5, АМг6.

У роботі досліджували з'єднання різнорідних матеріалів: мідь+титан, мідь+молібден, мід+хром, мідь+напівпровідниковий матеріал, алюміній+титан, які виконували дифузійним зварюванням у вакуумі, а також з'єднання однорідних матеріалів: алюміній+алюміній, нікелевий сплав+нікелевий сплав, твердий сплав+твердий сплав, які виконували дифузійним зварюванням у вакуумі та (або) електроконтактним зварюванням. Під час зварювання застосовували прошарки суцільного та перфорованого перетину з титану ВТ1, сталі Ст3, нікелю марки НПЗ, алюмінію АД00, АД1, прошарки евтектичного складу системи Al-Si, багат шарові прошарки Al/Ti, Al/Ni, Al/Cu, пористі прошарки з Cu, Co, Ni, а також конденсовані мідні та титанові шари. Модифікацію поверхневих шарів проводили іонною обробкою напиленних шарів.

Дифузійне зварювання у вакуумі виконували на установках типу УВН і П-115 з радіаційною системою нагріву та У-394М з електронно-променевим джерелом нагріву зразків. Електроконтактне зварювання виконували на машині для точкового зварювання МТ1216 та для стикового зварювання МС-802У. Іонну обробку проводили на модифікованій установці для вакуумного напилення УРМ-3.

Механічні випробування зварних з'єднань на розтяг проводили при кімнатній температурі на стандартних зразках. Дослідження міцності зварних з'єднань на зріз проводили на зразках розміром  $5 \times 5 \times 10$  мм на машині УМ-5.

**У третьому розділі** наведено результати досліджень впливу основних параметрів зварювання тиском на деформацію матеріалів, що зварюються. На основі аналізу літератури було визначено, що одним із основних технологічних прийомів для прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів, крім активації поверхонь, є вибір оптимальних параметрів режиму зварювання, що забезпечить мінімально допустимий рівень деформації основних матеріалів. Проте в наявних публікаціях відсутня інформація щодо технологічних основ визначення параметрів зварювання тиском з урахуванням ступеня пластичної деформації основних матеріалів.

Тому нами за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення «Weldpredictions» спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України було розроблено математичну модель спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків із конкретного металу при їх зварюванні тиском, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати оптимальний режим зварювання ( $T_{зв}$ ,  $P_{зв}$  та  $t_{зв}$ ). Розроблено методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском залежно від допустимого рівня деформації основних матеріалів, яка дозволяє на основі вихідних даних про: 1 – матеріал деталі, що зварюється (фізико-хімічні та механічні властивості); 2 – температуру нагріву ( $T_{зв}$ ); 3 – допустимий рівень деформації основного матеріалу

(% по висоті або товщині) у результаті розрахунку отримувати: 1 – максимальний тиск ( $P_{зв}$ ) та час нагріву ( $t_{зв}$ ) для забезпечення допустимого рівня деформації.

За результатами проведених численних експериментів побудовані діаграми, що дозволяють при різних температурах зварювання визначати оптимальне співвідношення тиску та часу витримки для досягнення необхідного рівня деформації матеріалів, що з'єднуються. Порівняльний аналіз експериментальних даних та даних отриманих за допомогою розробленої методики показав співпадіння результатів на 90 %, що свідчить про ефективність застосування даної методики та можливість її використання при розробці конкретних технологій прецизійного зварювання тиском різних матеріалів.

**У четвертому розділі** досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів *із модифікацією поверхневих шарів*. Як показав літературний аналіз, при зварюванні металів, що мають обмежену розчинність, перспективним є використання попередньої іонної обробки, яка змінює структуру та властивості поверхні та поверхневого шару. Відомо, що нероз'ємні з'єднання металів, що мають взаємну нерозчинність, на сьогодні отримують способами зварювання тиском через проміжні прошарки з третього елемента, який має взаємну розчинність з обома металами, що з'єднуються. Однак це призводить до зниження тепло- і електропровідності вузла. Тому в роботі на прикладі дифузійного зварювання у вакуумі міді з молібденом та хромом, з'єднання яких широко використовуються у приладобудуванні, проведено дослідження впливу примусового насичення іонною модифікацією поверхневого шару одного із металів, що зварюється, іншим, на властивості поверхневого шару та здатність до зварювання. Було визначено оптимальний режим обробки у плазмі тліючого розряду поверхні молібдену та хрому, вкритих шаром міді, для підвищення пластичності поверхневого шару тугоплавких матеріалів.

Встановлено, що для забезпечення необхідних механічних характеристик модифікованого іонною обробкою шару молібдену (хрому), необхідно застосовувати прискорюючу напругу в межах 500-1000 В, щільність іонного струму  $1 \text{ mA/cm}^2$ , тиск залишкових газів 12 Па та час обробки 10-20 хвилин. За таких режимів обробки мікротвердість, відповідно і пластичність модифікованого шару займають проміжні значення між міддю та тугоплавким матеріалом і створюються сприятливі умови для проходження деформаційних процесів. Дифузійне зварювання у вакуумі міді з молібденом проводилося безпосередньо та через модифікований шар із міді на режимах, які обиралися згідно з літературними даними:  $T_{зв}=1223 \text{ K}$ ;  $t_{зв}=20 \text{ хв}$ ;  $P_{зв}=15 \text{ МПа}$  та тиск у камері  $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ Па}$ .

Результати механічних випробувань на зріз показали, що міцність зварного з'єднання досягає міцності міді М1 – 110 МПа, що на 70 % більше міцності зварного з'єднання, отриманого безпосередньо. Міцність зварних з'єднань міді з хромом, отриманих на аналогічних режимах, досягає 160 МПа. При цьому деформація міді становила більше 8 %.

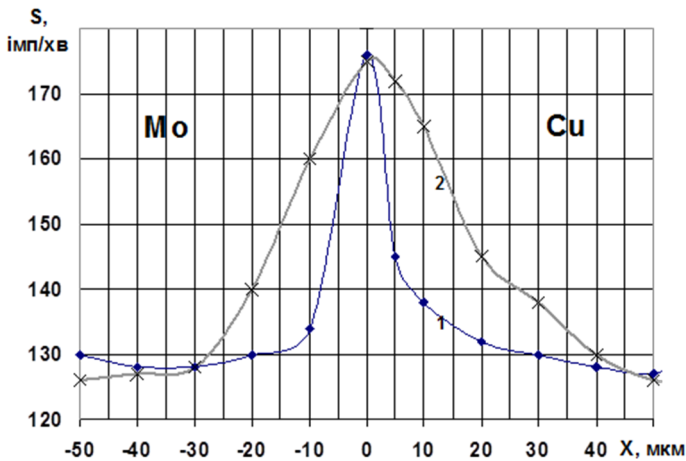


Рисунок 1 – Концентраційний розподіл  $^{63}\text{Ni}$  в Мо та Cu після зварювання напряму (1) та через модифікований шар молибдену (2)

зону дифузійної взаємодії у порівнянні зі зварюванням без обробки (рис. 1). Мікрорентгеноспектральний аналіз зварних з'єднань також показав, що ширина дифузійної зони з'єднань міді з молибденом з модифікованим шаром збільшується на 15 % у порівнянні зі з'єднанням отриманим без обробки. Для забезпечення прецизійності був проведений аналогічний експеримент при зменшенні тиску зварювання до 2 МПа, який був обраний за допомогою розробленої методики (розділ 3) з метою зменшення пластичної деформації. Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах, не перевищує 1 %, що відповідає вимогам прецизійності. Механічні випробування на зріз показали, що міцність зварних з'єднань міді з молибденом при цьому становить 100-105 МПа, а міцність міді з хромом – 120-125 МПа, що становить 91-95 та 110-113 % відповідно від міцності міді.

У п'ятому розділі досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів із локалізацією теплової та механічної енергії в стику. Відомо, що при дифузійному зварюванні ключову роль в утворенні нероз'ємного з'єднання відіграє активація поверхонь за рахунок нагріву та зсувних деформацій у стику, а ширина зони взаємної взаємодії при цьому становить 10-100 мкм. Тобто для отримання якісних з'єднань немає необхідності піддавати температурному і деформаційному впливу зварні деталі загалом. Одним із найпростіших засобів локалізації температурного поля в стику є застосування імпульсу струму як джерела нагріву. Крім способів електроконтактного зварювання, нагрів струмом, що проходить, використовується також і при дифузійному зварюванні.

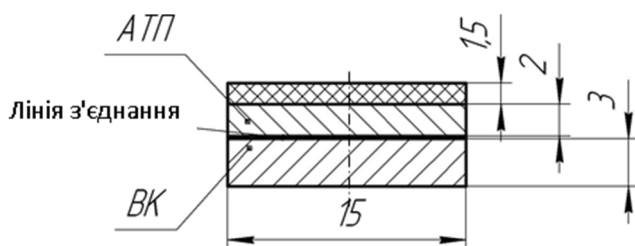


Рисунок 2 – Ескіз типового вузла АТП збільшеної висоти, шляхом з'єднання з твердим сплавом

Результати механічних випробувань були підтверджені дослідженнями дифузійних процесів, які, як відомо, визначають механічні характеристики зварних з'єднань. Спільно з інститутом металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України за допомогою методу авторадіографії було вивчено вплив іонної обробки на дифузійну взаємодію при дифузійному зварюванні. Встановлено, що іонна обробка мідного покриття на молибдені дозволяє у 4-5 разів розширити

зону дифузійної взаємодії у порівнянні зі зварюванням без обробки (рис. 1). Мікрорентгеноспектральний аналіз зварних з'єднань також показав, що ширина дифузійної зони з'єднань міді з молибденом з модифікованим шаром збільшується на 15 % у порівнянні зі з'єднанням отриманим без обробки. Для забезпечення прецизійності був проведений аналогічний експеримент при зменшенні тиску зварювання до 2 МПа, який був обраний за допомогою розробленої методики (розділ 3) з метою зменшення пластичної деформації. Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах, не перевищує 1 %, що відповідає вимогам прецизійності. Механічні випробування на зріз показали, що міцність зварних з'єднань міді з молибденом при цьому становить 100-105 МПа, а міцність міді з хромом – 120-125 МПа, що становить 91-95 та 110-113 % відповідно від міцності міді.

У п'ятому розділі досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів із локалізацією теплової та механічної енергії в стику. Відомо, що при дифузійному зварюванні ключову роль в утворенні нероз'ємного з'єднання відіграє активація поверхонь за рахунок нагріву та зсувних деформацій у стику, а ширина зони взаємної взаємодії при цьому становить 10-100 мкм. Тобто для отримання якісних з'єднань немає необхідності піддавати температурному і деформаційному впливу зварні деталі загалом. Одним із найпростіших засобів локалізації температурного поля в стику є застосування імпульсу струму як джерела нагріву. Крім способів електроконтактного зварювання, нагрів струмом, що проходить, використовується також і при дифузійному зварюванні.

У роботі на прикладі з'єднання алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом (рис. 2), що використовується при виготовленні ріжучого та бурового інструменту,

було досліджено можливість використання локалізації теплової енергії для прецизійного зварювання матеріалів, що мають низьку деформаційну здатність.

Основна проблема при виготовленні ріжучого інструменту із застосуванням АТП пов'язана з тим, що при температурах вище 943-973 К спостерігається різке падіння рівня фізико-механічних властивостей алмазного шару, що вимагає розробки засобів з'єднання ріжучої частини із державкою у вузлі інструменту при температурах, нижче 943 К.

Дослідження зварювання твердих сплавів проводились на зразках розміром 6х6х5 мм з вольфрамкобальтових сплавів марок ВК10 та ВК15. Для додаткової локалізації температурного поля були використані прошарки з титану (ВТ1) та сталі (Ст3), що мають порівняно високий електричний опір. Також як проміжний прошарок використовували нікель (НПЗ), який, за даними літературних джерел, найчастіше використовується для зварювання в твердій фазі вольфрамкобальтових сплавів при температурах 1323-1493 К. Товщину проміжних прошарків змінювали від 50 до 200 мкм. Для визначення оптимальних режимів зварювання в твердій фазі був досліджений вплив основних параметрів зварювання ( $I_{зв}$ ,  $t_{зв}$ ,  $F_{зв}$ ) на розподіл температури по висоті зразків. Необхідно зауважити, що вимірювання температури проводили безпосередньо в контакті твердих сплавів та на відстані 2 мм від контакту, що відповідає розміщенню алмазного шару в АТП. Дослідження температурних полів при електроконтактному нагріві твердих сплавів проводили також за допомогою математичного моделювання з використанням програмного пакета ANSYS.

Встановлено, що тепловиділення залежить від багатьох параметрів зварювання, і в тому числі від матеріалу прошарку. При використанні прошарку з титану температура в контакті твердих сплавів становить залежно від способу визначення (експеримент або розрахунок) близько 1350-1550 К ( $\sim 0,7 T_{пл}$  титану), що майже в 2 рази більше, ніж при електроконтактному нагріві твердих сплавів напряму (рис. 3).

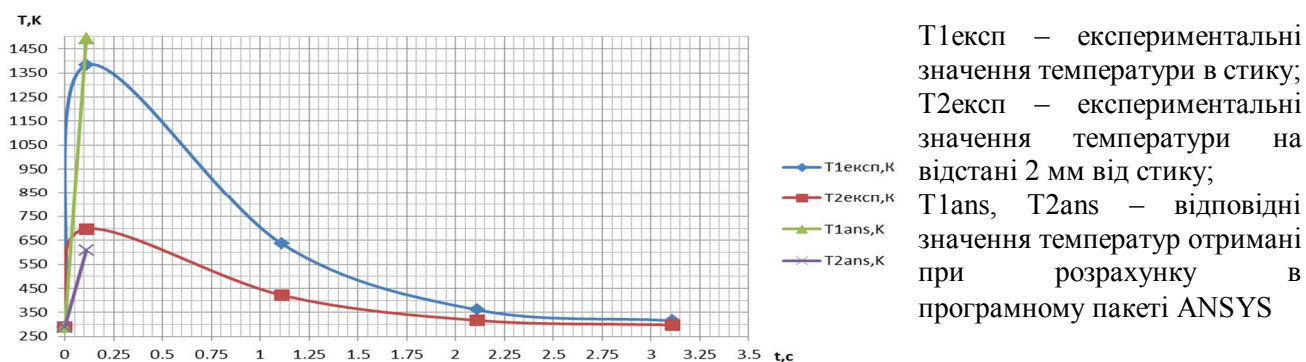
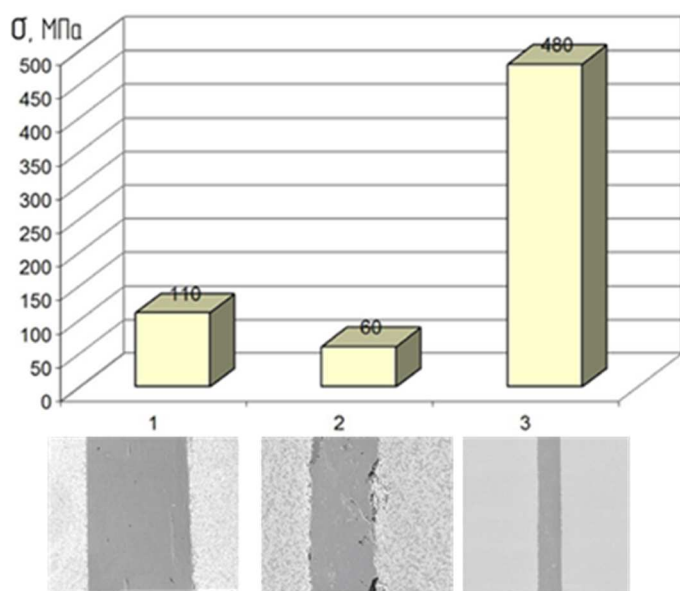


Рисунок 3 – Графіки залежності температури від часу при нагріві імпульсом струму з'єднань твердих сплавів з проміжним прошарком з титану товщиною 200 мкм (час імпульсу струму силою 12 кА – 0,1 с)

Експериментально було визначено оптимальний режим зварювання:  $j = 330-350 \text{ А/мм}^2$ ,  $\tau_{зв} = 0,10-0,12 \text{ с}$ ,  $P_{зв} = 8-10 \text{ МПа}$ , у процесі якого температура на відстані 2-3 мм від стикі (місце контакту алмазного шару і прошарку з твердого сплаву) не перевищує 973 К як за експериментальними, так й за розрахунковими даними.



1 – сталь; 2 – нікель; 3 – титан

Рисунок 4 – Залежність міцності зварних з'єднань сплаву BK-10 отриманих на оптимальних режимах через проміжні перфоровані прошарки товщиною 200 мкм від матеріалу проміжного прошарку

та на 40-60 % перевищує міцність зварних з'єднань твердого сплаву зі сталлю отриманого електроконтактним зварюванням напряду. Встановлено також, що при інших рівних умовах зварювання твердих сплавів через проміжний прошарок титану товщиною 200 мкм забезпечує міцність зварного з'єднання на 25 %

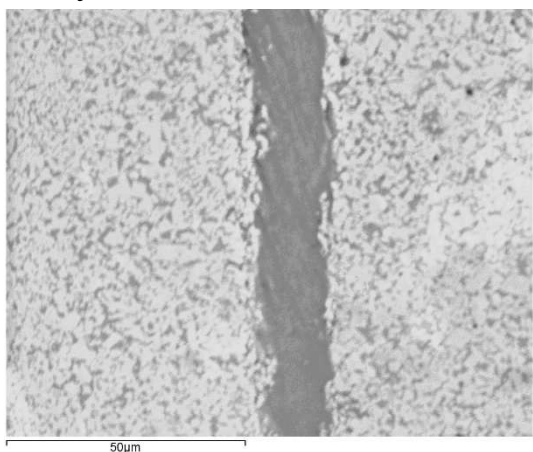


Рисунок 5 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву BK15, отриманого на оптимальних режимах через перфорований прошарок Ti товщиною 200 мкм (растрова електронна мікроскопія)

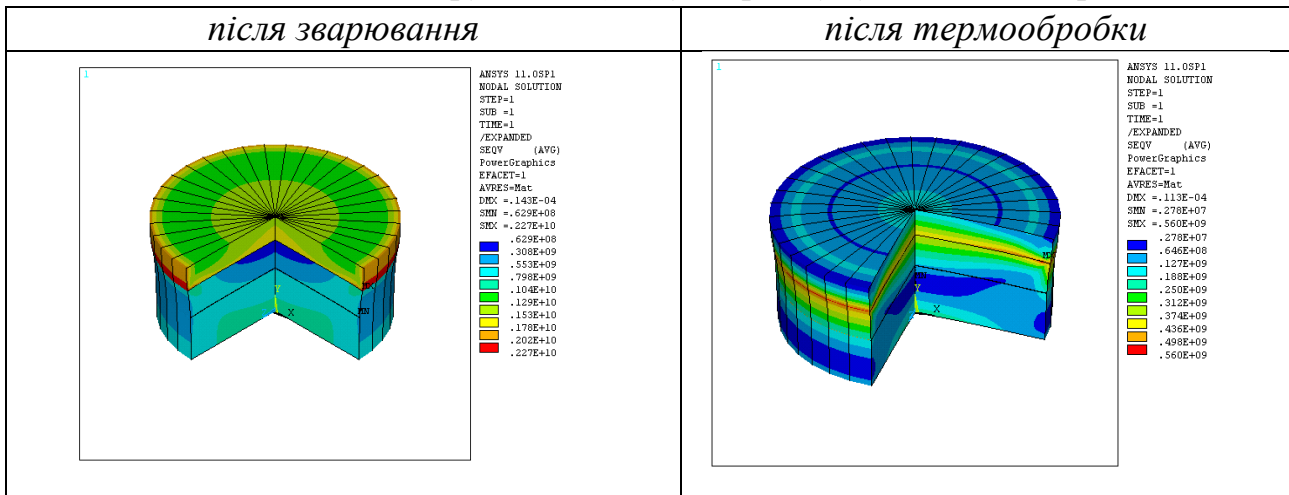
Відомо, що для інтенсифікації мікропластичної деформації в стику при зварюванні в твердій фазі використовують перфоровані прошарки, які являють собою прошарки зі змінним перетином, що мають підвищену здатність до пластичної деформації. На нашу думку, використання таких прошарків може дозволити додатково локалізувати температурне поле при зварюванні та інтенсифікувати зсувні деформації в стику та активувати поверхні твердих сплавів. Тому були проведені дослідження зі зварювання твердих сплавів через перфоровані прошарки з титану, нікелю та сталі. Встановлено, що найбільша міцність з'єднання твердих сплавів спостерігається при використанні перфорованих прошарків з титану – 480 МПа (рис. 4), що перевищує міцність паяних з'єднань на 30-35 % більше, ніж через прошарок товщиною 50 мкм, що пояснюється більшим тепловиділення і як наслідок – більшим ступенем деформації прошарку та активації поверхні твердого сплаву.

За результатами досліджень було встановлено, що для повного заповнення отворів перфорованого прошарку з коефіцієнтом перфорації 0,2 необхідний рівень його пластичної деформації повинен становити 60-70 %. При зварюванні сплаву BK15 деформація титанового перфорованого прошарку становить 92 % (рис. 5), а при зварюванні сплаву BK10 – 66 %. Це пояснюється тим, що при підвищенні вмісту кобальту електричний опір і, відповідно, тепловиділення в твердому сплаві зменшуються, що призводить до підвищення концентрації

теплового поля в контактi та зменшення опору пластичної деформації прошарку титану. Необхідно відзначити, що деформація твердого сплаву не перевищувала 1 % по висоті зразка, що відповідає вимогам прецизійності.

Зважаючи на те, що час зварювання складає порядку 0,1 с, можна зробити припущення, що при електроконтактному зварюванні в твердій фазі вольфрамкобальтових сплавів реалізується стадія фізичної та хімічної взаємодії, тобто утворення з'єднання відбувається за рахунок схоплення. Тому для реалізації стадії об'ємної взаємодії нами були проведені дослідження з впливу термообробки на якість з'єднань. Встановлено, що термообробка з'єднань, отриманих на оптимальному режимі електроконтактним зварюванням, при температурі 973 К призводить до збільшення їх міцності: після витримки протягом 120 хвилин міцність зварного з'єднання становить 550 МПа, що на 15 % більше міцності зварного з'єднання безпосередньо після електроконтактного зварювання. Можна припустити, що це пов'язано зі збільшенням зони об'ємної взаємодії, релаксацією залишкових напружень та рекристалізацією матеріалу прошарку (температура рекристалізації титану залежно від його чистоти становить 673-873 К). Для підтвердження цього припущення був проведений мікрорентгеноспектральний аналіз зварних з'єднань після електроконтактного зварювання та термообробки, а також проведені дослідження напружено-деформованого стану зварних вузлів (табл. 1). Встановлено, що термообробка зварних з'єднань на вказаних режимах дозволяє збільшити зону об'ємної взаємодії більше ніж на 60 %, що підтверджує та пояснює дані щодо підвищення міцності з'єднання після відпалу.

Таблиця 1 – Еквівалентні напруження (Па) у зварному вузлі АТП з твердим сплавом



Характер розподілу складових напруженого стану після електроконтактного зварювання свідчить про зосередження зон значних напружень поблизу зовнішньої поверхні вузла та по зоні контакту АТП з верхньою твердосплавною пластиною. Максимальний рівень напружень спостерігається на зовнішній поверхні алмазного шару АТП і становить порядку 2000 МПа, що в 2-3 рази менше допустимого рівня. Встановлено, що проведення після електроконтактного зварювання термічної обробки на вказаних режимах призводить до зниження у 1,5-2 рази рівня всіх складових напружень у зоні з'єднання АТП з твердим сплавом. На основі отриманих результатів нами було

запропоновано модель утворення зварного з'єднання твердих сплавів через перфорований прошарок титану при нагріві імпульсами струму (рис. 6): після збирання заготовок через перфорований прошарок з  $K_p=0,2$  на 1-му етапі при електроконтактному нагріві відбувається пластична деформація прошарку на рівня 70-80 %, поверхні схоплюються за рахунок фізичної та хімічної взаємодії; на 2-му етапі при термообробці відбувається рекристалізація матеріалу прошарку, релаксація залишкових напружень та збільшення зони об'ємної взаємодії.

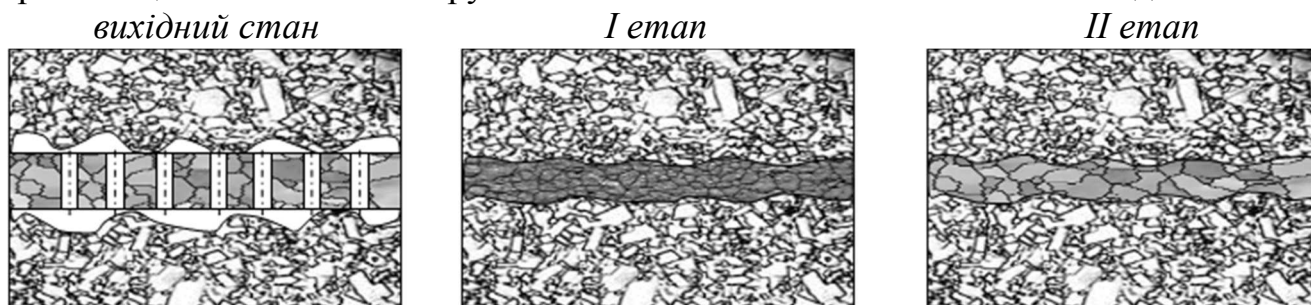


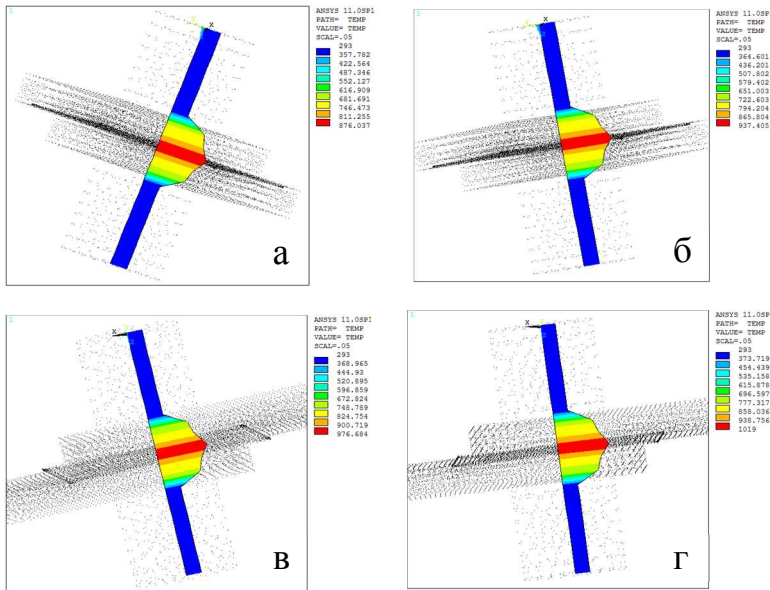
Рисунок 6 – Модель утворення зварного з'єднання твердих сплавів через перфорований прошарок титану

Дослідження здатності до прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів з локалізацією теплової енергії в стику. Деформація має вирішальне значення при виробництві виробів найбільш розповсюдженим способом зварювання тиском – електроконтактним точковим зварюванням (ЕКТЗ), яке супроводжується деформацією в стику (вм'ятини у точці), що досягає 20 % товщини деталі. Це призводить до зниження площі перерізу зварного з'єднання та, як наслідок, зменшення його міцності. Відомі способи зниження зварювальних деформацій при ЕКТЗ не дозволяють забезпечити прецизійне з'єднання без застосування додаткових елементів апаратури управління, допоміжного обладнання, проміжних шарів з інших матеріалів, що негативно може впливати на властивості та структуру перехідного шару. Локалізації теплової та механічної енергії в стику, на наш погляд, можна досягти за рахунок використання тонкого проміжного прошарку зі зварювального матеріалу. Відомо, що контактний опір між деталями, який залежить від стану поверхні деталей, зварювального тиску і в декілька разів перевищує опір самих деталей, відіграє ключову роль у нагріві деталей при ЕКТЗ. Відповідно, на нашу думку, ефективним засобом для локалізації тепловиділення може бути розміщення між деталями, що зварюються, декількох шарів фольги зі зварювального матеріалу.

Для підтвердження ефективності запропонованого засобу нами були проведені теоретичні та експериментальні дослідження. Як матеріал для дослідження використовували зразки з алюмінію марки АД00 та АМц розміром  $2 \times 20 \times 100$  мм. Як багат шаровий прошарок зі зварювального матеріалу використовували суцільну стрічку алюмінієвої фольги АД0 завтовшки 11 мкм. Зварювання зразків проводили на точковій машині загального використання типу МТ-1216 на максимально можливому для неї жорсткому режимі: щільність струму –  $350 \text{ А/мм}^2$ , час зварювання – 0,1 с, зусилля зварювання 500-600 Н (мінімально можливе для даного типу машин). Для зварювання використовували

мідні електроди діаметром 6 мм. Необхідно відмітити, що на вказаних режимах з'єднання алюмінію напряду отримати взагалі не вдається.

За допомогою комплексної системи ANSYS були проведені дослідження температурних полів при електроконтактному точковому зварюванні металевих



матеріалів через тонкі прошарки із зварювального матеріалу (рис. 7). Встановлено, що зі збільшенням кількості шарів алюмінієвої фольги зростає локалізація теплової енергії в стику, а температура в ядрі зварного з'єднання, досягає температури плавлення алюмінію, у випадку розміщення 4-6 шарів алюмінієвої фольги.

Механічні випробування на зріз з'єднань алюмінію АД00, отриманих ЕКТЗ через прошарки з алюмінію, на режимах вказаних вище показали, що найбільш міцне зварне з'єднання отримуємо при використанні прошарку із 4 шарами алюмінієвої фольги –

60 МПа, що становить 95-100 % від міцності на зріз алюмінію АД00. З'єднання утворюється за рахунок взаємного розплавлення та утворення загальної литої зони (рис. 8).

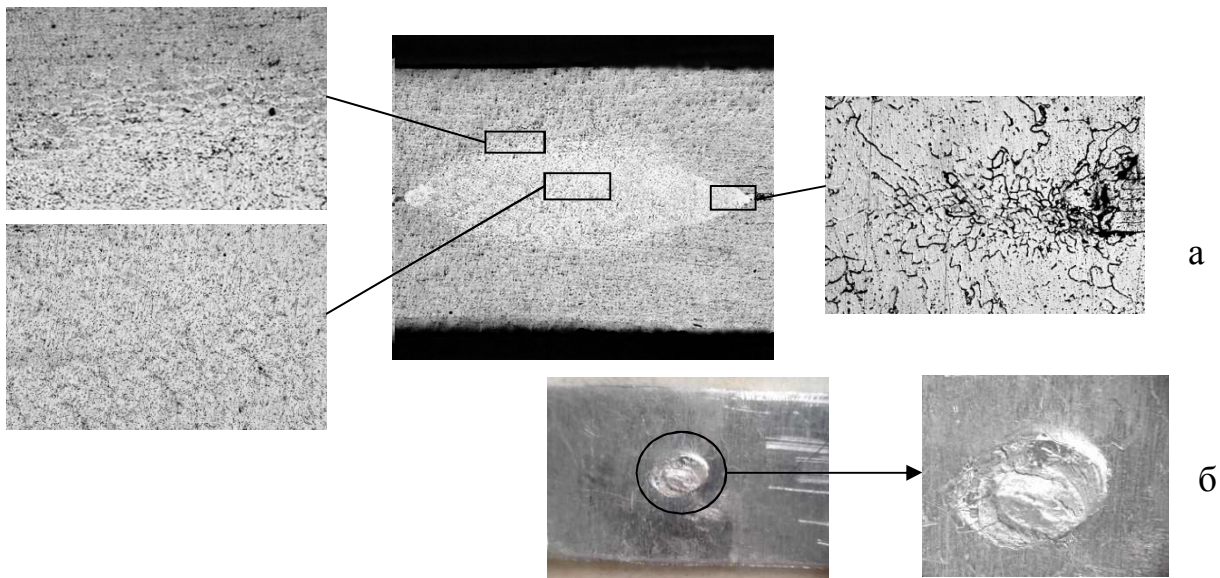


Рисунок 8 – Мікроструктура литого ядра (а,  $\times 10$ ) та топографія поверхні після випробування на зріз (б,  $\times 16$ ) зварного з'єднання АД00 отриманого через прошарок з алюмінію (4 шари) (оптична мікроскопія)



При цьому деформація основного матеріалу (глибина вм'ятини) не перевищує 2 % товщини деталі, глибина проплавлення становить приблизно 20-25 % товщини основного металу, а діаметр ядра – 5-6 мм (~85 % від норми за стандартом).

Дослідження процесів масоперенесення при прецизійному ЕКЗ алюмінію, проведені спільно з інститутом металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАНУ за допомогою методу авторадіографії, також підтвердили результати механічних випробувань (рис. 9). Встановлено, що коефіцієнт масоперенесення при зварюванні через 4 шари фольги складає  $7,2 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с, що у 2-3 рази вище, ніж в інших двох випадках та у 4-6 разів є вище порівняно із коефіцієнтом самодифузії алюмінію –  $6,1 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с при температурі 873 К. Це можна пояснити протіканням при ЕКЗ явища аномального масоперенесення в металах та сплавах, яке спостерігається при імпульсних впливах.

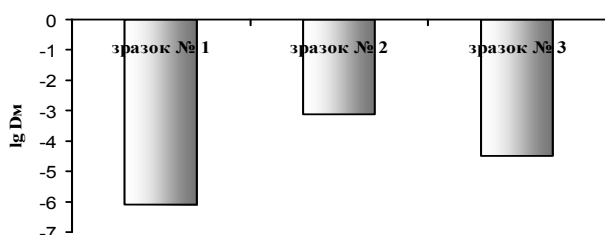


Рисунок 9 – Гістограма величин коефіцієнтів масоперенесення у перерізі по центру кожного зразка: зразок №1 – 2 шари; зразок №2 – 4 шари; зразок №3 – 6 шарів

Крім цього, ефективність використання прошарків із матеріалу, що зварюється, було встановлено нами й при електроконтактному стиковому зварюванні опором (рис. 10). При зварюванні прутків із алюмінію АД31 міцність зварних з'єднань досягає 95 % міцності основного матеріалу при використанні

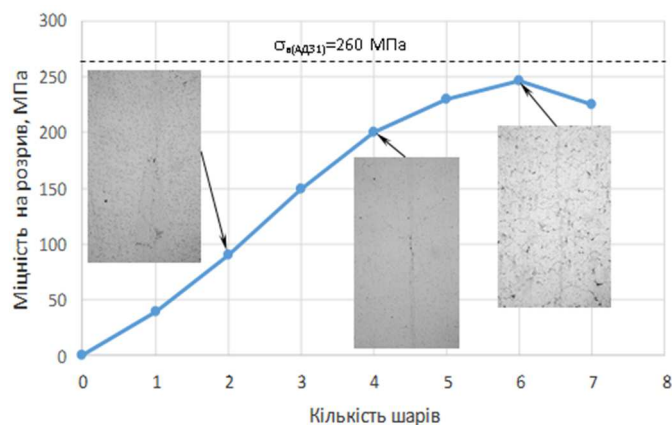


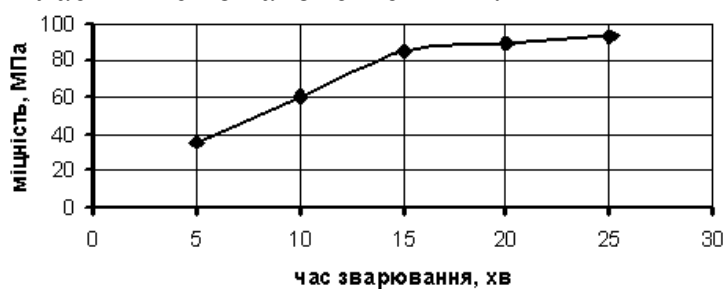
Рисунок 10 – Вплив кількості прошарків з алюмінію на міцність зварних з'єднань АД31+АД31, отриманих електроконтактним стиковим зварюванням опором на режимі:  $j = 300$  А/мм<sup>2</sup>;  $R_{зв} = 8$  МПа;  $t_{зв} = 0,5-0,7$  с.

6 тонких прошарків із алюмінієвої фольги. При цьому рівень деформації основного матеріалу не перевищує 2 %.

У шостому розділі досліджено можливість використання хімічної активації для прецизійного зварювання однорідних матеріалів. На прикладі зварювання алюмінію і його сплавів, що мають на своїй поверхні тугоплавку оксидну плівку, та вуглецевої сталі (сталь 45), що широко застосовується як конструкційний матеріал, було досліджено можливість використання хімічної активації поверхонь для прецизійного зварювання матеріалів.

Дослідження здатності до прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів із використанням хімічної активації. Відомо, що застосування рідкої фази дозволяє знизити тиск зварювання, скоротити час його дії, зменшити пластичні деформації у порівнянні зі зварюванням тиском без рідкого прошарку, а також активувати поверхні, що з'єднуються, за рахунок

відділення, диспергації та розчинення оксидних плівок. Однак через те, що рідкий прошарок може мати значну та нерівномірну товщину і здатний при цьому розчиняти значний об'єм основного металу, загальна величина осадки може мати значення, за якого завдання отримання прецизійного з'єднання ускладнюється. Тому актуальним є розроблення нової технології прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів із використанням проміжного хімічно активного прошарку з евтектичної суміші. Як матеріал для утворення евтектики був вибраний кремній, що обґрунтовано достатньо високою пластичністю такої евтектики.



*Рисунок 11 – Залежність міцності зварних з'єднань на зріз від часу зварювання, отриманих через алюмінієву фольгу, з напиленим шаром кремнію ( $T_{зв} = 850 \text{ K}$ ,  $P_{зв} = 10 \text{ МПа}$ )*

АМцМ товщиною 1 мм. Дослідження показали, що міцність зварних з'єднань практично не залежить від схеми зварювання (напилений шар кремнію з однієї чи з двох боків алюмінієвої фольги) і зі збільшенням часу зварювання підвищується (рис. 11). При часі зварювання 15–20 хвилин міцність зварних з'єднань досягає 90–92 МПа, що становить близько 90 % від міцності основного матеріалу на зріз. Недоліком цієї технології є необхідність попереднього вакуумного напилення кремнію на алюмінієву фольгу.

Тому на другому етапі дослідження нами було запропоновано використання суміші складу  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ , яка складається з кремнієвмісного рідкого матеріалу, що забезпечує легке та технологічне нанесення його на поверхні деталей, що з'єднуються. Як матеріал для дослідження використовували зразки з алюмінію марки АД00 та АМг5 розміром 8x8x10 мм. Технологічний процес з'єднання включає попереднє очищення з'єднуваних поверхонь, грубе механічне шабріння та знежирення поверхонь, нанесення композиції шляхом намазування на одну з них, складання деталей та їх фіксацію в нагрівачі вакуумної камери, створення розрідження  $10^{-2}\div 10^{-3}$  Па, нагрів до температури 853 К, прикладення питомого тиску 0,1 МПа протягом 90 с, пропускання електричного струму густиною 0,2 А/мм<sup>2</sup> (для інтенсифікації процесу видалення оксидної плівки), охолодження та вилучення виробу із камери.

Методом скануючої мікроскопії встановлено, що евтектична суміш, яка утворюється при виділенні вільного кремнію з композиції  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ , заповнює зазор у стику та забезпечує якісне формування зони з'єднання

На першому етапі дослідження прошарок з кремнію використовували у вигляді напиленого шару товщиною порядку 2 мкм на проміжний прошарок у вигляді алюмінієвої фольги товщиною 10 мкм як з однієї, так і з двох сторін. Температура зварювання в усіх випадках дорівнювала температурі утворення евтектики у системі Al–Si (850 К). Дослідження проведено на алюмінієвому сплаві марки

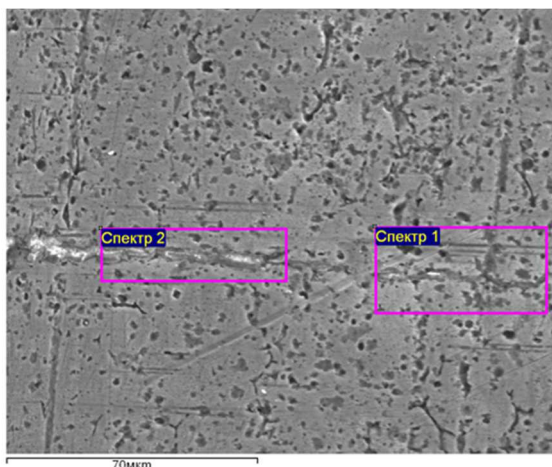


Рисунок 12 – Мікроструктура зони з'єднання  $AM_{25}+AM_{25}$  при зварюванні через суміш  $Na_2SiO_3-HCl-Mg$  (растрова електронна мікроскопія)

(рис. 12). На одержаних знімках мікроструктури зварних з'єднань бачимо окремі зони зрощування, що свідчать про проходження процесу дифузії. Методом енергодисперсійного аналізу визначено хімічний склад у контакті: Al – 97,62 %; Si – 0,26 %; Na – 0,59 %; Mg – 1,52 %. Встановлено, що при заданому термомодеформаційному режимі шов утворюється в результаті зрощування вершин кристалів та перехідних зон при майже повному видавлюванні рідкої фази із зони стику. Міцність з'єднань при випробуванні на зріз досягає 90 % міцності основного матеріалу при деформації виробу по висоті до 2 %.

Дослідження здатності до прецизійного зварювання тиском сталі 45

із використанням хімічної активації. З метою встановлення оптимальних режимів для дифузійного зварювання у вакуумі сталі 45 з умов забезпечення прецизійності було проведено дослідження по впливу питомого тиску на формування зварних з'єднань у вільному стані. Параметри процесу змінювали в таких інтервалах: температура зварювання – 1073-1473 К, питомий тиск стискання – 0,5-2 МПа, час зварювання – 20 хвилин. Дослідження з оцінки впливу параметрів процесу зварювання на величину пластичної деформації (по висоті) зразків показали, що при збільшенні температури та питомого тиску

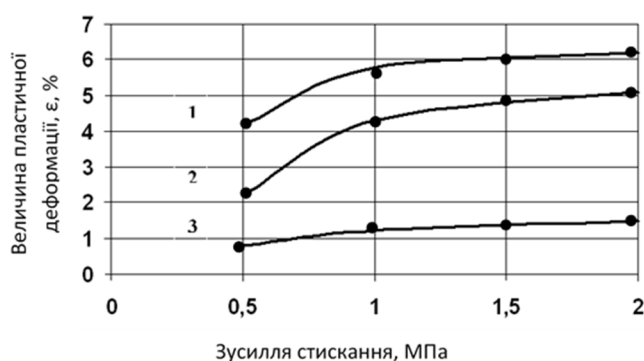


Рисунок 13 – Вплив питомого тиску і температури зварювання (1 – 1473 К, 2 – 1273 К, 3 – 1073 К) на відносний ступінь пластичної деформації зразків зі сталі 45

зварювання ступінь пластичної деформації зразків зростає від 0,8 % при  $T_{зв} = 1073$  К до 5,8 % при  $T_{зв} = 1473$  К (рис. 13).

Отримані експериментальні дані показують, що при збільшенні питомого тиску стискання вище 2 МПа і температури зварювання вище 1173 К спостерігається значне збільшення пластичної деформації зварних з'єднань. Тому далі дослідження проводили на режимах, коли деформація виробу становить  $\sim 1$  %: температура 1073 К, тиск не

більше 0,5-1,0 МПа, час зварювання 20 хвилин, тиск у камері  $10^{-2} \div 10^{-3}$  Па.

Досліджено вплив механічної обробки поверхонь зварюваних зразків (тонке шліфування та полірування) на якість зварних з'єднань (рис. 14). Встановлено, що при поліпшенні обробки поверхні у вигляді полірування якість зварних з'єднань помітно підвищується, однак лінія контакту також

спостерігається у вигляді світлої полоси, утворення якої, на наше переконання, пов'язано зі скупченням феритних зерен уздовж лінії з'єднання, що небажано для зварювання виробів відповідального призначення.



Рисунок 14 – Мікроструктура зони з'єднання зразка сталі 45 з попередньою обробкою поверхні тонким шліфуванням,  $x100$  (а) та поліруванням,  $x 125$  (б) (оптична мікроскопія)

Для усунення цього структурного дефекту було запропоновано вводити перед зварюванням у стик тонкий шар вуглеводневої суміші (Vaselineum), що являє собою суміш із мінерального мастила та твердих парафінів із температурою плавлення 300-333 К. Також для збільшення опору пластичній деформації проводили загартування сталі 45, що, на нашу думку, дозволяє підвищити прецизійність зварних з'єднань. Тож з урахуванням перерахованих факторів була розроблена наступна технологія зварювання: зразки з температури 1123 К загартовували у воду, а на поліровані поверхні зразків безпосередньо перед зварюванням наносили шар вуглеводневої суміші. Дослідження мікроструктури з'єднань, отриманих за запропонованою технологією на вказаних вище режимах, показало, що в такому випадку лінія з'єднання в стику не виявляється (рис. 15).



Рисунок 15 – Мікроструктура зварного з'єднання сталі 45 отриманого дифузійним зварюванням у вакуумі при попередньому загартуванні зразків у воду і застосуванні вуглеводневої суміші ( $x50$ ) (оптична мікроскопія)

У цьому розділі досліджено можливість використання наноструктурованих прошарків (багатошарової та пористої фольги) та м'яких прошарків для прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі.

*Багатошарові фольги.* В ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України розроблено технологію виготовлення наношаруватої фольги методом електронно-променевого випаровування та конденсації в вакуумі, які сприяють додатковій активації поверхонь, що зварюються. Тож спільно з ІЕЗ ім. Є. О. Патона було досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском різних матеріалів через такі багатошарові фольги. Дослідження ефективності використання багатошарової фольги проведено на парі вуглець-вуглецеві композиційні

матеріали (ВВКМ)+алюмінід титану (сплав Ti-48Al-2Nb-2Mn) та при зварюванні жароміцного сплаву на нікелевій основі.

Проведено серію експериментів по дифузійному зварюванню у вакуумі ВВКМ з алюмінідом титану напряму та з використанням багатошарової фольги *Ti/Ni* (Ti – 50,5 %; Ni – 49,5 %) та *Ti/Cu* (Ti – 48,32 %; Cu – 51,68 %) загальною товщиною до 20 мкм, при товщині окремих шарів до 30 нм. Зварювання проводили на режимах: температура зварювання 1373 К, навантаження 10 МПа, час зварювання 5 хвилин. Необхідно зазначити, що при зварюванні без проміжних прошарків з'єднання не утворюється. Застосування ж нанощаруватих фольг дозволило отримати нероз'ємні з'єднання (рис. 16).

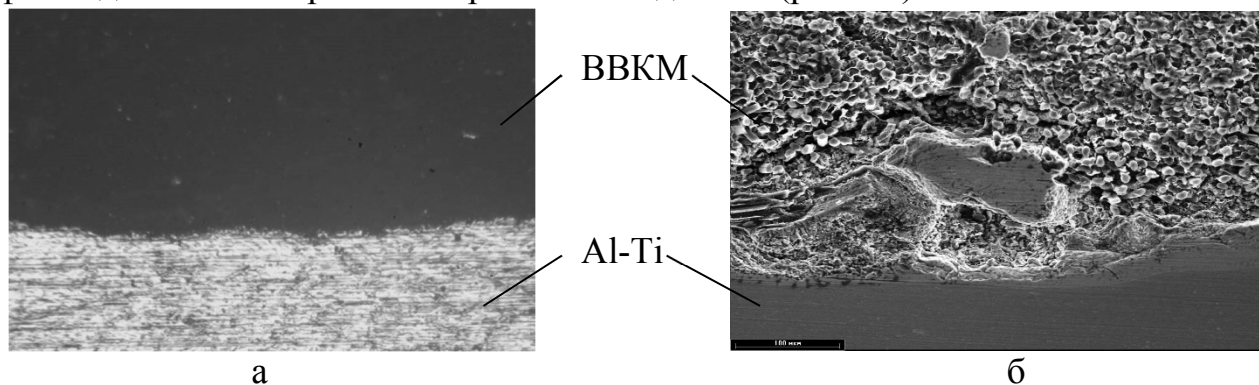


Рисунок 16 – Мікроструктура дифузійного з'єднання ВВКМ з алюмінідом титану через багатошарову фольгу *Ti/Ni* – а (оптична мікроскопія) та *Ti/Cu* – б (електронна мікроскопія)

З рис. 16 видно, що в результаті реакції в прошарку утворюється евтектична суміш, яка заповнює порожнини вуглецевого композиту та забезпечує якісне формування зони з'єднання з деформацією основних матеріалів не більше 1 %.

Відомо, що для дифузійного зварювання сплавів на основі нікелю використовують проміжний прошарок з нікелю, який дозволяє локалізувати пластичну деформацію та зруйнувати оксидні плівки за рахунок зсувних деформацій. Тому як проміжні прошарки при зварюванні жароміцного сплаву на нікелевій основі використовували багатошарові фольги Al/Ni (Ni – 86,68 %; Al – 13,32 %) загальною товщиною 30 мкм. Параметри процесу зварювання, виходячи з літературних даних, задавали в наступних діапазонах:  $T_{зв} = 1173-1473$  К,  $P_{зв} = 10-20$  МПа,  $t_{зв} = 5-20$  хв, вакуум у робочій камері –  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па.

Необхідно зауважити, як і у випадку зварювання ВВКМ, при зварюванні жароміцного сплаву на нікелевій основі без проміжних прошарків утворення загальних зерен в стику не виявлено – навіть при  $T_{зв} = 1473$  К в зоні з'єднання спостерігається значна кількість дефектів у вигляді суцільного ланцюжка пор і оксидних включень. Це можна пояснити низькою пластичністю жароміцного нікелевого сплаву, яка не дозволяє на заданому режимі забезпечити достатню деформацію приповерхневих шарів металу, і як наслідок неможливість утворити повний фізичний контакт. Дифузійне зварювання через багатошарову фольгу Al/Ni забезпечує формування зварного з'єднання з мінімальною кількістю дефектів. Мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що використання прошарку

системи Al-Ni сприяє активному протіканню в стику дифузійних процесів, що призводить до формування в стику дифузійної зони шириною  $\sim 30$  мкм.

*Пористі фольги.* Відомо, що одним із найбільш ефективних способів інтенсифікації процесу дифузійного зварювання є застосування проміжних ультрадисперсних порошків та прошарків, отриманих напиленням. Однак їх застосування має певні недоліки, що пов'язано з технологічними особливостями отримання частинок потрібної форми, дисперсності, властивостей прошарків та їх дозування при внесенні в стик при зварюванні. Тому нами був запропонований спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через суцільний прошарок у вигляді фольги, який отримується методом електронно-променевого випаровування та осадження з парової фази у вакуумі в парах галогенідів лужних металів (технологію виготовлення таких фольг розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України). Особливістю структури цієї фольги є наявність пористості на рівні 25-30 %. Цей спосіб дозволяє здійснювати дифузійне зварювання у вакуумі металевих матеріалів та отримувати якісні нероз'ємні з'єднання при температурі зварювання на 30-35 % меншій у порівнянні зі зварюванням без прошарку. Це має визначальне значення для прецизійного зварювання тиском, коли необхідно обмежувати температурний вплив, особливо при виготовленні деталей складної форми, з різномірних матеріалів. Встановлено, що при зварюванні сталі 12X18H9T через пористі фольги з нікелю з пористістю 30 % можна отримати якісні зварні з'єднання з міцністю на рівні основного матеріалу та знизити температуру зварювання при цьому з 1473 К до 1073 К.

Також спільно з ІЕЗ ім. Є. О. Патона було досліджено ефективність використання пористих фольг при дифузійному зварюванні тонколистового ( $\delta = 0,025$  мм) нікелевого сплаву Ni-Cr, отриманого методом порошкової металургії. Відомо, що зварювання фольг ускладнюється тим, що внаслідок

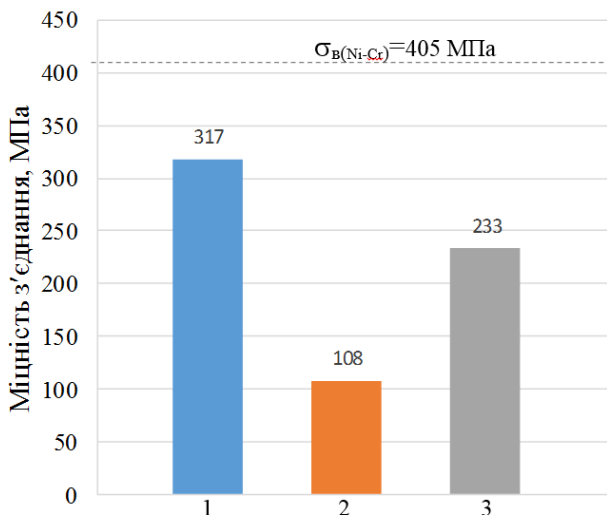


Рисунок 17 – Залежність міцності зварних з'єднань сплаву Ni-Cr, отриманих через пористий прошарок Cu (1), Ni (2), Co (3) на режимі:  $T_{зв} = 1473$  К,  $P_{зв} = 40$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв.

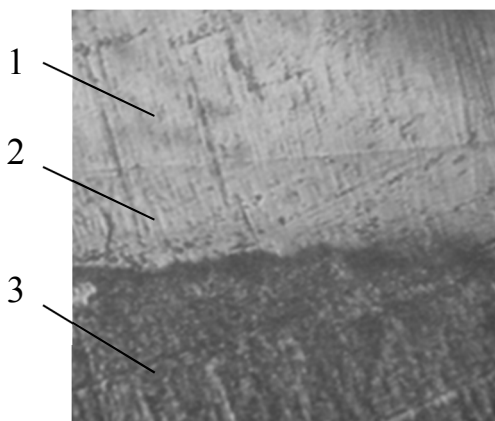
ефекту контактного зміцнення додатково зменшується пластичність тонких матеріалів. Цю проблему, на нашу думку, можна вирішити за допомогою пористих фольг. Зварювання зразків фольги нікелевого сплаву проводили через пористі фольги з Cu, Co, Ni товщиною 25-30 мкм та пористістю близько 13 %. Зварювання проводили на режимах:  $T_{зв} = 1473$  К,  $P_{зв} = 40$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв. Застосування пористого прошарку з міді при зварюванні сплаву дозволило отримати з'єднання нікелевого сплаву з міцністю 78 % від міцності основного матеріалу (рис. 17).

Зважаючи на те, що при зварюванні сплаву Ni-Cr на вказаних режимах напряду з'єднання отримати не вдалося, можна стверджувати, що

пористі фольги, отримані за технологією електронно-променевого випаровування і конденсації в вакуумі, сприяють активації поверхні та забезпечують формування зварних з'єднань при зварюванні тонколистового нікелевого сплаву.

Також нами було проведено оцінювання ефективності використання пористої фольги при зварюванні напівпровідникового матеріалу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з міддю, з'єднання яких на сьогодні використовуються при виготовленні термоелементів способами паяння, спільного пресування, напилення, гальванічного та хімічного нанесення комутаційних матеріалів. Ці способи мають недоліки і не можуть повною мірою задовольнити вимоги до якості нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною. Тому актуальною є розробка нового способу отримання нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною при виготовленні термоелементів. Основними вимогами до отримання нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з мідною комутуючою пластиною при виготовленні термоелементів є необхідність використання температури процесу з'єднання не більше 525-535 К, а пластична деформація матеріалів, що зварюються не повинна перевищувати 0,5-1 %. Крім цього, використання мідної комутації вимагає нанесення антидифузійних шарів, наприклад, для зменшення дифузії міді в термоелектричний матеріал товщина антидифузійного шару  $\text{Ni}$  не повинна бути меншою, ніж 150-200 мкм, що призводить до збільшення внутрішніх напружень, які послаблюють адгезію  $\text{Ni}$  до термоелектричного матеріалу.

Дослідження здатності до дифузійного зварювання напівпровідникового матеріалу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з міддю проводили напряму та через пористу фольгу з нікелю товщиною 40 мкм на наступних режимах: температура зварювання 523 К, час зварювання 40 хвилин та тиск 2 МПа обрали згідно аналізу літературних даних. На рис. 18 представлено мікроструктуру зварного з'єднання.



*Рисунок 18 – Перехідна зона зварного з'єднання  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з міддю отриманих через пористу фольгу з нікелю (оптична мікроскопія (x350): 1 – мідь; 2 – пористий нікель; 3 –  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$*

Механічні випробовування на зріз показали, що міцність зварного з'єднання отриманого напряму становить менше 5 МПа, а через пористу фольгу з нікелю – 10 МПа, що є достатнім для з'єднання такого типу (з'єднання даних матеріалів за допомогою паяння дає міцність 6-20 МПа, міцність зчеплення комутаційних шарів, отриманих плазмовим напиленням, з термоелектричним матеріалом знаходиться в межах 4,5-7,5 МПа). При цьому деформація напівпровідникового матеріалу складає менше 0,5 %. З метою обмеження дифузії міді в термоелектричний матеріал нами була запропонована нова схема отримання нероз'ємних з'єднань  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з міддю, що передбачає реалізацію двох етапів (рис. 19): 1 – створення бар'єрного шару з хрому безпосередньо в поверхневому шарі мідної комутаційної пластини методом іонної імплантації; 2 – дифузійне зварювання у вакуумі через пористу фольгу з нікелю.

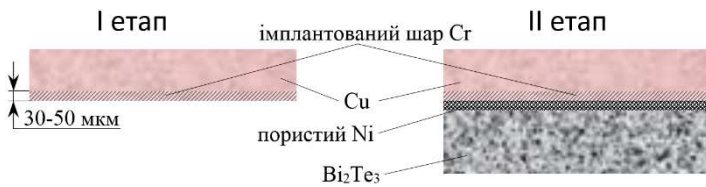


Рисунок 19 – Етапи отримання нероз'ємних з'єднань  $Bi_2Te_3$  з міддю

На основі проведених розрахунків встановлено, що антидифузійний шар хрому в поверхневому шарі міді товщиною 30-50 мкм буде гарантувати блокування дифузії міді в напівпровідник.

#### У восьмому розділі

досліджено можливість використання поверхневих фізико-хімічних процесів (ПФХП), що протікають самовільно, як засіб активації поверхонь, що зварюються, при обмеженні рівня пластичної деформації. Відомо, що внаслідок самовільно протікаючих ПФХП у стику при зварюванні різнорідних матеріалів може відбуватися процес автовакуумування, самоочищення від оксидних плівок та сублімації одного з матеріалів на поверхню іншого. Раніше нами вже було встановлено, що в стику в замкнених об'ємах при дифузійному зварюванні у вакуумі міді з хромом при нагріві протягом 15 хвилин при температурі 1223 К відбувається сублімація міді та її конденсація на поверхні хрому. Проте вплив конденсованого прошарку на утворення з'єднання не досліджено. У зв'язку з цим нами були проведені дослідження процесів, що відбуваються в зоні контакту при дифузійному зварюванні у вакуумі різнорідних матеріалів, та вплив цих процесів на прецизійне зварювання таких матеріалів. Усі дослідження проводили на з'єднаннях міді з тугоплавкими матеріалами та титаном. Літературний аналіз ПФХП, що відбуваються при нагріві титану та міді, показав можливість автовакуумування герметичних об'ємів за рахунок поглинання титаном кисню (873-913 К) і азоту (1273 К), очищення поверхонь металів від оксидних плівок (>973-1023 К) та сублімацію міді (1219 К). Відомо також, що молібден починає інтенсивно поглинати газу повітря при температурі вище 673 К. Дослідження топографії та структури сублімованих прошарків проводили у вакуумі та на повітрі за допомогою складеного зразка, що моделює герметичний зазор у контакті, при ДЗВ міді з титаном та тугоплавкими металами. Температуру нагрівання зразка змінювали для пари мідь-молібден від 1073 до 1273 К, для пари мідь-титан – від 873 до 1143 К при витримці протягом 30 хвилин. Після охолодження елементи зразка відокремлювали один від одного й досліджували внутрішні поверхні.

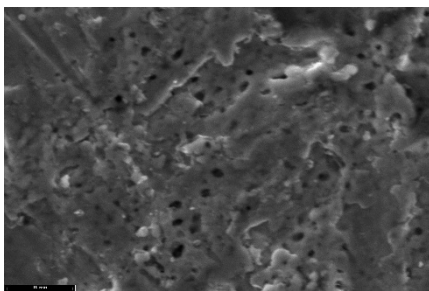
*Пара мідь-титан.* При температурі вище 1073 К на поверхні міді внаслідок сублімації утворюється конденсат титану, про що свідчить топографія поверхні міді (рис. 20, а) і результати мікрорентгеноспектрального аналізу поверхні міді, який показав, що концентрація титану на міді знаходиться в межах від 4-7 %.

*Пара мідь-молібден.* При температурі вище 1223 К на поверхні молібдену внаслідок сублімації утворюється конденсат міді у вигляді часток розміром 1,5-2 мкм (рис. 20, б).

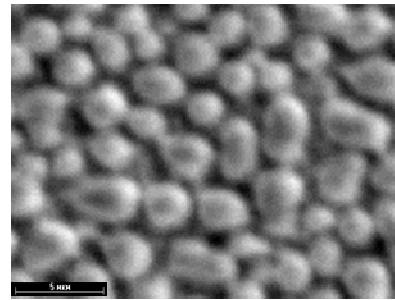
Необхідно зазначити, що результати експериментів аналогічні, незалежно від того чи нагрівання зразків відбувалось у вакуумі, чи на повітрі, що підтверджує факт герметизації об'ємів при незначних зусиллях стискання, а також явище їх автовакуумування. Також був проведений експеримент у вакуумній камері з одержання конденсату міді на хромі та молібдені, а також титану на міді коли не



було герметичності об'єму, тобто розрядження в об'ємі відповідало розрядженню в робочій камері ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Па). Встановлено, що у випадку нагрівання у вакуумі негерметичних об'ємів час необхідний для утворення сублімованих прошарків з одного з контактуючих металів зменшується в 3-4 рази і становить 1-3 хвилини, незалежно від природи іншого металу. Цей факт дає змогу стверджувати, що існує можливість створення проміжних прошарків при ДЗВ різнорідних металів, якщо один із них при температурі зварювання має здатність сублімувати. Для вивчення впливу конденсату на міцність зварних з'єднань міді з тугоплавкими металами та міді з титаном було проведено ДЗВ за трьома варіантами: 1 – через конденсований шар отриманий за рахунок сублімації; 2 – через конденсований шар отриманий термічним вакуумним розпиленням; 3 – напряму, тобто при відсутності прошарків.



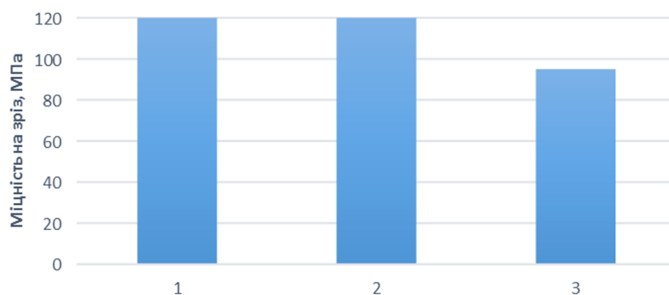
а



б

*Рисунок 20 – Топографія поверхні міді (а) після витримки зразка мідь-титан протягом 30 хвилин при температурі 1123 К (x2000) та поверхні молибдену (б) після нагрівання зразка мідь-молибден при температурі 1223 К протягом 20 хвилин (x3000) (растрова електронна мікроскопія)*

*Пара мідь-тугоплавкі метали.* Попередньо на поліровану поверхню зразків із хрому шляхом сублімації у вакуумі при температурі нагрівання 1223-1233 К протягом 3-5 хвилин та вакуумним термічним розпиленням наносили шар міді товщиною до 3-5 мкм. Щоб уникнути проходження сублімаційних процесів безпосередньо в процесі зварювання, температура зварювання була в межах 1183-1193 К. Тиск зварювання (22-24 МПа) та час (20-25 хвилин) вибрали згідно з



*Рисунок 21 – Міцність на зріз хром-мідних з'єднань, отриманих ДЗВ через мідний прошарок отриманий вакуумним термічним розпиленням з рідкої фази (1), внаслідок сублімації міді (2) та без прошарку (3)*

рекомендованими нами раніше режимами зварювання хрому з міддю. Механічні випробування зварних з'єднань на зріз показали, що міцність хром-мідних з'єднань через шар міді, отриманий як унаслідок сублімації, так і за рахунок термічного вакуумного

розпилення із рідкої фази, на 20 % більше міцності з'єднань, отриманих безпосередньо напряму (рис. 21) та більше міцності міді (110 МПа). Аналогічні результати були отримані й при зварюванні міді з молибденом.

*Пара мідь-титан.* Відомо, що дифузійне зварювання титану ВТ1 з міддю виконують на режимі: температура зварювання 1123 К, тиск зварювання 5 МПа, час зварювання 10 хвилин. Для проведення експерименту був обраний наступний режим: тиск зварювання 5 МПа, час зварювання 10 хвилин, а температура зварювання 1023 К. Зменшення температури до 1023 К пояснюється запобіганням утворення конденсату титану на поверхні міді відповідно до отриманих даних. Результати механічних випробувань показали, що міцність зварних з'єднань титану з міддю, отриманих через конденсат титану, на 15-20 % більше міцності з'єднань, отриманих безпосередньо напругу й становить 85-90 МПа. Необхідно зауважити, що зважаючи на обраний згідно з літературними даними тиск зварювання, деформація основних матеріалів при цьому становила більше 5 %.

Умови проведення експерименту, коли спочатку створювали проміжні шари, а потім проводили зварювання, не дозволили повною мірою оцінити ефективність використання сублімованих прошарків, у зв'язку з тим, що сублімовані прошарки при цьому встигають окислитись. Отже, нами було запропоновано новий технологічний процес ДЗВ через сублімовані прошарки, який передбачає збирання заготовок, що зварюються, у вакуумній камері з використанням спеціальної оснастки, нагрів заготовок у розведеному стані для створення сублімаційних прошарків та безпосередньо процес ДЗВ на режимах: *мідь-тугоплавкі метали (молібден, хром):*  $T_{зв}=1223-1243$  К, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1-2 хв;  $t_{зв}=10$  хв;  $P_{зв}=1-2$  МПа; *мідь-титан:*  $T_{зв}=1123$  К, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1-2 хв;  $t_{зв}=10$  хв; тиск зварювання 2-3 МПа. Тиск зварювання був вибраний за допомогою розробленої методики (розділ 3) з метою мінімізації пластичної деформації. Необхідно підкреслити, що з урахуванням розміру сублімованих частинок (товщини конденсованого прошарку) порядку 2 мкм, поверхні перед зварюванням полірували до 7-го класу шорсткості. Характерний вид зварних з'єднань, отриманих на вказаних режимах, представлено на рис. 22.

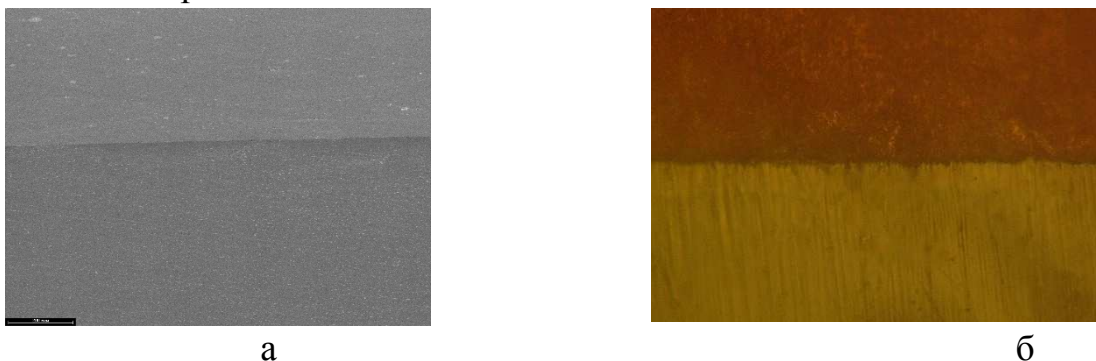


Рисунок 22 – Мікроструктура зони з'єднання мідь-молібден (а) (растрова електронна мікроскопія); мідь-титан (б) (оптична мікроскопія) (x100)

Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах не перевищує 1 %, що відповідає вимогам прецизійності. Механічні випробування на зріз показали, що міцність зварних з'єднань міді з молібденом та хромом при цьому становить 95-100 МПа, що складає 85-90 % від

міцності основного матеріалу (міді). Міцність з'єднань міді з титаном становила 80-85 МПа, що становить 73-77 % міцності міді (110 МПа).

Літературний аналіз можливих ПФХП при зварюванні тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів, а також отримані експериментальні дані щодо використання таких процесів як засобу активації поверхонь, дозволив нам запропонувати модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні в твердій фазі за розробленою технологією за рахунок проходження наступних стадій: 1 – самоочищення поверхні від оксидних плівок на стадії попереднього нагріву заготовок у вакуумі у розведеному стані, що призводить до дисоціації, відновлення або розчинення оксидів); 2 – сублимація одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхні іншого; 3 – утворення на стадії стиснення зразків хімічних зв'язків та формування зони об'ємної взаємодії (рис. 23).

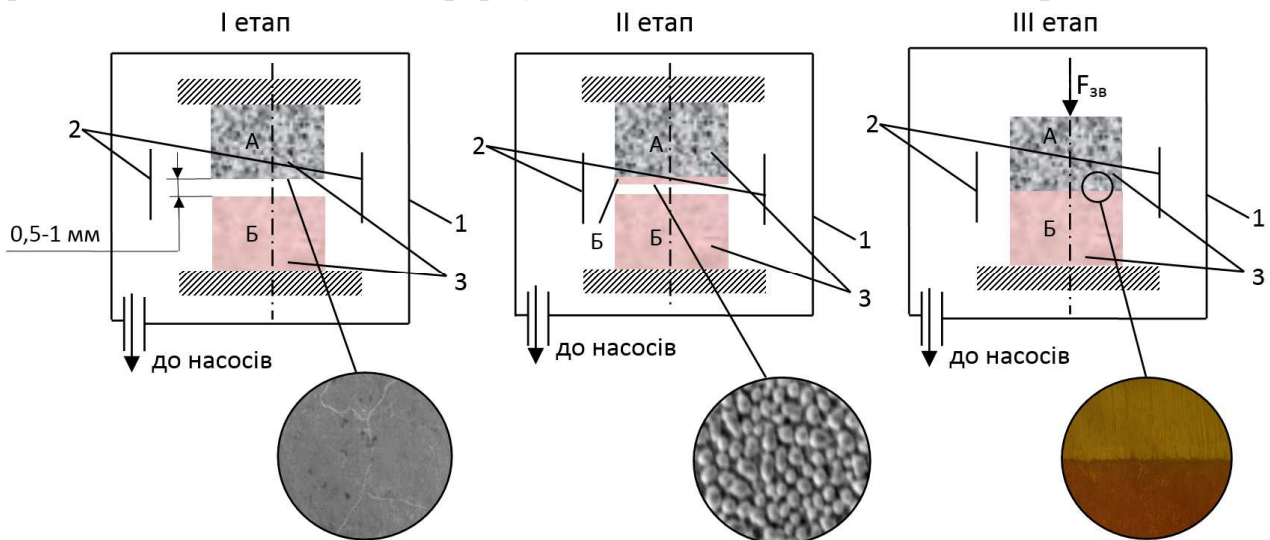
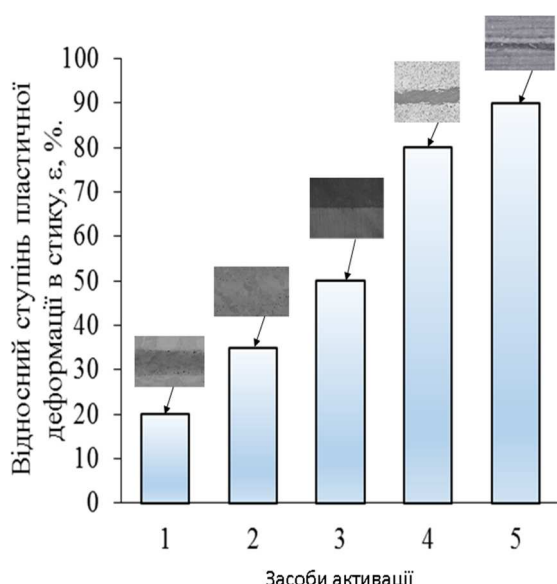


Рисунок 23 – Стадії формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском у твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів:

1 – вакуумна камера; 2 – нагрівач; 3 – деталі, що зварюються

У дев'ятому розділі розглянуто технологічні аспекти та рекомендації з практичного використання запропонованих засобів активації поверхонь для прецизійного зварювання різних матеріалів. Встановлено вплив засобів активації на ступінь пластичної деформації в стику (рис. 24) та показано, що найбільш оптимальним для прецизійного зварювання тиском однорідних матеріалів є застосування хімічно активних шарів, які забезпечують утворення якісних нероз'ємних з'єднань за рахунок хіміко-механічної активації поверхонь. Вибір засобу активації для прецизійного зварювання різнорідних матеріалів залежить від фізико-хімічних та механічних властивостей матеріалів, які з'єднуються.



- 1 – наноструктуровані багатошарові фольги
- 2 – наноструктуровані пористі фольги
- 3 – сублімовані прошарки
- 4 – перфоровані прошарки з використанням локалізації енергії в стику
- 5 – хімічно-активовані шари

Рисунок 24 – Вплив засобу активації на рівень пластичної деформації в стику при прецизійному зварюванні тиском

На підставі отриманих результатів досліджень створено методологію управління процесом перетворення ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину при прецизійному зварюванні тиском, яка полягає, насамперед, у застосуванні відповідних додаткових засобів активації для кожної конкретної пари матеріалів, виборі оптимальних режимів зварювання та безпосередньо процесі зварювання тиском із обмеженням пластичної деформації основного матеріалу. Рекомендовано для прецизійного зварювання тиском використовувати: *модифікацію поверхневих шарів* – для металевих матеріалів, що суттєво відрізняються за своїми фізико-хімічними та механічними властивостями; *локалізацію теплової та механічної енергії в стику* – для металевих матеріалів з високою тепло та електропровідністю та твердих матеріалів при нагріві імпульсом струму; *хімічну активацію поверхонь* – для матеріалів, які мають на своїй поверхні тверді та тугоплавкі оксидні плівки; *пористі та багатошарові прошарки* – для зварювання важкодеформуємих матеріалів, фольг та різнорідних матеріалів; *поверхневі фізико-хімічні процеси, що протікають самовільно* – при зварюванні різнорідних металевих матеріалів, один з яких здатний до сублімації.

На основі проведених досліджень була розроблена типова загальна технологія отримання прецизійних нероз'єднаних з'єднань зварюванням тиском (рис. 25).

Основною умовою реалізації прецизійної технології є активація поверхонь у процесі зварювання за рахунок різних засобів вказаних вище. Оптимальні параметри режиму зварювання конкретних прецизійних вузлів визначаються залежно від властивостей матеріалів, які зварюються, від засобів активації поверхонь, які використовуються при зварюванні, а також від допустимого рівня деформації основних матеріалів. Тому основними етапами типової загальної технології прецизійного зварювання тиском є: 1 – підготовка поверхонь перед зварюванням (механічна обробка, модифікація поверхні); 2 – збирання деталей через хімічно активні шари, проміжні наноструктуровані прошарки, ультратонкі евтектичні фольги або прошарки з матеріалу, що зварюються; 3 – попередня термообробка зразків (за необхідності при дифузійному зварюванні у вакуумі) для забезпечення проходження ПФХП (адсорбція, розчинення, очищення від оксидних плівок, сублімація, конденсація) при дифузійному зварюванні; 4 – зварювання тиском (дифузійне або електроконтактне) на оптимальному режимі.

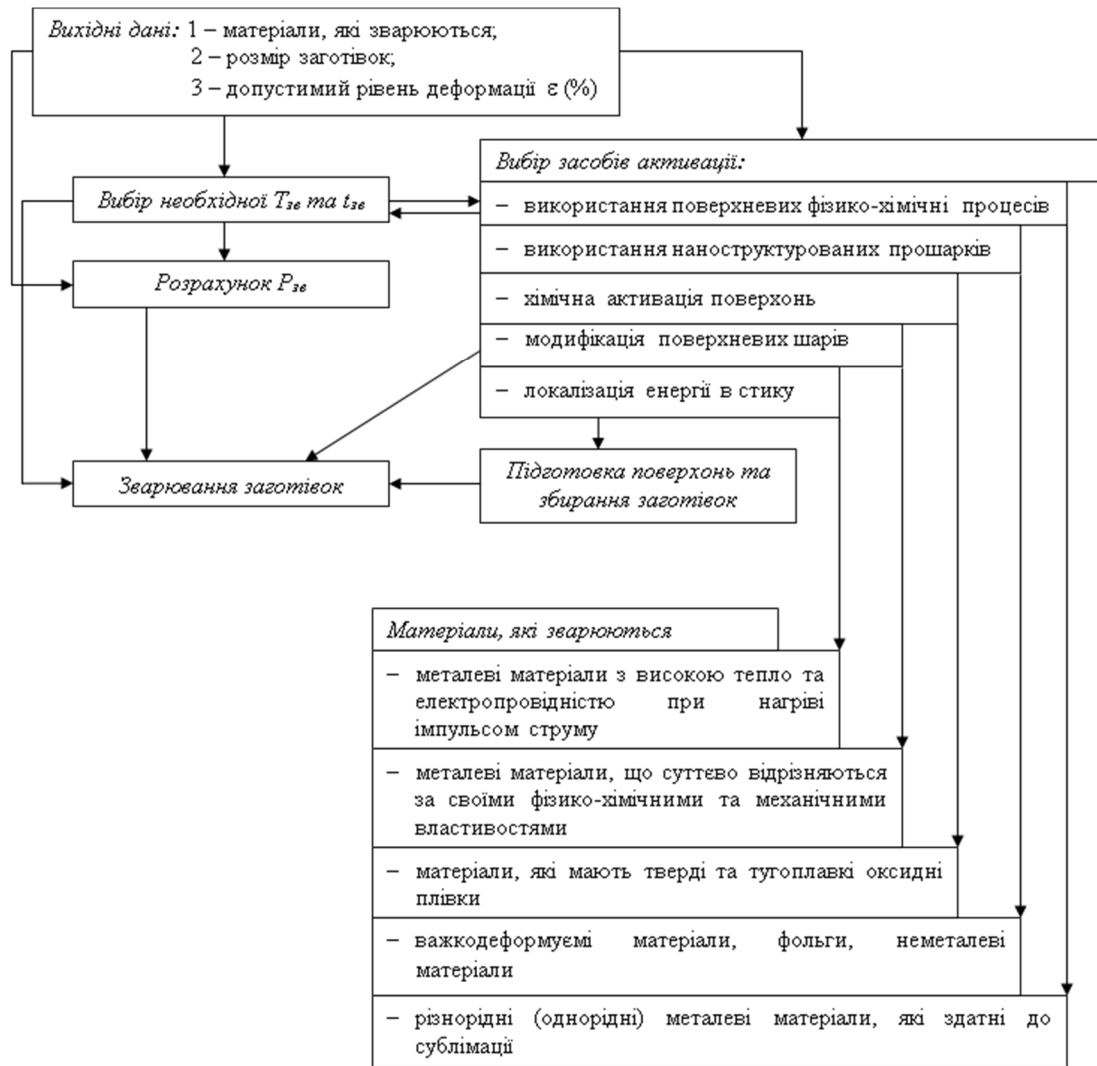
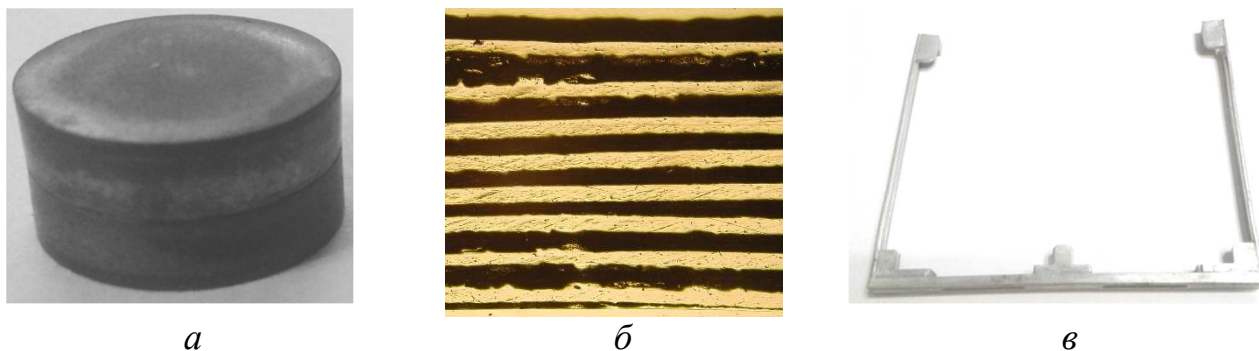


Рисунок 25 – Схема типової загальної технології отримання прецизійних нероз'єднаних з'єднань

На підставі отриманих результатів було розроблено і реалізовано на підприємствах України низку технологій зварювання тиском.

Для Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (м. Київ) розроблено технологію зварювання тиском алмазно-твердосплавних пластин із твердим сплавом (рис. 26, а), що використовується при виготовленні ріжучого інструменту. Для локалізації теплової та механічної енергії в стику використовували електродне зварювання через перфоровані прошарки з титану за допомогою спеціалізованого оснащення з наступним дифузійним відпалом. Міцність отриманих з'єднань на 40-45 % більше міцності паяних з'єднань.

Для державного науково-випробувального центру Збройних Сил України (м. Чернігів) розроблено технологію виготовлення композитних високоміцних пластин на основі інтерметаліду – алюмініду титану. Застосування при дифузійному зварюванні алюмінію з титаном поверхневих фізико-хімічних процесів (автовакуумування, розчинення, відновлення, змочування), дозволяє забезпечити отримання якісних з'єднань фольг вказаних металів, а наступна термічна обробка – утворення високоміцних інтерметалідних шарів (рис. 26, б).



*Рисунок 26 – Видгляд зварних з'єднань, які отримано за типовою загальною технологією прецизійного зварювання тиском: а – вузол алмазно-твердосплавної пластини збільшеної висоти, шляхом з'єднання з твердим сплавом; б – багатошарове зварне з'єднання титану з алюмінієм ( $\times 120$ , оптична мікроскопія); в – корпусний вузол спеціального призначення з алюмінієвого сплаву АМцМ*

Для ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів» (м. Чернігів) розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі через проміжний хімічно активний прошарок для виготовлення прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення з алюмінієвого сплаву АМцМ (рис. 26, в). Конструкція вузлів не допускає короблення стінок, що визначає необхідність активації поверхні алюмінію та видалення оксидної плівки за рахунок рідкого металевого прошарку Al-Si. Дослідження зварних з'єднань показали, що розроблена технологія зварювання забезпечує отримання міцності вузлів на рівні 90 % від міцності основного матеріалу, при величині відносної деформації порядку 2 %. Цю технологію прецизійного зварювання, на прикладі сплавів АД00 та АМг5, було також апробовано під час дослідно-виробничої перевірки на ДП «Харківське державне авіаційне виробниче підприємство», за результатами якої підтверджено можливість застосування розробленого технологічного процесу в авіабудівній галузі.

Крім цього, результати дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес. На розроблені технології зварювання отримані акти дослідно-експериментальної перевірки з'єднань на відповідність умовам експлуатації.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Отримали подальшого розвитку теоретичні основи твердофазного з'єднання. Розроблені наукові основи та закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском. Встановлено, що основною вимогою для забезпечення прецизійності є перетворення в процесі зварювання ультратонкого поверхневого шару в пластичний стан або рідину за рахунок локалізації енергії в стику, модифікації поверхонь, використання проміжних наноструктурованих прошарків, хімічно активних шарів. Встановлено ефективність використання: *модифікації поверхневих шарів* – для металевих матеріалів, що суттєво відрізняються за своїми фізико-хімічними та механічними властивостями; *локалізації теплової та механічної енергії в стику* – для металевих матеріалів з високою тепло та електропровідністю та твердих матеріалів при нагріві імпульсом струму; *хімічної активації поверхонь* – для матеріалів, які мають на своїй поверхні тверді та тугоплавкі оксидні плівки; *пористих та*

*багатошарових прошарків* – для зварювання важкодеформувальних матеріалів, фольг та різномірних матеріалів; *поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно* – при зварюванні різномірних металевих матеріалів, один з яких здатний до сублімації.

2. Розроблено математичну модель спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності та повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків з конкретного металу при їх зварюванні тиском, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати оптимальний режим зварювання ( $T_{зв}$ ,  $P_{зв}$  та  $t_{зв}$ ). Розроблено методику розрахунку, що дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється; температуру нагріву; допустимий рівень деформації основного матеріалу; отримувати: максимально можливий тиск та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації. За результатами проведених численних експериментів побудовані діаграми, що дозволяють при різних температурах зварювання визначати оптимальне співвідношення тиску і часу витримки для досягнення необхідного рівня деформації матеріалів, що з'єднуються. Порівняльний аналіз експериментальних даних та даних отриманих за допомогою розробленої методики показав збіг результатів на 90 %.

3. Отримало подальшого розвитку питання модифікації поверхневих шарів металів низько енергетичною іонною обробкою. Встановлено доцільність для прецизійного зварювання тиском модифікації поверхневих шарів металів низько енергетичною іонною обробкою в плазмі тліючого розряду. Показано, що при дифузійному зварюванні різномірних металевих матеріалів наявність модифікованого поверхневого шару сприяє збільшенню ширини дифузійної зони при зварюванні у 1,5-2 рази та підвищенню міцності зварного з'єднання на 15-40 %. Вдосконалено технологію зварювання тиском міді з молібденом та хромом з використанням модифікованих іонною обробкою прошарків.

4. Розроблено новий спосіб зварювання тиском через прошарок, який дозволяє локалізувати температурний і деформаційний вплив на вузьку приконтатну зону. Встановлено, що застосування перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір дозволяє додатково локалізувати температурне поле та інтенсифікувати мікропластичну деформацію у стику при нагріві імпульсом струму. Показано, що при використанні проміжного прошарку з титану, температура в контакті твердих сплавів у 2 рази більше, ніж при електроконтактному нагріві твердих сплавів напряму, при інших рівних умовах. Визначені оптимальні параметри режиму зварювання в твердій фазі вольфрамокобальтових твердих сплавів з нагрівом імпульсом струму:  $j = 330-350 \text{ А/мм}^2$ ,  $\tau = 0.10-0.12 \text{ с}$ ,  $P = 8-10 \text{ МПа}$ , зварювання на яких забезпечує міцність зварного з'єднання на рівні 480 МПа, що на 30-35 % перевищує міцність паяних з'єднань. Встановлено, що дифузійний відпал підвищує міцність з'єднань на 15 % у порівнянні з міцністю після електроконтактного зварювання.

5. Запропоновано модель утворення зварюваного з'єднання твердих сплавів через перфорований прошарок титану. Модель припускає проходження двох етапів: на 1-му етапі при електроконтактному нагріві відбувається пластична деформації прошарку на рівня 70-80 %, поверхні схоплюються за рахунок фізичної та хімічної взаємодії; на 2-му етапі при термообробці

відбувається рекристалізація матеріалу прошарку, релаксація залишкових напружень та збільшення зони об'ємної взаємодії.

6. Вперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику та активації поверхонь при електроконтактному зварюванні є використання тонких прошарків зі зварювального матеріалу. Розроблено новий засіб активації поверхонь при електроконтактному точковому та стиковому зварюванні опором. Встановлено, що застосування проміжних тонких прошарків із зварювального матеріалу при електроконтактному зварюванні дозволяє локалізувати теплову енергію в стику та підвищити прецизійність зварних з'єднань. Показано, що міцність зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів, отриманих електроконтактним точковим та стиковим зварюванням опором на оптимальному режимі через проміжний багат шаровий прошарок із алюмінію, становить 95-100 % міцності основного металу. При цьому деформація основного матеріалу не перевищує 2 % товщини деталі.

7. Отримало подальшого розвитку дослідження процесу хімічної активації поверхонь. Вдосконалено технологічний процес видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні за рахунок використання нових засобів створення рідких металевих прошарків Al-Si. Встановлено, що видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні відбувається при змочуванні контактуючих поверхонь рідким металевим прошарком Al-Si, що виникає при виділенні вільного Si при попередньому введенні в контакт суміші складу  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$  або у вигляді напиленого шару Si на алюмінієву фольгу.

8. Розроблено спосіб дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів з використанням проміжного хімічно активного прошарку, який дозволяє отримати з'єднання деталей з алюмінію та його сплавів з міцністю при випробуванні на зріз, що становить 90 % від міцності основного матеріалу, при величині відносної деформації близько 2 %.

9. Розроблено новий метод хімічної активації поверхонь та технологічні рекомендації щодо його застосування для прецизійного зварювання тиском вуглецевих сталей. Уперше встановлено, що отримання прецизійного зварного з'єднання ( $\epsilon \leq 1\%$ ) при зварюванні тиском у твердій фазі сталі 45 визначається механічною підготовкою поверхонь, що стикуються, параметрами процесу (температура, тиск і час) і наявністю проміжного шару вуглеводневої суміші, що наноситься до зварювання на поверхні.

10. Встановлено ефективність використання багат шарової та пористої фольги при зварюванні важкодеформувальних та напівпровідникових матеріалів. Показано, що при дифузійному зварюванні у вакуумі вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу з алюмінідом титану та жароміцного нікелевого сплаву використання багат шарових фольг Ti/Ni, Ti/Cu та Al/Ni, відповідно, забезпечує формування якісних зварних з'єднань, коли у випадку зварювання цих матеріалів на пряму з'єднання взагалі не утворюється.

11. Розроблено спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через суцільний прошарок у вигляді фольги з пористістю 15-30 %. Встановлено, що використання пористої фольги дозволяє зменшити температуру зварювання на



30-35 % у порівнянні зі зварюванням без прошарку, що має визначальне значення для прецизійного зварювання тиском. Показано, що застосування пористого прошарку з міді при зварюванні сплаву жароміцного нікелевого сплаву дозволяє отримати з'єднання з міцністю 78 % від міцності основного матеріалу. Показано, що міцність зварного з'єднання напівпровідникового матеріалу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з міддю отриманого через пористу фольгу з нікелю становить 10 МПа, що в 2 рази більше у порівнянні зі з'єднаннями, отриманими напряму.

12. Отримало подальшого розвитку дослідження поверхневих фізико-хімічних процесів (адсорбція, автовакуумування, розчинення, самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація). Встановлено ефективність використання поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно, як засіб активації поверхонь, що зварюються при обмеженні рівня пластичної деформації. Показано, що у випадку нагрівання у вакуумі негерметичних об'ємів, час необхідний для утворення сублімованих прошарків з одного з контактуючих металів зменшується до 1-3 хвилин, незалежно від природи іншого металу. Встановлено, що міцність зварних з'єднань, отриманих із застосуванням сублімованих прошарків, на 15-20 % більше міцності з'єднань, зварених безпосередньо напряму.

13. Розроблено новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублімовані активні прошарки, що передбачає попередній нагрів заготовок у розведеному стані для створення сублімаційних прошарків та безпосередньо процес дифузійного зварювання. Показано, що міцність зварних з'єднань, отриманих за цією технологією, міді з молібденом та хромом становить 91-95 % від міцності основного матеріалу, а міді з титаном – 73-77 %. При цьому деформація основних матеріалів не перевищує 1 %.

14. Запропоновано модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні в твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів за рахунок проходження наступних стадій: 1 – самоочищення поверхні від оксидних плівок на стадії попереднього нагріву заготовок у вакуумі у розведеному стані (унаслідок дисоціації, відновлення та розчинення оксидів); 2 – сублімація одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхні іншого; 3 – утворення на стадії осадки хімічних зв'язків та формування зони об'ємної взаємодії.

15. Розроблено типову загальну технологію отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань металевих матеріалів зварюванням тиском, яка включає: розрахунок параметрів зварювання за допомогою розробленої методики, вибір та застосування одного з засобів активації поверхонь та безпосередньо процес зварювання. На основі результатів проведених досліджень розроблено і реалізовано на підприємствах України низку технологій дифузійного та електроконтактного зварювання, які забезпечили отримання зварних з'єднань, які задовольняють технологічним вимогам виробництва, що підтверджено актами дослідно-промислової перевірки.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

*Статті у наукових фахових виданнях та виданнях, внесених до наукометричних баз даних:*

- [1] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, М. М. Руденко, та **О. О. Новомлинець**, «Зварювання тиском титану з алюмінієм (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 21, С. 101–106, 2004. [фахове видання] (0,5 друк.арк.)
- [2] Ю. Е. Николаенко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, и **О. А. Новомлинец**, «Сварка давлением с нагревом в вакууме титана с медью в технологии изготовления тепловых труб», *Технологические системы*, № 2 (22), С. 56–59, 2004. [фахове видання] (0,2 друк.арк.)
- [3] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, Ю. В. Фальченко, та **О. О. Новомлинець**, «Зварювання тиском алюмінію з міддю (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 81–90, 2005. [фахове видання] (0,45 друк.арк.)
- [4] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, Д. М. Демиденко, та Ю. В. Фальченко, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних хром-мідних з'єднань», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 91–93, 2005. [фахове видання] (0,15 друк.арк.)
- [5] **О. О. Новомлинець**, І. М. Крапивний, та Ю. В. Фальченко, «Зварювання тиском алюмінієвих сплавів через рідкі евтектичні прошарки», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 26, С. 105–107, 2006. [фахове видання] (0,2 друк.арк.)
- [6] Ю. В. Фальченко, А. І. Устінов, В. Є. Федорчук, Г. К. Харченко, та **О. О. Новомлинець**, «Особливості зварювання у твердій фазі алюмінідів титану з вуглець-вуглецевим композиційним матеріалом», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 34, С. 133–137, 2008. [фахове видання] (0,25 друк.арк.)
- [7] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, та В. В. Свириденко, «Дифузійне зварювання вольфрам кобальтових твердих сплавів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, №. 40, С. 14–17, 2009. [фахове видання] (0,2 друк.арк.)
- [8] І. О. Дудла, Т. В. Ганєєва, та **О. О. Новомлинець**, «До питання щодо використання алюмінію і його сплавів та проблеми їх зварювання (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 42, С. 156–161, 2010. [фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [9] Е. В. Половецкий, Л. М. Капитанчук, и **О. А. Новомлинец**, «Влияние толщины промежуточной прослойки на структуру и свойства сварных соединений сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6 способом диффузионной сварки в вакууме», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 1 (63), С. 131–138, 2013. [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,4 друк.арк.)

- [10] Е. В. Половецкий, **О. А. Новомлинець**, А. В. Лабарткава, М. В. Матвиенко, К. К. Трунин, и В. А. Мартыненко, «Исследование возможности применения принудительной схемы деформирования при диффузионной сварке сплавов АМГ6 и ВТ6», *Вісник НУК імені адмірала Макарова*, № 2, 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://evn.nuos.edu.ua>. [електронне фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [11] **О. О. Новомлинець**, І. В. Завальна, та Є. В. Половецкий, «Особливості отримання нероз'ємних з'єднань у процесі виготовлення термоелементів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 4 (69), С. 82–90, 2013. [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,4 друк.арк.)
- [12] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, та Є. В. Половецкий, «Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 2 (73), С. 104–111, 2014. [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,4 друк.арк.)
- [13] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та В. О. Мартиненко, «Дослідження деформаційної кінетики алюмінію при високих температурах», *Технічні науки та технології*, № 2 (2), С. 67–72, 2015. [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [14] V. F. Mazanko, Н. К. Kharchenko, Т. R. Hanieiev, **О. О. Novomlynets**, and I. V. Zavalna, «The distinctive features of diffusive interaction of copper and molybdenum at pressure welding through the layers modified by ion-beam processing», *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 37, вип. 2, С. 233–241, 2015. [міжнародні наукометричні бази даних Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, Eigenfactor score, Fiz Karlsruhe, INSPEC, EBSCO, Pascal, ВИНТИ, eLIBRARY, Джерело, MedSci, фахове видання] (0,4 друк.арк.)
- [15] Е. В. Половецкий, **О. А. Новомлинець**, А. В. Лабарткава, В. А. Мартыненко, и М. В. Матвиенко, «Диффузионные и рекристаллизационные процессы при диффузионной сварке в вакууме сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6», *Збірник наукових праць НУК*, № 3, С. 34–40, 2015. [міжнародні наукометричні бази даних eLIBRARY, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,35 друк.арк.)
- [16] Ю. Фальченко, Л. Петрушинець, А. Устінов, Т. Мельниченко, **О. Новомлинець**, та І. Гусарова, «Дифузійне зварювання в вакуумі тонколистового нікелевого сплаву», *Технічні науки та технології*, № 4 (6), С. 87–98, 2016. [фахове видання] (0,6 друк.арк.)
- [17] В. Мазанко, **О. Новомлинець**, С. Олексієнко, та С. Ющенко, «Дослідження процесів масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію», *Технічні науки та технології*, № 2 (8), С. 75–81, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [18] Л. Петрушинець, Ю. Фальченко, А. Устінов, Т. Мельниченко, та **О. Новомлинець**, «Дифузійне зварювання у вакуумі жароміцного сплаву на Ni основі», *Технічні науки та технології*, № 3 (9), С. 63–73, 2017.

[міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,3 друк.арк.)

- [19] О. В. Махненко, О. А. Великоіваненко, О. С. Міленін, Ю. В. Фальченко, та **О. О. Новомлинець**, «Методика розрахунку режимів зварювання тиском для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань», *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, № 5 (235), С. 111–116, 2017. [фахове видання] (0,4 друк. арк.)
- [20] Ю. В. Фальченко, **О. О. Новомлинець**, Л. В. Петрушинець, та І. В. Нагорна, «Основи використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 54–66, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,9 друк.арк.)
- [21] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, «Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 67–76, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,5 друк. арк.)

**Статті у наукових періодичних фахових виданнях інших держав:**

- [22] Y. Falchenko, and **O. Novomlynets**, «Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes», *Collection of Scientific Papers: Information, Technologies, Management and Society*, Riga, Latvia, № 4 (12), P. 184-191, 2015. (0,3 друк.арк.)
- [23] Y. Falchenko, **O. Novomlynets**, and E. Polovetskyi, «Special features of precision pressure welding of carbon steel with chemical activation of surfaces», *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, № 6, P. 65-70, July, 2016. (0,35 друк.арк.)
- [24] Y. Falchenko, and **O. Novomlynets**, «Precision low temperature pressure welding of solid alloys», *Modern Science - Moderní věda*, Praha, Ceska Republika, № 1, (P. II), P. 56-62, 2017. (0,7 друк.арк.)
- [25] Y. Falchenko, **O. Novomlynets**, I. Prybytko, and M. Rudenko, «The investigation of strain-tension state and diffuse interaction under the pressure welding of cutting alloy», *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, № 8, P. 95-101, July, 2017. (0,4 друк.арк.)

**Опубліковані праці апробаційного характеру:**

- [26] **О. О. Новомлинець**, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних з'єднань», на *III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005, С. 124. (0,05 друк.арк.)
- [27] Г. П. Болотов, **О. А. Новомлинець**, Т. Р. Ганєєв, и М. Г. Болотов, «Активация и модификация поверхностей металлов в вакууме перед сваркой и пайкой» на *Научно-практическом семинаре «Сварка и родственные процессы в промышленности»*, Киев: Экотехнология, 2006, С. 47–49. (0,15 друк.арк.)

- [28] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, та Т. Р. Ганєєв, «Дифузійне зварювання у вакуумі титану з міддю» на *IV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2007, С. 29. (0,05 друк.арк.)
- [29] Г. К. Харченко, **О. А. Новомлинець**, и Т. Р. Ганєєв, «Применение ионной модификации поверхностных слоев при диффузионной сварке в вакууме меди с молибденом», на *8-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия»*, Москва: «МАТИ» - РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2009, С. 290–292. (0,15 друк.арк.)
- [30] G. K. Harchenko, **O. A. Novomlinets**, and M. N. Rudenko, «Diffusion Welding of Cobalt Cemented Carbide», in *18<sup>th</sup> Spanish Technical Sessions on Welding, Industrial Engineering Madrid, Spain, oct., 2010*. [Online]. Available: [https://indusnet.etsii.upm.es/gestion\\_escuela/personal/adjuntos/presentaciones/864.pdf](https://indusnet.etsii.upm.es/gestion_escuela/personal/adjuntos/presentaciones/864.pdf) (0,2 друк.арк.)
- [31] **О. О. Новомлинець**, та М. М. Руденко, «Дослідження впливу матеріалу проміжного прошарку на температурні поля при електроконтактному нагріві твердих сплавів типу ВК», на *I міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2011, С. 122. (0,05 друк.арк.)
- [32] **О. О. Новомлинець**, «Прецизійне контактне зварювання алюмінію та його сплавів з використанням проміжних прошарків», на *III международной научно-технической конференции «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития»*, Под общ. ред. д-р техн. наук Н. А. Макаренко, Краматорск : ДГМА, 2012, С. 120–122. (0,2 друк.арк.)
- [33] **О. О. Новомлинець**, та П. С. Сластион, «Електроконтактне точкове зварювання алюмінію та його сплавів через проміжні прошарки» на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, С. 60-61. (0,15 друк.арк.)
- [34] Ю. В. Фальченко, Е. В. Половецкий, та **О. А.Новомлинець**, «Влияние параметров режима диффузионной сварки на структуру биметаллических соединений АМг6-ВТ6», на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, С. 64-66. (0,2 друк.арк.)
- [35] **О. О. Новомлинець**, та Т. Р. Ганєєв, «Розробка технології прецизійного електроконтактного точкового зварювання алюмінію та його сплавів», на *VII науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2013, С. 49. (0,15 друк.арк.)
- [36] С. В. Олексієнко, **О. А. Новомлинець**, И. А. Прибытько, и С. М. Ющенко, «Способ прецизионного соединения алюминия и его сплавов» на *VII науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2013, С. 50. (0,15 друк.арк.)

- [37] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, та М. О. Хоменко, «Виникнення електричного потенціалу на поверхні металевих зразків при високотемпературному синтезі, що самопоширюється, в наночастиночких фольгах», на конференції *Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: Тез. стенод. докл.* Киев: Ін-т електросварки ім. Е. О. Патона НАН України, 2013, С. 103–104. (0,15 друк.арк.)
- [38] **О. О. Новомлинець**, та І. В. Завальна, «Дослідження прецизійного зварювання тиском напівпровідникового матеріалу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з міддю щодо виготовлення термоелементів», на *Международной научно-технической конференции «Университетская наука-2014»*, Мариуполь: ПГТУ, 2014, С. 142–144. (0,15 друк.арк.)
- [39] Є. В. Половецький, Л. М. Капітанчук, та **О. О. Новомлинець**, «Особливості формування структури з'єднань сплавів алюмінію зі сплавами титану при дифузійному зварюванні у вакуумі», на *Всеукраїнській науково-технічній конференції, присвяченій 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова, та III Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології»*, Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова, 2014, С. 90–91. (0,1 друк.арк.)
- [40] S. V. Oleksiienko, **O. O. Novomlynets**, and S. M. Yushchenko, «Diffusion bonding technique concerning production of microchannel heat exchangers» in *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2016, P. 57–60. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493009>. (0,2 друк.арк.)
- [41] S. V. Oleksiienko, L. Y. Berezin, I. V. Zavalna, та **O. O. Novomlynets**, «The investigation of weldability of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  semiconductor material with copper through the nanoporous interlayers» in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Kosice, 2015, С. 30–32. (0,1 друк.арк.)
- [42] G. K. Kharchenko, **O. O. Novomlynets**, I. O. Prybytko, and I. V. Nahorna, «The Search of New Ways of Thermoelements Production», in *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering «YSF-2016»*, Kharkiv, 2016, P. 156–159. [Online]. Available: <http://www.ysc.org.ua>. (0,2 друк.арк.)
- [43] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та Т. В. Ганєєва, «Досвід і перспективи виробництва мікроканалних теплообмінників», на *VI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 261–262. (0,1 друк.арк.)
- [44] І. В. Нагорна, **О. О. Новомлинець**, та Є. В. Половецький, «Вивчення бар'єрних властивостей іонно-модифікованих шарів», на *VI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 253–254. (0,1 друк.арк.)
- [45] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, та С. М. Ющенко, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації», in

*International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371–373. (0,15 друк.арк.)

- [46] **О. О. Новомлинець**, І. О. Прибителько, та І. В. Нагорна, «Вивчення дифузійних процесів при виготовленні термоелементів», in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 373–375. (0,15 друк.арк.)

#### **Патенти:**

- [47] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, І. О. Прибителько, Т. Р. Ганєєв, та М. М. Руденко, «Спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через сублимовані прошарки», *Патент № 41718 Україна*, Опубл. 10.06.2009 р, Бюл. № 11.
- [48] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, С. В. Олексієнко, І. О. Прибителько, та Ю. В. Фальченко, «Спосіб дифузійного зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент № 60407 Україна*, Опубл. 25.06.2011 р, Бюл. № 12.
- [49] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, Ю. В. Фальченко, та Л. В. Петрушинець, «Спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент № 89671 Україна*, Опубл. 25.04.2014 р, Бюл. № 8.
- [50] С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та **О. О. Новомлинець**, «Спосіб прецизійного дифузійного з'єднання алюмінію та його сплавів», *Патент № 94095 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р, Бюл. № 20.
- [51] Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, **О. О. Новомлинець**, Л. В. Петрушинець, А. І. Устінов, Т. В. Мельниченко, та К. В. Ляпіна, «Спосіб дифузійного зварювання через пористу фольгу», *Патент № 94079 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р, Бюл. № 20.
- [52] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, І. О. Прибителько, та І. В. Нагорна, «Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок», *Патент № 117001 Україна*, Опубл. 12.06.2017 р, Бюл. № 11.

#### **АНОТАЦІЯ**

Новомлинець О. О. Наукові та технологічні основи отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018.

Дисертація присвячена вивченню закономірностей формування прецизійних нероз'ємних з'єднань із різних однорідних та різнорідних матеріалів і розробці на цій основі технологій прецизійного зварювання тиском.

Встановлено, що основною вимогою для забезпечення прецизійності є перетворення в процесі зварювання ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину за рахунок локалізації енергії в стику,

модифікації поверхонь, використання проміжних наноструктурованих прошарків або хімічно активних шарів.

Розроблено методику розрахунку режимів зварювання тиском для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань.

Розроблено нові способи зварювання тиском 1 – через прошарок, який дозволяє локалізувати температурний і деформаційний вплив на вузьку приконтатну зону; 2 – через проміжний прошарок із зварювального матеріалу; 3 – через проміжний хімічно активний прошарок; 4 – через суцільний прошарок у вигляді пористої фольги.

Сформульовано рекомендації по практичному використанню додаткових засобів активації поверхонь для прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів.

Розроблено типову загальну технологію отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань металевих матеріалів зварюванням тиском, ефективність якої апробовано при виготовленні різних виробів.

*Ключові слова:* прецизійне нероз'ємне з'єднання, дифузійне зварювання у вакуумі, електроконтактне зварювання, однорідні та різнорідні матеріали, модифікації поверхневих шарів, локалізації теплової та механічної енергії в стику, хімічна активація поверхонь; пористі та багат шарові прошарки, поверхневі фізико-хімічні процеси.

## АННОТАЦИЯ

Новомлинец О. А. Научные и технологические основы получения прецизионных неразъемных соединений сваркой давлением. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 «Сварка и родственные процессы и технологии». – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2018.

Диссертация посвящена изучению закономерностей формирования прецизионных неразъемных соединений из разных однородных и разнородных материалов и разработке на этой основе технологий прецизионной сварки давлением.

Установлено, что основным требованием для обеспечения прецизионности является превращение в процессе сварки ультратонкого поверхностного слоя в пластическое состояние или жидкость за счет локализации энергии в стыке, модификации поверхностей, использования промежуточных наноструктурированных прослоек, химически активных слоев.

Разработана методика расчетов режимов сварки давлением для получения прецизионных неразъемных соединений.

Разработаны новые способы сварки давлением 1 – через прослойку, которая позволяет локализовать температурное и деформационное влияние на узкую приконтатную зону; 2 – через промежуточную прослойку из сварочного материала; 3 – через промежуточную химически активную прослойку; 4 – через сплошную прослойку в виде пористой фольги.

Установлено, что применение перфорированной прослойки из материала, который имеет высокое электрическое сопротивление позволяет дополнительно



локализовать температурное поле и интенсифицировать микропластическую деформацию в стыке при нагреве импульсом тока.

Установлено, что применение промежуточной прослойки из сварочного материала при электроконтактной сварке позволяет обеспечить прочность соединений на уровне 95-100 % прочности основного металла при его деформации не больше 2 %.

Установлено, что удаление оксидной пленки из поверхности алюминия и его сплавов и образование физического контакта при диффузионной сварке происходит при смачивании контактирующих поверхностей жидкой металлической прослойкой Al-Si, которая возникает при выделении свободного Si при предварительном введении в контакт смеси состава  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$  или в виде напыленного слоя Si на промежуточную прослойку из алюминиевой фольги.

Установлено, что использование многослойной и пористой фольги обеспечивает формирование качественных сварных соединений при сварке материалов, которые тяжело деформируются.

Установлено, что прочность сварных соединений, полученных с применением сублимированных прослоек, на 15-20 % больше прочности соединений, сваренных непосредственно напрямую.

Установлено, что получение прецизионного сварного соединения из углеродистой стали определяется толщиной промежуточного слоя углеродородной смеси, которая наносится перед сваркой на поверхности.

Сформулированы рекомендации по практическому использованию модификации *поверхностных слоев* – для диффузионной сварки в вакууме металлических материалов, которые существенно отличаются по своим физико-химическим и механическим свойствам; *локализации тепловой и механической энергии в стыке* – для электроконтактной сварки металлических материалов с высокой тепло и электропроводностью и твердых материалов; *химической активации поверхностей* – для диффузионной сварки в вакууме материалов, которые имеют на своей поверхности твердые и тугоплавкие оксидные пленки; *пористых и многослойных прослоек* – для диффузионной сварки в вакууме тяжелодеформируемых материалов и фольг; *поверхностных физико-химических процессов, которые протекают самопроизвольно* – для диффузионной сварки в вакууме разнородных металлических материалов, один из которых способен к сублимации.

Разработана принципиальная общая технология получения прецизионных неразъемных соединений металлических материалов сваркой давлением, эффективность которой апробировано при изготовлении разных изделий.

*Ключевые слова:* прецизионное неразъемное соединение, диффузионная сварка в вакууме, электроконтактная сварка, однородные и разнородные материалы, модификации поверхностных слоев, локализации тепловой и механической энергии в стыке, химическая активация поверхностей; пористая и многослойная прослойки, поверхностные физико-химические процессы.

**ABSTRACT**

Novomlynets O. O. Scientific and Technological Fundamentals of Producing Precise, Non-detachable Joints by Pressure Welding – As a manuscript.

Thesis for a Doctor Degree in Technical Sciences. Specialty 05.03.06 – “Welding and Related Processes and Technologies”. – Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, 2018.

The thesis focuses on the regularity investigation of the precision non-detachable joints formation from various homogeneous and heterogeneous materials and the development of precision welding techniques and procedures based on it.

It has been established that the key requirement for providing precision is the transformation of an ultrathin surface layer into a plastic, activated state or liquid during the welding process as a result of the energy localization at the junction, surface modification, application of intermediate nanostructured layers or chemically active layers.

The method of pressure welding calculations for producing precision non-detachable joints has been developed.

New methods of pressure welding have been developed: 1 – through the interlayer which provides the localization of temperature and deformation influence on the narrow near-contact zone; 2 – through the intermediate layer of welding consumables; 3 – through the intermediate chemically active layer; 4 – through the solid layer in the form of porous foil.

Recommendations concerning the practical application of additional tools of surface activation for precision pressure welding of various homogeneous and heterogeneous materials have been formulated.

The typical general technology of producing precision non-detachable joints of metal materials by pressure welding has been worked out. Its effectiveness was tested during the manufacture of various products.

*Keywords:* precision non-detachable joint, vacuum diffusion welding, electrical contact welding, homogeneous and heterogeneous materials, modifications of surface layers, localization of thermal and mechanical energy at the junction, chemical activation of surfaces; porous and multilayer interlayers, surface physical and chemical processes.

Підписано до друку 27.02.2018. Формат 60x84/16.  
Папір офсетний. Друк різнографія. Ум. друк. арк. 1,9.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 413/18.

---

Редакційно-видавничий відділ  
Чернігівського національного технологічного університету  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.