**Савченко Ю.В.**

к.т.н., доцент

**Університет митної
справи та фінансів****Savchenko Yu.**

Ph.D., associate professor

**University of Customs and
Finance****УДК 621.7.044.2****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-7****РЕНТАБЕЛЬНІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ
ПЛОСКИХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ
ШИН З АЛЮМІНІЮ, ПЛАКОВАНИХ
ЗВАРЮВАННЯМ ВИБУХОМ З ДВОХ
СТОРИН МІДДЮ**

У даній роботі досліджується процес зварювання вибухом, із застосуванням енергії вибухових речовин для поєднання металів дозволяє отримувати менш енергоємним способом біметалевих електропровідних шин.

Експериментально виготовленні плоскі електропровідних алюмінієвих шин вибуховою енергією плакованих з одного та обох боків міддю на готовому розмірі.

Застосування біметалевих матеріалів дає можливість економити дефіцитні і дорогі метали, що підвищує надійність і довговічність конструкцій і пристроїв, зокрема в електроприладобудівної промисловості. Особлива увага приділяється аналізу напружено-деформованого стану металу, визначенню оптимальних параметрів вибухової речовини за різних умов навантаження з метою удосконалення технологічних процесів обробки тиском.

Цей метод використовується в сучасному виробництві. Для спеціальних цілей необхідно мати міцне, вакуумнонепроникне з'єднання металевих труб, листів та інших геометричних форм різних металів, які не зварюються або важко піддаються зварюванню термічними зварювальними методами. Зварювання вибухом є одним з технологічних процесів з'єднання нових матеріалів.

В результаті проведеного маркетингового дослідження була встановлена потреба українських підприємств у виробі з таких кольорових металів, як мідь, алюміній, титан, нержавіюча сталь, бронза, латунь, алюміній та латунний лист.

У роботі докладно описано методику розрахунку основних оптимальних параметрів та отримані способом зварювання вибухом плоскі електропровідні шини з алюмінію АД1, плаковані по всій поверхні або частково з одного і двох сторін міддю М1 на готовому розмірі. Застосування енергії вибуху дає можливість отримання багатосторонніх великогабаритних плоских та складного профілю виробів, які неможливо отримати класичними способами через розходження у фізико-механічних властивостях металів.

Результати дають змогу глибше зрозуміти фізичні та механічні механізми пластичного деформування в умовах зварювання вибухом. Отримані способом зварювання вибухом плоскі електропровідні шини з алюмінію АД1, плакованого з одного та з двох сторін міддю М1 на готовому розмірі.

Ключові слова: біметалічні трубні вироби, енергія вибуху, геометричні параметри, електрошини, двосторонній заряд, параметри зварювання, синхронізація зарядів.

Постановка проблеми. Для вакуумнонепроникне з'єднання металевих труб, спеціальних цілей необхідно мати міцне, листів та інших геометричних форм різних



металів, які не зварюються або важко піддаються зварюванню термічними зварювальними методами. У деяких випадках до цих умов додаються й інші умови, наприклад, взаємна електрична ізоляція труб, міцно з'єднаних між собою, і міцність вакууму. Такі проблеми можна вирішити методом зварювання металів вибухом.

Зварювання вибухом є одним з технологічних процесів з'єднання нових матеріалів.

Характерною рисою розвитку сучасного машинобудування є зростання одиничної потужності устаткування, що дає підвищення продуктивності праці та рентабельності виробництва. Зі зростанням потужності та складності умов експлуатації виробів зростає небезпека крихкого руйнування конструкцій та деталей машин. У цих умовах здатність чинити опір поширенню миттєвих і втомних тріщин стає важливим показником надійності високонавантажених конструкцій [11]. Тому створення тріщиностійких композицій, що дозволяють уповільнити або запобігти - руйнуванню, є важливою та актуальною проблемою.

За властивостями мідь близька до срібла і золота. На повітрі вона майже не окислюється, має високу пластичність, електро- і теплопровідність. Тому майже половина міді використовується в електрорадіотехніці для виготовлення провідників – монтажного і обмоточного дроту, струмонесучих деталей приладів та апаратів тощо.

Електропровідність міді дуже залежить від домішок. Навіть незначний вміст домішок різко зменшує електропровідність міді. Якщо в мідь внести метал з більшою провідністю (наприклад, срібло), то електропровідність зменшиться. Тому мідь, яка використовується для виготовлення провідників, повинна бути надзвичайно чистою. Очищають її шляхом електролізу. Тому чисту мідь називають електролітичною.

Шкідливими домішками в міді є вісмут, свинець, сірка і кисень.

Вісмут і свинець з міддю утворюють легкоплавкі евтектики, які розташовуються по границях зерен і спричиняють руйнування при обробці тиском в гарячому стані. Допускається в міді вісмуту до 0,002%, а свинцю до 0,005%.

Сірка і кисень знижують пластичність міді. Крім того, кисень при певних умовах може привести до «водневої хвороби» міді. Кисень з'єднується з міддю, утворюючи оксид міді, який зосереджується на границях зерен. Якщо з такої міді виготовити деталь, яка буде працювати в нагрітому стані та присутності водню, то водень проникає на границю зерен і взаємодіє з оксидом міді, утворюючи пари води, які

створюють тиск, достатній для розтріскування поверхні деталі.

Алюміній має високу тепло- і електропровідність, корозійну стійкість і пластичність. Електрохімічний потенціал алюмінію в повітряному середовищі негативний, тобто він окислюється на повітрі; корозійна стійкість пояснюється тим, що в результаті взаємодії з киснем повітря на поверхні утворюється щільна плівка оксиду алюмінію (Al_2O_3) товщиною ~ 10 нм, яка ізолює метал від навколишнього середовища. Корозійна стійкість алюмінію тим вище, чим менше міститься в ньому домішок.

Залежно від кількості домішок розрізняють алюміній особливої чистоти, в якому міститься не більше 0,001% домішок, високої чистоти - до 0,05% домішок і технічної чистоти - до 1% домішок.

У промисловості застосовують алюміній високої і технічної чистоти. Технічний алюміній (марки АД0 і АД1) поставляється у вигляді листів, профілів, прутків, дроту та інших напівфабрикатів.

Найбільш широке застосування алюміній отримав в електротехнічній промисловості завдяки високій електропровідності.

Біметалічні сполуки алюмінію з міддю отримані із застосуванням енергії вибуху мають низку цінних властивостей, зумовлених високою електропровідністю, теплопровідністю та відносною дешевизною.

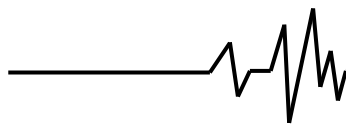
Поряд з традиційними методами отримання біметалу алюміній + мідь способом прокатки, автоматичним зварюванням по флюсу і тертям) це поєднання можна отримувати менш енергоємним способом зварюванням вибухом, із застосуванням енергії вибухових речовин (ВВ).

Цей спосіб плакування відносно великих поверхонь є найбільш раціональним і перспективним, що дозволяє економити дорогі кольорові метали.

Необхідними умовами для з'єднання металів в одне ціле є утворення та з'єднання ювенільних поверхонь. Біметалічні сполуки алюмінію з міддю мають ряд цінних властивостей, зумовлених високою електропровідністю, теплопровідністю, і широко застосовуються в електротехнічній промисловості.

Відомо, що при підвищених температурах мідь та алюміній утворюють кілька крихких хімічних сполук виду Cu_mAl_n [1,9,10,15], що визначає неперспективність отримання цього біметалу засобом плавлення.

Аналіз останніх досліджень. Поряд з традиційними методами отримання біметалу (способом прокатки [2], автоматичним



зварюванням по флюсу [3] і тертям [2]), це поєднання металів можна отримувати менш енергоємним способом — зварюванням вибухом, із застосуванням енергії вибухових речовин (ВР). Цей спосіб плакування щодо великих поверхонь є найбільш раціональним та перспективним. Зварювання вибухом є одним з технологічних процесів з'єднання нових матеріалів.

Сутність процесу зварювання вибухом полягає в основному металохімічна взаємодія матеріалів у твердій фазі. Що стосується зварювання вибухом (великі напруги зсуву, коротка тривалість) теоретично обґрунтована можливість активації контактних поверхонь одночасно з розвитком фізичного контакту і настанням стадії об'ємної взаємодії відразу після цих процесів.

При зварюванні вибухом вдається уникнути безперервних шарів крихких фаз, які зазвичай утворюються в зоні зварювання при термічних способах зварювання металів, що утворюють бінарні системи у вигляді хімічних сполук (інтерметалідів).

Аналіз існуючого попиту України на біметалічну трубку продукцію. В результаті проведеного маркетингового дослідження була встановлена потреба українських підприємств у виробі з таких кольорових металів, як мідь, алюміній, титан, нержавіюча сталь, бронза, латунь, алюміній та латунний лист.

Встановлення, доцільність та можливість заміни труб з різних комбінацій металів на біметалічні труби шляхом виготовлення цих труб методом вибухового зварювання. Це дозволить заощадити дефіцитні кольорові метали до 70%, розширити номенклатуру труб і трубної продукції, поліпшити їх якість, і тим самим підвищити експлуатаційну довговічність і надійність машин і механізмів.

Проведені дослідження дозволили виявити конкретних споживачів труб з кольорових металів з метою заміни їх біметалічними по відношенню до можливостей отримання енергії шляхом вибуху. При цьому враховувалися підприємства, які споживають невеликі партії тонкої продукції і які можуть бути замінені біметалічними.

Потреба в продукції кольорових металів, що споживається невеликими партіями, становила:

Труби Мідь -	167062 Кг
Труби Алюміній	162030 Кг
Труби Титан -	160280 Кг
Труби Нержавіючої	53558 Кг
Труби Бронза -	51520 Кг
Труби Латунь -	98655 Кг
лист алюміній	37928 Кг
латунний лист	5297 кг

При заміні кольорового металопродукату на біметалічний економиться дефіцитний кольоровий метал, що наразі дуже актуально для України, оскільки його доводиться закуповувати в інших країнах.

Мета роботи. Дослідження процесу зварювання вибухом, із застосуванням енергії вибухових речовин для поєднання металів дозволяє отримувати менш енергоємним способом біметалевих електропровідних шин.

Провести експериментальні дослідження виготовлення плоских електропровідних алюмінієвих шин вибуховою енергією плакованих з одного та обох боків міддю на готовому розмірі.

Застосування біметалевих матеріалів дає можливість економити дефіцитні і дорогі метали, підвищує надійність і довговічність конструкцій і пристроїв, зокрема в електроприладобудівної промисловості.

Особлива увага приділяється аналізу напружено-деформованого стану металу, визначенню оптимальних параметрів вибухової речовини за різних умов навантаження з метою удосконалення технологічних процесів обробки тиском.

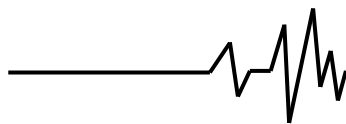
Виклад основного матеріалу. До теперішнього часу в електротехнічній промисловості в якості провідників використовувалися кольорові метали (мідь, алюміній, латунь та ін.), Але їх відсутність в Україні необхідних для промисловості обсягів і висока вартість зумовлює заміну моновиборів на біметалічні з метою їх економії. Використання біметалевих матеріалів дозволяє економити дефіцитні дорогі метали, підвищує надійність і довговічність конструкцій і пристроїв.

Біметалічні сполуки алюмінію і міді мають ряд цінних властивостей завдяки високій електро- і теплопровідності і можуть широко застосовуватися в електротехнічній промисловості. Вдало поєднується в біметалі відносна дешевизна і висока електропровідність алюмінію (провідника) і практична відсутність оксидних плівок на міді (контакт).

Відомо, що при підвищених температурах мідь і алюміній утворюють кілька крихких хімічних сполук типу Cu_mAl_n [1-3, 13-14], що зумовлює безперспективність отримання даного біметалу шляхом плавлення.

Розрахунок параметрів зварювання при виготовленні різних геометричних фігур і виробів. Для виготовлення плоских електропровідних алюмінієвих шин, плакованих з однієї і двох сторін міддю, використовувався алюмінієвий лист з наступними розмірами: 100x11x1700 мм і в якості облицювального листа використовувався мідний лист розміром 110x2x1800 мм.

Зварювання вибухом біметалічних заготовок здійснювали за паралельною [4]



схемою (рис. 1) розташування пластин з навісанням [5] верхньої над нижньою, що забезпечує стабільніші властивості зони з'єднання по довжині заготовки.

Метал заготовок попередньо піддавали хімічній обробці, а безпосередньо перед складанням пакету контактні поверхні знежирювали ацетоном.

При ініціюванні заряду ВР поширюється фронт детонації зі швидкістю D до кількох кілометрів на секунду. Під дією високого тиску продуктів вибуху, що розширюються, метана пластина набуває швидкість і співпадає з нерухомою пластиною під кутом γ (див. рис. 1).

Метал заготовок попередньо піддавався хімічній обробці, а безпосередньо перед складанням упаковки контактні поверхні знежирювали ацетоном.

При ініціюванні заряду вибухової речовини поширює фронт детонації зі швидкістю D до декількох кілометрів в секунду. Під впливом високого тиску розширюються продуктів вибуху відкинута плита набуває швидкість і стикається з нерухомою плитою під кутом γ (рис. 1).

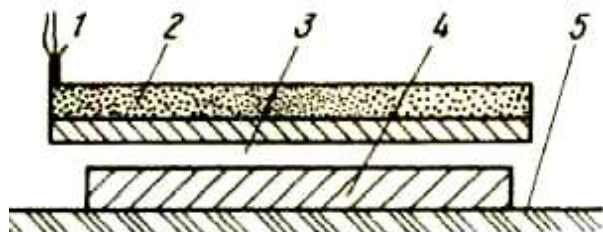


Рис. 1. Схема зварювання вибухом двох металевих пластин: 1 – детонатор; 2 – заряд ВР; 3 – метана пластина; 4 – нерухома пластина; 5 - основа

В якості вибухових речовин використовувалися механічні суміші амоніту 6ЖВ з аміачною селітрою насипною щільністю 0,85-0,9 г/см³. Основні вихідні параметри при зварюванні вибухом: V_k - швидкість точки контакту, V_c - швидкість зіткнення, γ кут удару; визначалася за методикою, описаною в літературі [2,5] і уточнювалася експериментально. Параметри детонації вибухових і діаметр зарядів визначали згідно з рекомендаціями [1,5, 11].

Під час експериментів швидкість детонації зарядів вибухової речовини змінювалася в межах 1,7-2,5 км/с. Таким чином, триметалеві плоскі електропровідні шини Al + Cu виготовляються в готовому розмірі. Геометричні розміри біметалевих шин 80x12x1650 мм; Товщина мідного шару становить 2 мм.

Фактичні виміри геометрії плакованих шарів проводилися після технологічної обрізки зварної шини по периметру, що дорівнює 10 мм. Розміри біметалічної шини: плакована пластина

АД1 = 10,0-0,2. Триметалічна: мідь М1 $\delta = 2,0-0,2$ мм + алюміній АД1 $\delta = 10 \pm 0,15$ мм + шар міді М1 $\delta = 2,0-0,2$ мм. Виміри призводили на інструментальному мікроскопі БМІ-1Ц з цифровим пультом УЦП-1М. Витончення АД1 (нерухома плита, рис.1) відбувається в процесі прокатки заряду вибухової речовини, що викидається в процесі детонації. В результаті зіткнення (в залежності від параметрів вибухового зварювання) АД1, як більш пластичний метал, може ущільнюватися в межах свого запасу міцності.

Експерименти проводилися також на частковому облицюванні плоских алюмінієвих електропровідних шин міддю з одного і обох боків (рис. 2).

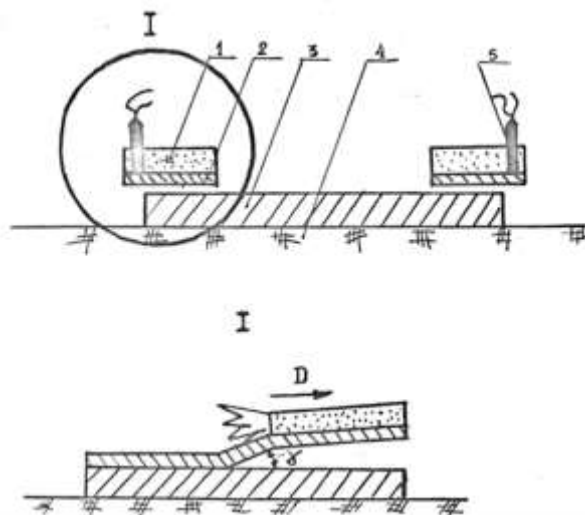
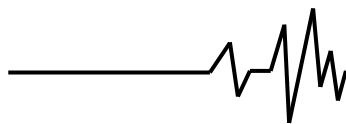


Рис. 2. Схема зварювання вибухом на частково облицюванні плоских пластин: 1 – заряд ВР; 2 – метана пластина; 3 – нерухома пластина; 4 – основа; 5 - детонатор

Виходячи з досвіду [10,12], були проведені експерименти з отримання біметалевих трубних заготовок методом вибухового зварювання за внутрішньою схемою облицювання. Початковими заготовками служили холоднотягнуті труби з алюмінію АД1 $\varnothing 36 \times 2 \times 400$ мм і міді М1 $\varnothing 42,5 \times 1 \times 400$ мм. Простір між внутрішньою поверхнею утримуючого пристрою, зовнішньою заготовкою труби, внутрішньою поверхнею металевих зарядів і зарядом вибухової речовини заповнювалося водою, яка в першому випадку грала роль демпфера, а в другому - передавального середовища. Отримані біметалеві трубні заготовки можуть бути піддані подальшій холодній деформації з проміжною термічною обробкою.

В якості вихідних матеріалів, що складають біметалічну пару, в якості основної труби використовувалися прутки і лист деформованого алюмінію АД1 з рівнем



механічних властивостей $\sigma_b = 60-70$ МПа, $\delta = 18-20\%$, HRB -25-27 од.

Мікроструктура вихідного металу (рис.3а) частково рекристалізована, що зумовлює значний приріст міцності. Так як для виготовлення біметалу не потрібно більш висока пластичність, то метал не піддавався рекристалізаційному відпалу. Як плакувальний шар використовували термічно оброблені заготівлі міді. Механічні властивості, яких мали наступний рівень $\sigma_b = 250-260$ МПа, $\delta = 38-40\%$, HRB = 38-49 од. Мікроструктура металу рекристалізована з великою кількістю двійників відпалу (рис. 3б).



а)



б)

Рис. 3. Мікроструктура вихідного металу: а) - алюміній АД 1; б) - мідь М1

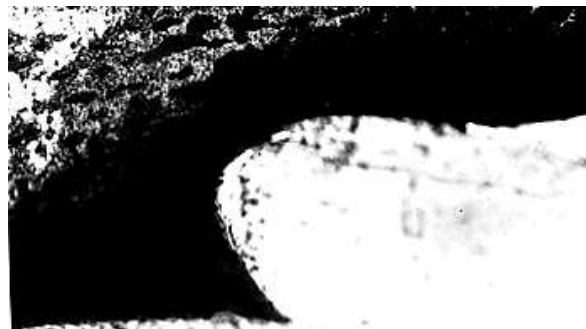
Під час проведення експериментів швидкість детонації D змінювали з 1,7 до 2,5 км/сек. Фактичні виміри по геометрії шару, що плакують, проводили після технологічного обрізання 10 мм по периметру зварної шви.

Міцність зчеплення шарів оцінювали шляхом механічних випробувань зразків на вигин, вирізаних із готових виробів. Руйнування зразків і розшарування при випробуваннях не спостерігалось.

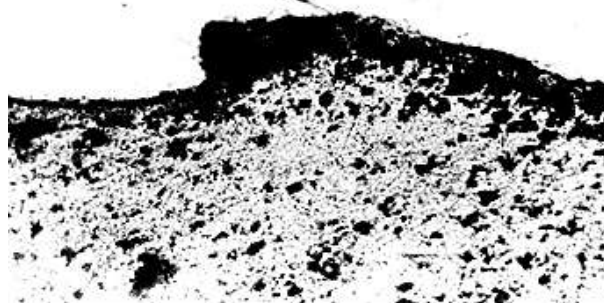
Як вихідні матеріали, що становлять біметалеву пару, використовували, як основний шар, лист деформованого алюмінію АД1 [9, 10] розміром 100x11x1700 мм з рівнем механічних

властивостей $\sigma_b = 60 \div 70$ МПа, $\delta = 18 \div 20\%$, HRB = 25 $\div$ 27 од. Мікроструктура вихідного металу - частково рекристалізована, що обумовлює значний приріст міцності. Так як для виготовлення біметалу не потрібно більш висока пластичність, то метал не піддається подальшому відпалу кристалізації.

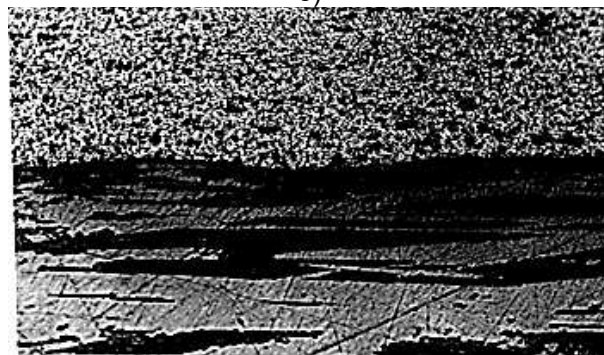
Залежно від режимів зварювання межа шва може змінюватися від плоскої до хвиляподібної, впорядкованої або неупорядкованої (рис. 4).



а)



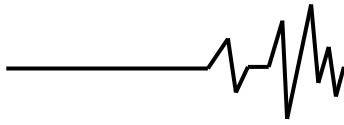
б)



в)

Рис. 4. Вид межі зварки

Характер хвиль і їх параметри в області перехідного шару при з'єднанні металів вибухом залежить від потужності використовуваної вибухової речовини і її якості, швидкості детонації, початкової відстані між пластинами, властивостей металів, що з'єднуються. Оскільки рівномірність товщини облицювального шару є одним з основних показників його якості, велика висота хвилі в вибухових зварених заготовках не



бажана. Параметри зварювання підбиралися таким чином, щоб утворення хвилі було таким же, як показано на (рис. 3б). Уздовж зварювального кордону є зона, де частинки алюмінію і міді знаходяться в стані механічного змішування. Зі збільшенням висоти шихти, вмісту амоніту в суміші між зварюваними пластинами ширина зони збільшується. При цьому ширина зони змішування різна навіть в межах одного зразка, у деяких вона і зовсім відсутня, що можна пояснити процесом зварювання, викликаним утворенням хвиль і протіканням металу на контактних поверхнях. Біля лінії з'єднання є зона пластичного потоку металів, в якій зерна розтягуються в напрямку фронту детонації. Шари міді мають дрібне недеформоване зерно, що пояснюється проходженням рекристалізації в призварювальній зоні, викликаній місцевим теплом, що виділяється в результаті зіткнення пластин.

Залежно від хімічного складу металів, що з'єднуються при зварюванні вибухом, в зоні переходу можуть з'являтися конструктивні зміни, хімічні неоднорідності, надмірна дрібнодисперсна фаза і т. Д. Відомо, що при зварюванні вибухом, крім пластичної течії, відбувається розплавлення тонких поверхневих шарів металу і їх взаємодія або перемішування, в той час як за рахунок швидкого відведення тепла із зони зварювання ці стани реєструються. Однак швидкість відведення тепла і термін служби високих температур мають кінцеве значення, тому в зоні з'єднання є час для загартування металів і навіть перекристалізації деформованих зерен. Таким чином, характер і будова перехідної зони залежить від двох основних конкуруючих процесів: з одного боку, плавлення, взаємодії або перемішування складу зони зварювання під впливом пластичної деформації, високого тиску і температур, що розвиваються в процесі зіткнення, а з іншого - фіксації отриманого складу в результаті швидкого відведення тепла із зони з'єднання. Тому якість біметалу визначається в першу чергу складом і властивостями зони з'єднання. Ця зона також визначає здатність біметалу піддаватися подальшій пластичній деформації і термічній обробці.

Вимірювання мікротвердості в області шва показало, що обидва метали зміцнюються в процесі зварювання вибухом (рис. 5)

Аналіз зміни мікротвердості вказує на поступове зниження твердості алюмінію і міді від максимуму, в зоні з'єднання, до твердості вихідних металів. Твердість міді в зоні зварного шва знижується незначно, що можна пояснити процесами рекристалізації в ній.

Міцність зчеплення шарів оцінювали механічними випробуваннями згинальних

зразків, вирізаних з готових виробів. Злами та розшарування зразків під час випробувань не спостерігалися (рис. 6, 7).

Результати випробувань показали утворення стабільного і міцного зв'язку шарів металу. Крім того, якісними показниками біметалу з відносно тонким облицювальним шаром є ще й рівномірність товщини останнього.

Тому якість біметалу визначається, в першу чергу, складом та властивостями зони з'єднання. Ця зона визначає також здатність біметалу піддаватися подальшій пластичній деформації та термічній обробці.

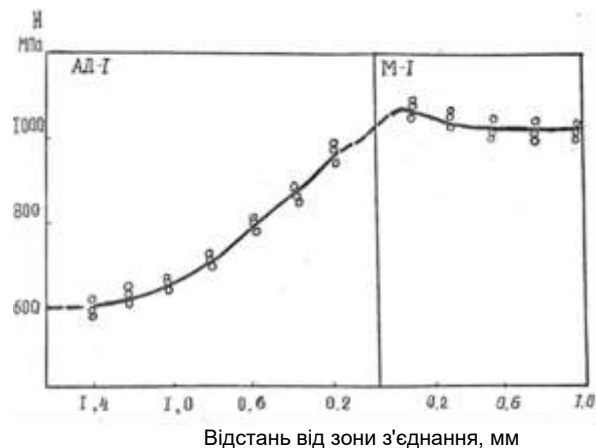


Рис. 5. Характер зміни мікротвердості HV у зоні з'єднання біметалу алюміній АД1 + мідь М1

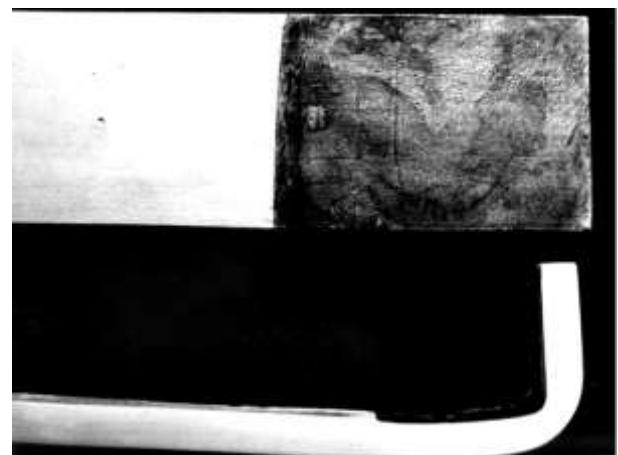
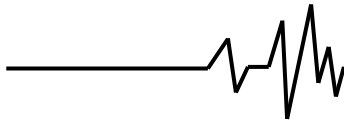


Рис. 6. Зразки після випробування на вигин

Одним з вузьких місць в технологічному процесі виготовлення алюмінієво-мідних провідників є відпал. Особливістю алюмінієво-мідного складу є утворення при нагріванні ряду сполук (інтерметалідів) алюмінію і міді, які різко погіршують механічні властивості. У перехідній зоні при температурі 150°C утворюється інтерметалогенідна сполука Al_2Cu , при 350°C утворюється сполука Al_4Cu_4 , а при більше 400°C



між цими сполуками є сполука $AlCu$, яка має найвищу твердість.



Рис. 7. Зразки після випробування на вигин

При $350^{\circ}C$ зі збільшенням часу експозиції відносна подовження значно зростає. Міцність знижується зі збільшенням температури і тривалості відпалу. При температурі вище $400^{\circ}C$ міцність виробу збільшується, що свідчить про зростання інтерметалідного шару. Тому, у разі необхідності, термічна обробка алюмінієво-мідних складів повинна витримуватися в межах $350-400^{\circ}C$ і часом від 0,5-1,5 години.

Результати випробувань показали утворення стабільного та міцного з'єднання шарів біметалу. Крім того, показником якості біметалу з відносно тонким шаром, що плакує, є також рівномірність останнього.



Рис. 8. Готова електрошина плакована по всій довжині (алюміній + мідь)

Фактичні виміри геометрії плакуючих шарів проводили після технологічної обрізки звареної шини, по периметру рівної 10 мм. (рис.8). Розміри біметалічної шини: пластина, що плакується АД1 $5 = 10,0^{-0,2}$ мм, метана МІ $\delta = 2,0^{-0,2}$ мм. Розміри триметалічної шини: мідний шар МІ $\delta = 2,0^{-0,2}$ мм + алюміній АД1 $\delta = 9,5^{\pm 0,15}$ мм + мідний шар МІ $\delta = 2,0^{-0,2}$ мм. Вимірювання проводили на інструментальному мікроскопі БМІ-1Ц із цифровим пультом УЦП-1М. Потонання АД1 (нерухома пластина, див. рис. 1) відбувається в процесі накопчування МІ під час детонації ВВ. В результаті зіткнення (залежно

від параметрів зварювання вибухом) АД1, як пластичний метал, може ущільнюватися в межах його запасу міцності.

Висновки. Під час проведення експериментів швидкість детонації D змінювали не більше 1,7:2,5 км/сек. Фактичні виміри по геометрії шару, що плакують, проводили після технологічного обрізання 10 мм по периметру зварної шини.

Міцність зчеплення шарів оцінювали шляхом механічних випробувань зразків на вигин, вирізаних із готових виробів. Руйнів зразків і розшарування при випробуваннях не спостерігалось.

Таким чином, визначені оптимальні параметри та отримані способом зварювання вибухом плоскі електропровідні шини з алюмінію АД1, плаковані по всій поверхні або частково з одного і двох сторін міддю М1 на готовому розмірі.

Застосування енергії вибуху дає можливість отримання багатошарових великогабаритних плоских та складного профілю виробів, які неможливо отримати класичними способами через розходження у фізико-механічних властивостях металів.

Отримані способом зварювання вибухом плоскі електропровідні шини з алюмінію АД1, плакованого з одного та з двох сторін міддю М1 на готовому розмірі. Причому зварювання вибухом можна зробити як на одній, так і одночасно на декількох деталях.

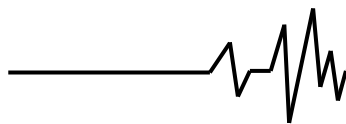
Справжніми дослідженнями вирішено низку важливих завдань, таких як:

- застосування багатошарових металів для економії дефіцитних та дорогих матеріалів;
- підвищення надійності, зниження маси виробів за збереження конструктивної міцності;
- забезпечення швидкоплинності процесу зварювання, внаслідок чого товщина перехідної зони біметалу незначна;
- можливість отримання багатошарових великогабаритних плоских та складного профілю виробів.

Список використаних джерел

1. Савченко Ю.В. Шаповал А.А., Драгобецький В.В. Аналіз процесів ударно-хвильової регенерації твердих сплавів. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУХПІ. 2018. № 31 (1306) С. 100-105.

2. Савченко Ю.В. Моделювання параметрів під час ініціювання плоских та циліндричних високомодульних джерел енергії.



Гірнича електромеханіка та автоматика. НГУ, 2016. Вип. 97. С. 116 – 120.

3. Савченко Ю.В. Фізичні та теоретичні основи руйнування твердих сплавів. *Збірник наукових праць НГУ*. 2017. Вип. 51. С. 116 – 120.

4. Кулинич В.Д., Шаповал О.О., Драгобецький В.В., Воробйов В.В., Шлик С.В., Пєєва І.Е., Аргат Р.Г., Воробйова Л.Д. Технологія вибухового руйнування середовища шляхом зміни механічних властивостей в ближній зоні вибуху. Кременчук, Видавництво «НОВАБУК», 2022. 184 с

5. Savchenko Yu., A. Shapoval, I. Kuziev. (2022). Modeling of High Module Power Sources Systems Safety Processes. *Materials Science Forum*, Vol. 1052, pp 399-404, 2022 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. DOI: 10.4028/p-24y9ae

6. Р. Аргат, С. Шлик, В. Щетинін, Д. Молоштан, В. Драгобецький, О. Шаповал. Вибір та моделювання процесу формозмінювання деталей шаруватого ударостійкого елемента. 2021: XXII Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта.

7. O.A. Khrebtova, A.A. Shapoval, D.V. Mos'pan, V.V. Dragobetsky, S.M. Gorbatyuk & O.E. Markov. Automatic Temperature Control System for Electric Resistance Annealing of Steel Welding Wire. *Metallurgist*, 65 (3-4), pp. 412-422. DOI: 10.1007/s11015-021-01171-4

8. N. Hrudkina, L. Aliieva, O. Markov, I. Marchenko, A. Shapoval, P. Abhari, M. Kordenko. (2020). Predicting The Shape Formation Of Hollow Parts With A Flange In The Process Of Combined Radial-Reverse Extrusion *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1 (106) 2020, P 55-62. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.203988

9. Шаповал А.А., Драгобецький В.В., Савченко Ю.В., Гуренко О.Ю., Марков О.Є. Рентабельність виготовлення перехідників із поєднання металів нержавіюча сталь+цирконій. Актуальні проблеми інженерної механіки / Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції. Загальна редакція - Н.Г. Сур'янінов. Одеса: ОГАСА, 2020. С 369-372

10. Коцюба В.Ю., Драгобецький В.В., Шаповал А.А., Шлик С.В., Наумова Є.А. Деталі, що найбільш ефективно штампуються з використанням бризантних вибухових речовин. МАТЕРІАЛИ XI Міжнародної науково-технічної конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання

обробки тиском у машинобудуванні та металургії», присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском 20–22 листопада 2019 р. С 80-81

11. V. Dragobetskii, M. Zagirnyak, O. Naumova, S. Shlyk, A. Shapoval. (2018). Method of Determination of Technological Durability of Plastically Deformed Sheet Parts of Vehicles. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7 (4.3) 92-99. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19558

12. Р.Є. Черняк, В.В. Драгобецький, С.В. Дунь, Є.А. Наумова, А.А. Шаповал, С.В. Шлик. Застосування імпульсних технологій при виробництві озброєння та військової техніки. Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції 17-19 травня 2017 року : Збірник тез доповідей / – Вінниця: ВНТУ, 2017. – С 327 – 330

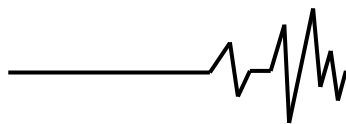
13. Загірняк М.В., Бугайчук В.М., Драгобецький В.В., Загорянський В.Г., Шаповал О.О., Пасішніченко К.М., Мосьпан Д.В. Спосіб виготовлення біметалевих струмопідвідних шин. Патент на корисну модель № 97637 МПК В23Р 15/00 (2015.01)

14. Загорянський В.Г., Шаповал А.А., Мосьпан Д.В. Аналіз напруженого стану при пластичному згині двохшарових листів шаром, що плакує всередину. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка Серія: Галузеве машинобудування, будівництво Випуск 2(41) С. 32-38

15. Aikin, M., Shalomoev, V., Kukhar, V., Kostryzhev, A., Kuziev, I., Kulynych, V., Dykha, O., Dytyniuk, V., Shapoval, O., Zagorskis, A., Burko, V., Khliestova, O., Titov, V., & Hrushko, O. (2025). Recent Advances in Biodegradable Magnesium Alloys for Medical Implants: Evolution, Innovations, and Clinical Translation. *Crystals*, 15(8), 671. <https://doi.org/10.3390/cryst15080671>

References

1. Savchenko YU.V. Shapoval O.O., Dragobets'kyi V.V. 2018. Analiz protsesiv udarno-khvylovoiy reheneratsiyi tverdykh splaviv. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KHPI. Seriya: Innovatsiyni tekhnolohiyi ta ustatkuvannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta*



metallurhiyi. Kharkiv: NTUKHPI. № 31 (1306) Pp. 100-105.

2. Savchenko YU.V. (2016). Modelyuvannya parametriv pid chas initsiyuvannya ploskykh ta tsylindrychnykh vysokomodul'nykh dzherel enerhiyi. Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka: nauk.-tekhn. zb. D.: NHU, Vip. 97. S. 116 - 120.

3. Savchenko YU.V. (2017). Fizychni ta teoretychni osnovy ruynuvannya tverdykh splaviv Zbirnyk naukovykh prats' NHU: nauk.-tekhn. zb. D.: NHU, 2017. Vip. 51. S. 116 - 120..

4. V.D. Kulinich, O.O. Shapoval, V.V. Drahobets'kyi, V.V. Vorobyov, S.V. Shlik, I.YE. Pyeyeva, R.H. Arhat, L.D. Vorobyova. (2022). Tekhnolohiya vybukhovoho ruynuvannya seredovyscha shlyakhom zminy mekhanichnykh vlastyvostey u blyzhniy zoni vybukhu Kremenchuk Vydavnytstvo «NOVABUK», 2022. 184 c

5. Iu. Savchenko, A. Shapoval, I. Kuziev. (2022). Modeling of High Module Power Sources Systems Safety Processes. Materials Science Forum, Vol. 1052, pp 399-404, 2022 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. DOI: 10.4028/p-24y9ae

6. R. Arhat, S. Shlik, V. Shchetynin, D. Moloshtan, V. Drahobets'kyi, O. Shapoval. (2021). Vybir ta modelyuvannya protsesu formozminyuvannya detaley sharuvatoho udarostiykoho elementu. 2021: XXII Prohresyivna tekhnika, tekhnolohiya ta inzhenerna osvita.

7. O.A. Khrebtova, A.A. Shapoval, D.V. Mos'pan, V.V. Dragobetsky, S.M. Gorbatiuk & O.E. Markov. Automatic Temperature Control System for Electric Resistance Annealing of Steel Welding Wire. Metallurgist, 65 (3-4), pp. 412-422. DOI: 10.1007/s11015-021-01171-4

8. N. Hrudkina, L. Aliieva, O. Markov, I. Marchenko, A. Shapoval, P. Abhari, M. Kordenko. (2020). Predicting The Shape Formation Of Hollow Parts With A Flange In The Process Of Combined Radial-Reverse Extrusion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/1 (106) 2020, P 55-62. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.203988

9. Shapoval O.O., Drahobets'kyi V.V., Savchenko YU.V., Hurenko O.YU., Markov O.YE. (2020). Rentabel'nist' vyhotovlennya perekhidnykiv iz poyednannya metaliv nerzhavlyucha stal'+tsyrkoniy. Aktual'ni problemy inzhenernoyi mekhaniky / Tezy dopovidey VII Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. Zahal'na redaktsiya – N.H. Sur'yaninov. Odesa: ODASA, 2020. Pp. 369-372

10. Kotsyuba V.YU., Drahobets'kyi V.V., Shapoval O.O., Shlyk S.V., Naumova YE.A. (2019). Detali, shcho nayefektyvnishe shtampuyut'sya z vykorystannyam bryzantnykh vybukhovyykh rechovyn. MATERIALI KHI Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Resursozberezhennya ta enerhoefektyvnist' protsesiv ta obladnannya obrobky tyskom u mashynobuduvanni ta metallurhiyi», prysvyachenoyi 90-richchyu zasnuvannya kafedry obrobky metaliv tyskom 20–22 lystopada 2019 r. Pp. 80-81.

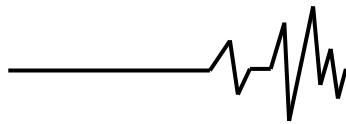
11. V. Dragobetskii, M. Zagirnyak, O. Naumova, S. Shlyk, A. Shapoval. (2018) Method of Determination of Technological Durability of Plastically Deformed Sheet Parts of Vehicles. International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7 (4.3) 92-99. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19558

12. R.YE. Chernyak, V.V. Drahobets'kyi, S.V. Dun', YE.A. Naumova, A.A. Shapoval, S.V. Shlyk. (2017). Zastosuvannya impul'snykh tekhnolohiy pry vyrobnytstvi ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniky. Aktual'ni problemy proektuvannya, vyhotovlennya ta ekspluatatsiyi ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniky. Materialy vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi 17-19 travnya 2017 roku : Zbirnyk tez dopovidey / – Vinnytsya: VNTU, 2017. – Pp. 327 – 330

13. Zahirnyak M.V., Buhaychuk V.M., Drahobets'kyi V.V., Zahoryans'kyi V.H., Shapoval O.O., Pasishnichenko K.M., Mos'pan D.V. Sposib vyhotovlennya bimetalovykh strumopidvidnykh shyn. Patent na korysnu model' № 97637 MPK V23R 15/00 (2015.01).

14. Zahoryans'kyi V.H., Shapoval O.O., Mos'pan D.V. Analiz napruzhenoho stanu pry plastychnomu z'hyni dvosharovykh lystiv kuleyu, shcho plakuye vseredynu. Zbirnyk naukovykh prats' Poltavskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu imeni Yuriya Kondratyuka Seriya: Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo Vypusk 2(41) Pp. 32-38

15. Aikin, M., Shalomeev, V., Kukhar, V., Kostryzhev, A., Kuziev, I., Kulynych, V., Dykha, O., Dytyniuk, V., Shapoval, O., Zagorskis, A., Burko, V., Khliestova, O., Titov, V., & Hrushko, O. (2025). Recent Advances in Biodegradable Magnesium Alloys for Medical Implants: Evolution, Innovations, and Clinical Translation. (2025). Crystals, 15(8), 671. <https://doi.org/10.3390/cryst15080671>.

**PROFITABILITY OF MANUFACTURING FLAT ELECTRICAL BUSHES WITH ALUMINUM, PLATED ON TWO SIDES WITH COPPER BY EXPLOSION WELDING**

This work investigates the process of explosion welding, using the energy of explosives to combine metals, which allows for the production of bimetallic conductive buses in a less energy-intensive way. Experimentally manufactured flat conductive aluminum buses clad on one and both sides with copper on the finished size by explosive energy.

The use of bimetallic materials makes it possible to save scarce and expensive metals, increases the reliability and durability of structures and devices, in particular in the electrical appliance industry. Special attention is paid to the analysis of the stress-strain state of the metal, the determination of the optimal parameters of the explosive under various loading conditions in order to improve the technological processes of pressure treatment.

This method is used in modern production. For special purposes, it is necessary to have a strong, vacuum-tight connection of metal pipes, sheets and other geometric shapes of various metals that are not welded or are difficult to weld by

thermal welding methods. Explosion welding is one of the technological processes for joining new materials. As a result of the conducted marketing research, the need of Ukrainian enterprises for products made of such non-ferrous metals as copper, aluminum, titanium, stainless steel, bronze, brass, aluminum and brass sheet was established.

The paper describes in detail the method of calculating the main optimal parameters and flat conductive tires made of aluminum AD1, clad over the entire surface or partially on one and both sides with copper M1 on the finished size, obtained by explosion welding. The use of explosion energy makes it possible to obtain multilayer large-sized flat and complex-profile products that cannot be obtained by classical methods due to differences in the physical and mechanical properties of metals.

The results provide a deeper understanding of the physical and mechanical mechanisms of plastic deformation under explosion welding conditions. Flat conductive busbars made of AD1 aluminum, clad on one and both sides with M1 copper, in finished size, obtained by explosion welding.

Keywords: *bimetallic pipe products, explosion energy, geometric parameters, electric buses, two-way charge, welding parameters, synchronization of charges.*

Відомості про автора

Савченко Юрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Кібербезпеки та інформаційних технологій» Університету митної справи та фінансів (вул. Володимира Вернадського 2/4, м. Дніпро, 49000, Україна, email: savchennew@gmail.com).

Savchenko Iurii Vladimirovich – Doctor of Philosophy in Materials Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Cybersecurity and Information Technologies" of the University of Customs and Finance (Volodymyr Vernadskyi St. 2/4, Dnipro, 49000, Ukraine), email: savchennew@gmail.com).

Стаття надійшла 09.10.2025

Стаття прийнята 19.10.2025

Опубліковано 25.12.2025