

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ АПАРАТНИХ ЗАТИСКАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ

Л.Д. Добрушин, А.Г. Бризгалін, П.С. Шльонський, Є.Д. Пекар, С.Д. Венцев

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

В електротехнічній промисловості досить часто застосовується з'єднання мідних і алюмінієвих струмопровідних елементів. Прямий контакт таких елементів без зварювання супроводжується протіканням електрохімічної корозії і підвищенням в результаті цього перехідного опору під час експлуатації. Будь-який вид зварювання даних матеріалів призводить до утворення інтерметалідів типу Al_nCu_m , які можуть вплинути (або не вплинути) на електротехнічні властивості з'єднання. Зварювання вибухом є найбільш ефективним способом отримання мідно-алюмінієвих електричних провідників з підвищеними експлуатаційними властивостями. Необхідність отримання біметалевих мідно-алюмінієвих виробів різних форм за допомогою зварювання вибухом вимагає розробки відповідних технологічних процесів. Бібліогр. 4, табл. 5, рис. 10.

Ключові слова: електричний провідник, електроопір, біметалевий перехідник, композитне з'єднання, зварювання вибухом, мідно-алюмінієвий перехідник

Однією з найбільш важливих властивостей електроконтактних деталей і вузлів, необхідних для з'єднання різнорідних елементів силових електричних ланцюгів (з'єднання мідних підводів силових електричних машин з алюмінієвими струмопровідними шинами, кабелями, накінцівниками апаратних затискачів), є висока надійність при мінімальному перехідному електричному опорі [1].

Найбільш простий спосіб отримання таких з'єднань за допомогою притиснення деталей, що з'єднуються, наприклад, болтами, характеризується проявом електрохімічної корозії, внаслідок чого з'єднання швидко втрачає експлуатаційні властивості через зростання перехідного опору і подальшого його перегріву аж до розплавлення.

Існують різні способи підвищення якості таких з'єднань: пакетна прокатка, напилення, контактне і дифузійне зварювання, зварювання вибухом. Останній, на відміну від інших, характеризується більш міцним і щільним з'єднанням шарів з близьким до нуля перехідним опором, відсутністю міжшарової електрокорозії. Ефективність впровадження конструкцій композитних струмопровідних вузлів, одержуваних зварюванням вибухом, підтверджується зниженням перехідного опору в 1,7...2,5 рази і збільшенням терміну служби в 5...7 разів [2].

Мета цієї роботи – дослідити можливість виготовлення мідно-алюмінієвих перехідних елементів за допомогою зварювання вибухом та розробити технології їх виготовлення.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розглянуті три способи виготовлення апаратного затискача з використанням зварювання вибухом.

Перший – виготовлення шляхом зварювання вибухом біметалевих (Al + Cu) листів, їх подаль-

ша прокатка до необхідної товщини і розрізання на вставки для з'єднання мідного та алюмінієвого шинопроводу (рис. 1).

Другий – виготовлення апаратного затискача складної конфігурації (рис. 2) шляхом сплавлення алюмінієвої трубки з плоскою алюмінієвою частиною і плакування плоскої частини міддю за допомогою зварювання вибухом. У цьому випадку доцільно проводити сплавлення і плакування вибухом відразу декількох виробів з подальшим розрізанням на окремі апаратні затискачі.

Третій – зварювання вибухом біметалевого листа, вирізка з нього плоских заготовок необхідного розміру і подальша приварка плавленням до алюмінієвого шару трубок з алюмінію.

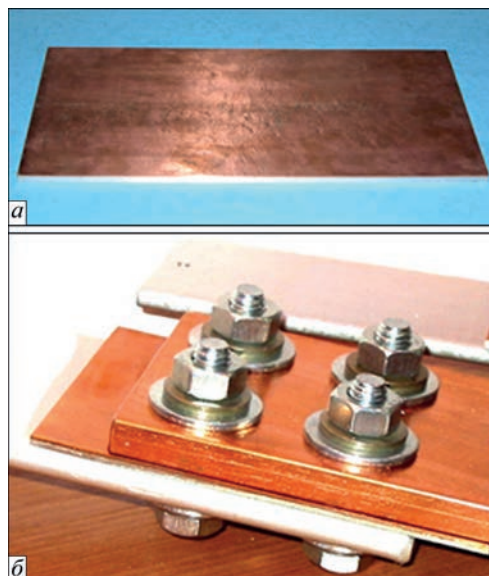


Рис. 1. Біметалева Al–Cu пластина (а) і загальний вигляд з'єднання алюмінієвої і мідної шини через вставку (б)

Бризгалін А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-5886-3069>, Шльонський П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3566-1752>, Пекар Є.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-5025-4445>

© Л.Д. Добрушин, А.Г. Бризгалін, П.С. Шльонський, Є.Д. Пекар, С.Д. Венцев, 2021

Відпрацювання зазначених технологічних процесів проводили з використанням наступних матеріалів: прокат міді та алюмінію у вигляді ли-

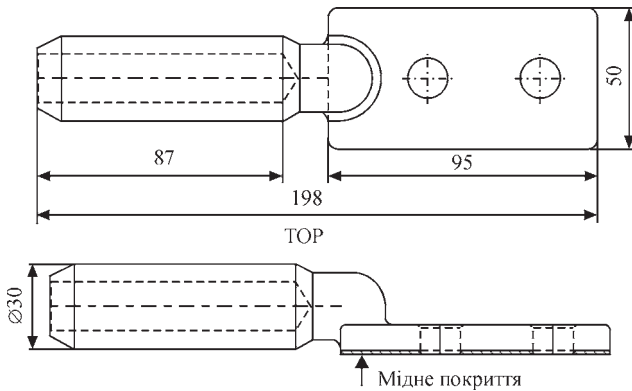


Рис. 2. Загальний вигляд апаратного затискача

ста і заготовки з литого алюмінію. Всі матеріали технічно чисті, призначені для електричних провідників. Хімічний склад і механічні властивості мідних та алюмінієвих листів в стані поставки наведені в табл. 1–3 [3].

Механічні властивості з'єднання Al–Cu після зварювання вибухом (міцність на відрив і зріз) повинні бути не нижче, ніж у алюмінію в стані поставки.

Для дослідження механічних характеристик отриманого вибухом біметалу Al–Cu проводились випробування на відрив і зріз [4].

Випробування при статичних навантаженнях роблять на розривних машинах. При випробуванні на відрив по кільцевому контуру (рис. 3) зразок встановлюють на кільцеву опору і пуансоном прикладають навантаження до відриву нижнього шару.

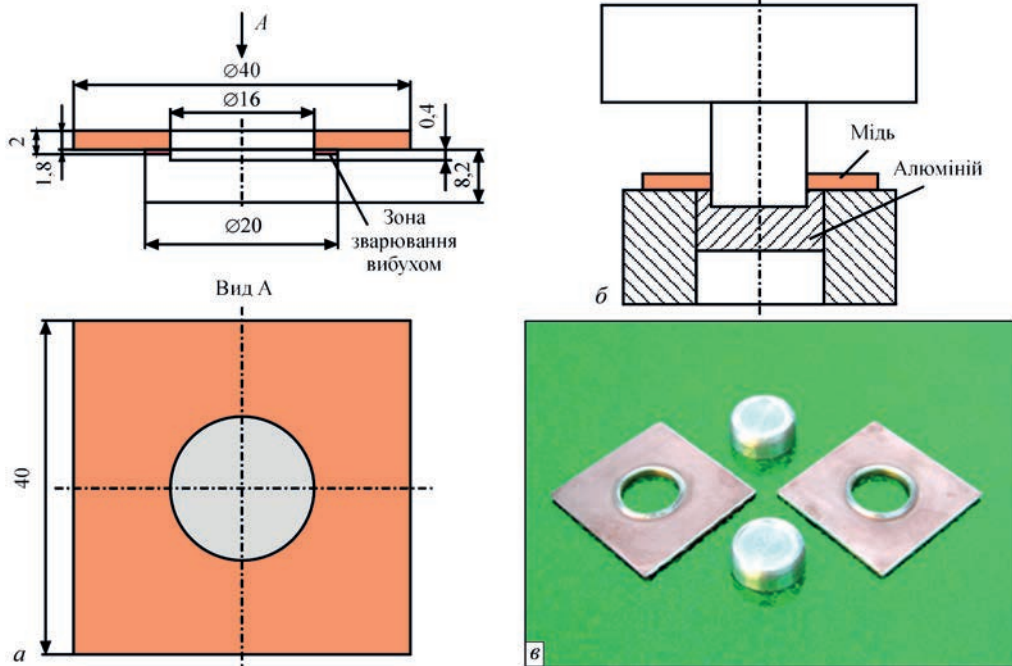


Рис. 3. Випробування на відрив шарів: а – геометрія зразка; б – схема випробування; в – зразок після випробування

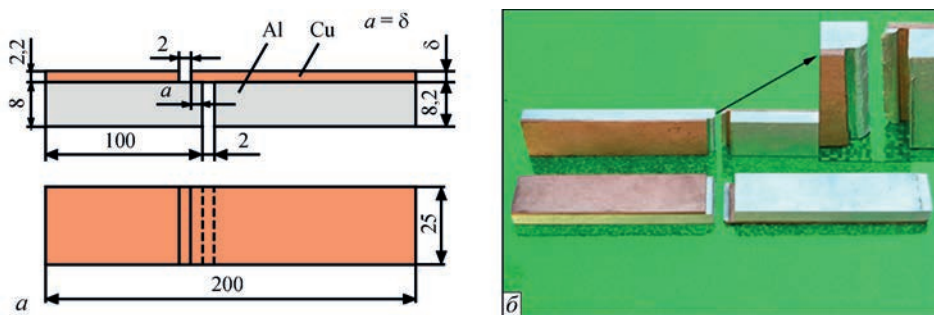


Рис. 4. Випробування зразків на зріз: а – геометрія зразка; б – зразок після випробування

Таблиця 1. Хімічний склад алюмінію, мас. %

Матеріал	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Zn	Ga
Алюміній (99,61 %)	0,08	0,27	0,006	0,002	0,0008	0,011	0,005	0,01

Таблиця 2. Хімічний склад міді, мас. %

Матеріал	Fe	Sb	Ag	Ni	Pb	Sn	O
Мідь (99,918 %)	0,0002	0,0014	0,015	0,0141	0,0069	0,0084	<0,01

Таблиця 3. Механічні властивості алюмінію і міді

Матеріал	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Al	60	-	25
Cu	235	-	45,5

Видно, що відрив стався на основному матеріалі (алюмінії), що є свідченням міцності з'єднання.

Випробування міцності біметалу на зріз проводилося шляхом розтягування плоских зразків з поперечними надрізами шарів (рис. 4).

Крім дослідження механічних властивостей проводилися випробування біметалу на вигин (рис. 5). При таких випробуваннях в разі поганої якості зварювання відбувається розшарування зразка по зоні з'єднання.

Також проводився ультразвуковий контроль біметалу відповідно до стандарту DIN 54 123. Використовувався прилад Ейнштейн 2 з прямим ультразвуковим датчиком. Для тарювання приладу був виготовлений зразок із штучними дефектами. Слід зазначити, що при проведенні цих досліджень ні в одному випадку не було виявлено дефектів на кордоні з'єднання мідь-алюмінії, які були отримані зварюванням вибухом.

Металографічні дослідження проводилися за стандартною методикою за допомогою мікроскопа Неофот-32. Фотографування мікроструктур здійснювалося за допомогою камери CMOS (фірма KONUS, Італія) з розеткою USB.

Розглянемо особливості запропонованих способів отримання перехідників для з'єднання мідних і алюмінієвих струмопроводів.

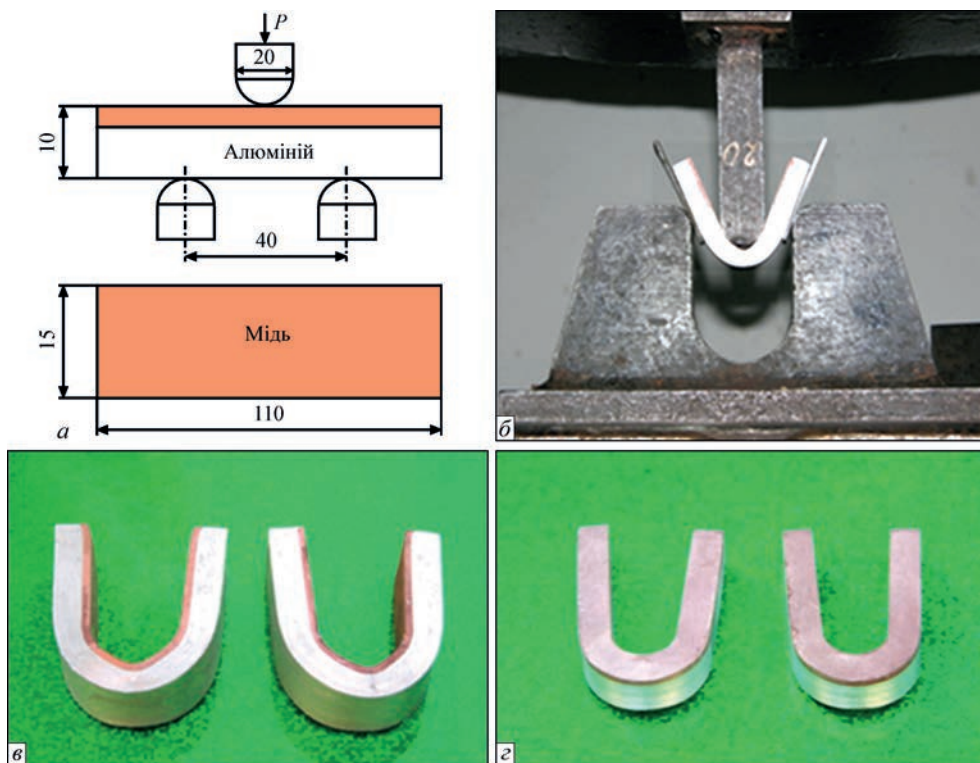


Рис. 5. Випробування на вигин: а – схема випробування; б – процес випробування; в, г – зразки після випробування в двох перетинах біметалу

1. Біметалеві Al–Cu вставки для з'єднання алюмінієвого та мідного шинопроводів.

Біметалеві вставки використовуються для забезпечення контакту між однойменними металами (Al + Al, Cu + Cu) при з'єднанні шин з алюмінію і міді. Вони зазвичай виготовляються зварюванням вибухом з товщиною листа 8...10 мм, потім виконують прокатку на холодну до необхідної товщини (2,0...2,5 мм), внаслідок чого поверхня біметалу стає чистішою без зниження його міцності та електрофізичних властивостей. З отриманих смуг вирубується вироби з потрібною для замовника геометрією. Наприклад, біметал з товщиною алюмінію 8 мм і товщиною міді 2 мм прокатується до товщини 2,5 мм зі збереженням співвідношення шарів.

Неплощинність біметалевого листа розміром 500×250 мм після зварювання вибухом і прокатки становила не більше 3 мм, відхилення по товщині не більше 0,25 мм.

2. Розробка технології плакування апаратних затискачів складної конфігурації.

Одним з можливих варіантів використання зварених вибухом мідно-алюмінієвих деталей в силових електричних ланцюгах можуть служити алюмінієві кабельні накінцівники, плаковані тонким шаром міді, що використовуються для з'єднання плоских мідних шин електричних машин з багатожилевими алюмінієвими кабелями круглого перетину.

З метою підвищення продуктивності і зниження вартості кінцевої продукції вісім елементів

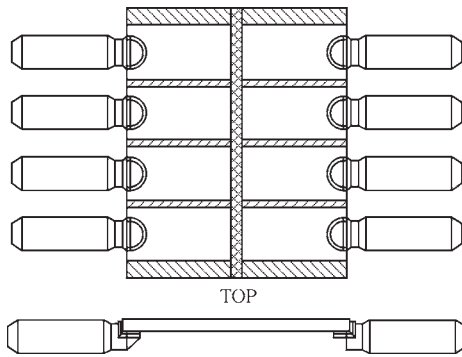


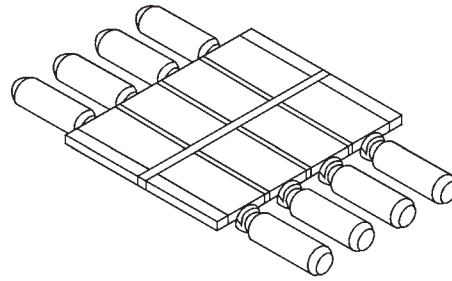
Рис.6. Вісім заготовок апаратних затискачів, відлиті разом

були залиті розплавленим алюмінієм в одну заготовку (рис. 6).

Плакування вибухом плоскої частини такої алюмінієвої заготовки мідною пластиною без вжиття заходів щодо запобігання деформування під час вибуху призвело до негативного результату, сталося руйнування заготовки (рис. 7).

У зв'язку з цим було запропоновано зміцнювати заготовку, заливаючи її сплавом Вуда. В цьому випадку процес підготовки і плакування вибухом повинен здійснюватися в наступній послідовності:

- виготовлення сталевий матриці (коробки) з розмірами, що дозволяють розміщувати всередині неї алюмінієву заготовку з зазором 5...10 мм від краю. Висота матриці повинна дорівнювати висоті алюмінієвої заготовки;
- підігріти матрицю до 120 °С. Розплавити сплав Вуда, який був обраний завдяки його низькій температурі плавлення (69 °С), простір між алюмінієвою заготовкою і матрицею заповнити розплавом Вуда і охолодити на повітрі;



- плоску поверхню алюмінієвої заготовки очистити від забруднень механічно, протерти розчинником;
- підготувати мідну пластину на 20...30 мм довше алюмінієвої плоскої частини для забезпечення нависання, що знижує деформацію при зварюванні вибухом;
- зварювання вибухом;
- виплавити сплав Вуда і очистити заготовку (рис. 8). Розрізання заготовки на окремі апаратні затискачі.



Рис. 7. Відрив трубних елементів під час зварювання вибухом

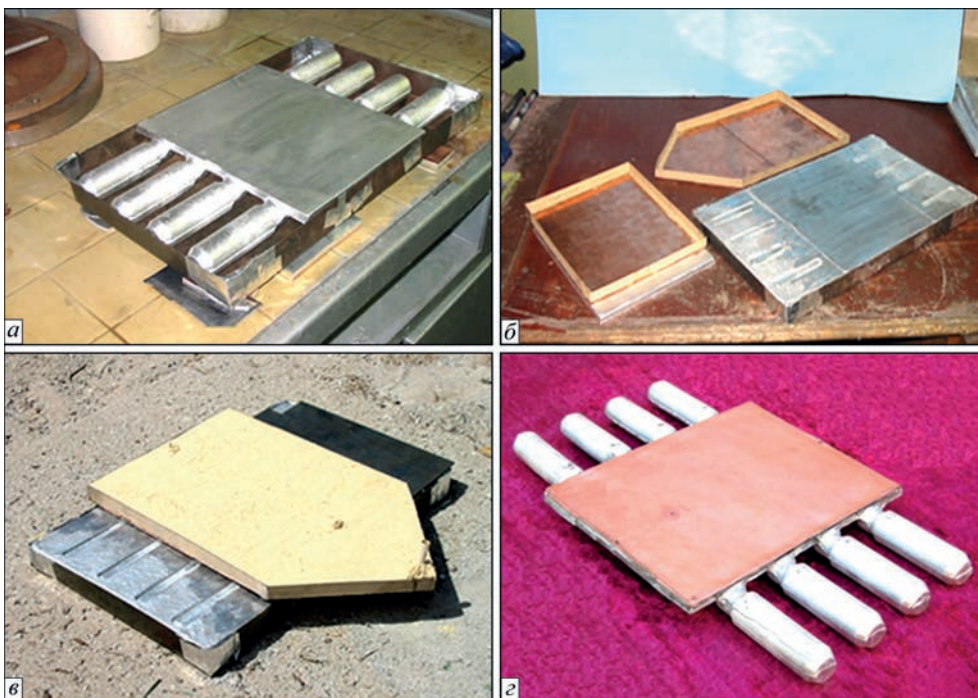


Рис. 8. Загальний вигляд до (а) і після (б) заливки сплавом Вуда, який повністю заповнив простір між матрицею і алюмінієвою заготовкою і тим самим утворив монолітну заготовку для зварювання вибухом; в – установка мідної пластини з вибуховою речовиною для подальшого плакування вибухом; г – заготовка з декількох обтискних клем перед розрізанням



Рис. 9. Апаратні затискачі, виготовлені за комбінованою схемою – зварювання вибухом + дугове зварювання

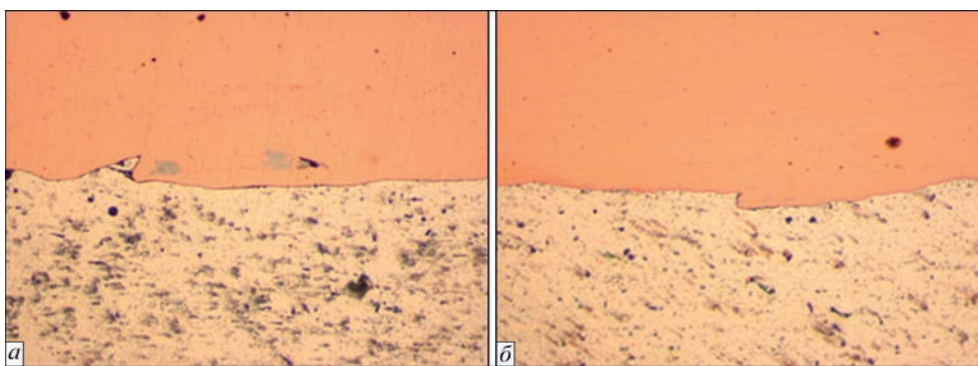


Рис. 10. Типова мікроструктура межі з'єднання Al–Cu: а – після зварювання вибухом; б – після прокатки біметалу

Вироби, отримані таким способом, мають достатню якість, проте висока трудомісткість робить його малопродуктивним.

3. Комбінована технологія.

Апаратні затискачі можуть бути виготовлені шляхом приварки зварюванням плавленням трубних елементів з алюмінію до алюмінію біметалевого листа (рис. 9). В цьому випадку техпроцес зварювання вибухом спрощується і зводиться до зварювання листів міді та алюмінію без використання додаткових пристосувань і матеріалів. Додаткова операція, дугове зварка алюмінію, вимагає спеціального обладнання і високої кваліфікації зварника. Нагрівання понад 180 °С протягом більше 30 хв створює умови для зростання інтерметалідів на кордоні з'єднання Al–Cu. При цьому таке зростання інтерметалідів спостерігається на малій площі поблизу дугового зварного з'єднання і не впливає на загальну провідність апаратного затиску.

Результати механічних випробувань показані в табл. 4 та 5.

Мікроструктура отриманого з'єднання показана на рис. 10.

Проведені випробування показали, що механічні характеристики біметалу не нижче алюмінію в стані поставки, що відповідає висунутим вимогам. Високу якість з'єднання підтверджено випро-

Таблиця 4. Результати випробувань біметалу на розтягнення

Позначення зразка	Величина навантаження, Н	Площа випробуваного кільця, мм ²	Межа міцності, МПа
T1	12528	109,9	114
T2	12830	108,9	117,8
T3	13130	113,1	116
T4	13177	108,9	121

Таблиця 5. Результати випробувань біметалу на зріз

Позначення зразка	Величина навантаження, Н	Площа випробуваної зони, мм ²	Межа міцності, МПа
S1	4600	49,8	92
S2	3820	49,8	77
S3	4020	49,8	80,7
S4	4300	49,8	86,3

буваннями на вигин, не відбулося жодного випадку розшарування біметалу. На кордоні з'єднання Al–Cu спостерігається незначна кількість інтерметалідів (сірі плями на тлі міді, рис. 10), які в невеликій кількості не можуть впливати на електропровідність біметалу в цілому.

Слід зазначити, що зварювання вибухом є досить ефективним і в багатьох випадках безальтернативним способом виготовлення біметалевих перехідників високої якості для електротехнічних потреб.

При необхідності зварювання вибухом може забезпечити практично будь-яке поєднання металів в біметал, від м'якого срібла до одержуваних порошковою металургією листів вольфраму.

Список літератури

1. Рыжов С.Б., Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Банюк Г.Ф. (2004) *Стали и сплавы энергетического оборудования*. Москва, Машиностроение.
2. Лысак В.И., Кузьмин С.В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение.
3. (2008) *Цветные металлы и сплавы. Справочник*. Москва, Машиностроение.
4. Коновалов Д.А., Веретенникова И.А. (2018) Исследование механических свойств биметалла, полученного сваркой взрывом, при поэтапной пластической деформации. *Письма о материалах*, 8, 2, 215–219.

References

1. Ryzhov, S.B., Zubchenko, A.S., Kashirsky, Yu.V., Banyuk, G.F. (2004) *Steels and alloys of power engineering equipment*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

- Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- (2008) *Non-ferrous metals and alloys: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Konovalov, D.A., Veretennikova, I.A. (2028) Study of mechanical properties of bimetal produced by explosion welding at step-by-step plastic deformation. *Pisma o Materialakh*, 8(2), 215–219 [in Russian].

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING HARDWARE CLAMPS, USING EXPLOSION WELDING

L.D. Dobrushin, A.G. Bryzgalin, P.S. Shlonskiy, E.D. Pekar, S.D. Ventsev

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Joining copper and aluminium current-conducting elements is quite often applied in electrical industry. Direct contact of such elements without welding is accompanied by running of electrochemical corrosion and resultant increase of transient resistance, which rises during operation. Any kind of welding these materials leads to formation of intermetallics of AlCu type, which can affect (or not affect) the electrical properties of the joint. Explosion welding is the most efficient method to produce copper-aluminium electric conductors with higher performance. The need to manufacture bimetal copper-aluminium products of various shapes by explosion welding requires development of the respective technological processes. 4 Ref., 5 Tabl., 10 Fig.

Keywords: electric conductor; electric resistance; bimetal transition piece, composite joint, explosion welding, copper-aluminium transition piece

Надійшла до редакції 03.07.2021

Прилад для безконтактного вимірювання механічних напружень у виробках із феромагнітних сталей

Призначення: безконтактне вимірювання залишкових і робочих напружень конструкцій із феромагнітних сталей.

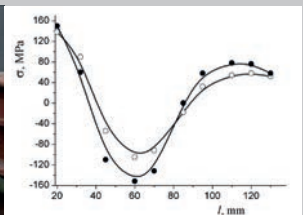
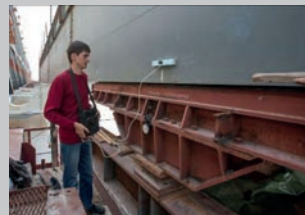
Основні технічні характеристики та переваги:

- прилад дозволить вимірювати залишкові і робочі механічні напруження магнітоанізотропним методом;
- робочі частоти збудження магнітоанізотропного вихрострумового давача від 1 до 50 кГц залежно від глибини контрольованої зони;
- на відміну від методу свердлення отворів є неруйнівним;
- на відміну від резистивного методу є безконтактним і мобільним.

Особливості функціонування:

- магнітоанізотропний метод базується на застосуванні зворотного магнітострикційного ефекту;
- в розробці буде використано новий спосіб, що зменшує вплив гістерезису на результати вимірювання;
- прилад може бути використаний під час будівництва та експлуатації мостів, для визначення залишкових напружень зварних швів, для контролю залишкових напружень залізничних рейок та коліс тощо.

Стан розробки: створено експериментальні макети приладів і магнітоанізотропних перетворювачів, які випробувано під час насування пролітної будови моста методом насування.



Розподіл залишкових напружень в зоні кільцевих швів труб, отриманий магнітоанізотропним методом (○) і методом свердлення отворів (●)

Пропозиції по співробітництву. Прилад може знайти застосування в будівництві, на МК «Азовсталь», ДП «Укрзалізниця», трубопровідному транспорті, підприємствах нафтогазової галузі тощо.

Вихрострумовий дефектоскоп з автоматичним налаштуванням на заданий рівень чутливості

Призначення: безконтактне виявлення поверхневих дефектів (в тому числі втомного і корозійного походження, в різних конструкційних магнітних і немагнітних матеріалах за допомогою вихрострумового давача локального типу).

Основні технічні характеристики та переваги:

- виявлення коротких тріщин довжиною більше 1 мм з глибиною більше 0,2 мм (залежно від вибраного типу давача), в тому числі через лакофарбове покриття товщиною до 0,5 мм;
- нечутливість до впливу зміни зазору та нахилу давача відносно контрольованої поверхні під час сканування;
- автоматичне налаштування;
- можливість відстроювання від впливу краю;
- зручна світлова і звукова сигналізація про наявність дефекту.

Особливості функціонування:

- в дефектоскопі реалізовано запатентовані способи реалізації режиму переривчастої генерації автогенератора;
- інтелектуалізація процесів налаштування дозволяє збільшити достовірність виявлення дефектів за рахунок часткової заміни процедур, що виконуються оператором;
- на відміну від попередніх розробок має можливість автоматичного налаштування на попередньо визначений рівень чутливості, який висвітлюється додатковим індикатором;



Вихрострумовий контроль вузлів авіаційної техніки

- має можливість контролювати з відлаштуванням від краю виробу, в тому числі зону заклепок;
- забезпечує можливість контролювати литво за допомогою спеціального давача.

Галузі застосування: авіація, космічне машинобудування, хімічна промисловість, нафтогазова галузь, машинобудування, енергетика тощо.

Стан розробки: виготовлено діючий зразок дефектоскопа, випробувано в умовах ДП «АНТОНОВ».

Пропозиції по співробітництву. Дефектоскоп та розроблені на його основі методики можуть знайти застосування на авіаремонтних підприємствах, енергогенеруючих компаніях тощо.



Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, вул. Наукова, 5
E-mail: vuchanin@gmail.com