

ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д16 ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МІКРОЛЕГУВАННЯМ МЕТАЛУ ШВА

Т.М. Лабур, В.А. Коваль, М.Р. Яворська

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

Наведено результати дослідження з використання двох ізольованих присадних дротів або закладних елементів різного хімічного складу на особливості формування швів алюмінієвого сплаву Д16 при зварюванні плавким електродом. Оцінено дроти марок Зв1201, ЗвАК5, ЗвАК12 діаметром 1,6 мм та закладні елементи, вирізані із заготовок сплавів В92, В96 та 7056 з різним вмістом цинку. Показано, що зниження протяжності кристалізаційних тріщин та кількості пор в зварних з'єднаннях забезпечує дріт ЗвАК5, а при введенні в шви цинку зростає міцність зварних з'єднань. Бібліогр. 15, табл. 5, рис. 5.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, дугове зварювання, плавкий електрод, зварні з'єднання, присадні дроти, структура, кристалізаційні тріщини, механічні властивості, дослідження

Вступ. При зварюванні сплаву Д16 системи легування Al–Cu неплавким електродом вздовж осі шва і в зоні сплавлення з основним металом спостерігаються кристалізаційні тріщини. Якість з'єднань при цьому зменшується. Причинами такого явища є розміри температурного інтервалу крихкості та низька пластичність металу в цій області, особливо, коли сплав знаходиться у стані T1, тобто після штучного старіння [1–8]. Водночас широке промислове застосування сплаву в конструкціях літальних апаратів зумовлює потребу більш ретельного дослідження технологічних можливостей зварювання цього сплаву плавким електродом.

Слід зазначити, що наявність деяких елементів (заліза, міді, кремнію тощо) викликає неоднорідність розподілу в структурі алюмінієвих сплавів, яка часто спостерігається в їхніх напівфабрикатах, і призводить при зварюванні плавленням до утворення легкоплавких евтектик в міжзеренному і міжкристалітному просторі, розширює інтервал кристалізації та тим самим викликає зростання чутливості сплаву до термічного циклу зварювання. Схильність металу шва до утворення кристалізаційних тріщин при цьому збільшується. Розміри тріщин залежать від теплофізичних умов зварювання плавким або неплавким електродом, які визначають характер розподілу первинних фазових виділень.

Відомо [4, 9, 10], що процес кристалізації металу шва має переривистий характер, пов'язаний з різкою зміною швидкості кристалізації та температурного градієнта. Зростання динаміки процесу призводить до виникнення осередків переходу від одного виду кристалізації до іншого не лише в центрі зварного шва, а й в зоні сплавлення. Основними фазами виділення при технологічному нагріванні сплаву є CuAl_2 (θ)-фаза і

Al_2CuMg (S)-фаза. У разі співвідношення легуючих елементів $\text{Cu/Mg} \leq 2,6$ в структурі спостерігається утворення S-фази, яка є необхідною для зміцнення сплаву Д16 фазовим утворенням. При співвідношенні $\text{Mg/Si} = 1,73$, крім того, виділяється фаза Mg_2Si . Як правило, такі переходи виникають при зварюванні сплавів з відносно високим вмістом легуючих елементів і домішок. Останні, в свою чергу, впливають на форму й дисперсність евтектичних виділень в структурі швів [1–7]. Форма і дисперсність виділень зумовлена швидкістю кристалізації металеві ванни. У разі її збільшення процес дифузії домішок на міжфазній межі скорочується, що звужує стінки чарунок кристаліту. Виділення евтектичної фази переважно відбувається на міжкристалітній границі, особливо при малій швидкості зварювання. При заданому режимі зварювання швидкість кристалізації відносно ширини зварного шва змінюється в широких межах. Характер фазових виділень значно змінюється при зростанні кристалітів. У цьому випадку в центрі шва, де швидкість кристалізації вища, спостерігаються евтектичні виділення з більш тонкими стінками міжкристалітних шарів, а ширина чарунок менша, ніж біля межі сплавлення.

На процес кристалізації металу шва впливають характер розподілу первинних фазових виділень в основному металі та теплофізичні умови зварювання плавким електродом [4–13]. При цьому динамічність процесу кристалізації при охолодженні зварювальної ванни призводить до виникнення осередків переходу від одного виду кристалізації до іншого. Подібні переходи відбуваються при зварюванні сплавів з відносно високим вмістом легованих елементів і домішок, що позначається на формі й дисперсності фазових виділень в структурі швів.

Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>, Коваль В.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5154-1446>,

Яворська М.Р. – <https://orcid.org/0000-0003-2016-6289>

© Т.М. Лабур, В.А. Коваль, М.Р. Яворська, 2022

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) та механічні властивості сплаву Д16 завтовшки 6 мм

Mg	Cu	Mn	Si	Fe	Zn	E, ГПа	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,01}$	$\delta_5, \%$
							МПа			
1,4...1,7	4,0...4,5	0,34...0,53	0,16...0,19	0,21...0,22	0,07...0,11	67...71	217...221	106...115	79...89	16...18

Мета роботи та методика експериментів. Одним з можливих шляхів поліпшення однорідності структури швів алюмінієвого сплаву Д16 товщиною 6 мм (табл. 1) може бути одночасне залучення двох ізольованих присадних дротів чи закладних елементів з різним хімічним складом в зварювальній ванні. При цьому створюються умови фізико-хімічної взаємодії легуючих елементів і домішок основного металу та присадних дротів, що сприяє появі евтектик збалансованого складу та поліпшує однорідність структури швів. Тому метою даної роботи є виявлення особливостей структури швів, отриманих двома присадними дротами або закладними елементами (рис. 1). Один дріт марки Зв1201, хімічний склад якого близький до сплаву Д16, буде безпосередньо подаватися в зону горіння дуги, а інший – в головну частину зварювальної ванни, що відповідає технології з'єднання неплавким електродом.

Перенесення крапель рідкого металу до загальної ванни сформує необхідний об'єм шва, а подача додаткового дроту дозволить модифікувати його структуру. Ефективність такого технологічного рішення оцінено за допомогою порівняння зі структурою, отриманою традиційним шляхом. Для визначення компонентів раціонального модифікування структури швів та отримання необхідного співвідношення легуючих елементів досліджено вплив кількох варіантів серійних присадних матеріалів та обрано найбільш ефективні, обґрунтовані методологією дослідження параметрів міцності та пластичності металу зварних з'єднань, які забезпечують надійність зварної конструкції.

Обрано варіанти дослідних матеріалів зі сплавів різних систем легування, а саме: серійні дроти системи легування Al–Si ЗвАК5, ЗвАК12, що утримують кремній, а також закладні елементи зі сплавів В92, В96 і 7056, які утримують цинк. Наявність у складі додаткового дроту легкоплавкого кремнію дозволить дещо підвищити температуру нерівновісного солідуса та зменшити інтервал твердорідкого стану металу. Наявність цинку сприятиме зростанню рівня міцності швів з'єднань.

В ході дослідження застосовано такі технологічні варіанти: Зв1201+ЗвАК5; Зв1201+ЗвАК12; Зв1201+В92; Зв1201+В96; Зв1201+7056, результати порівнювали із з'єднаннями, отриманими з використанням одного серійного дроту системи легування Al–Cu марки Зв1201. На основі аналізу особливостей структури і механічних властивостей зразків, вирізаних у різних ділянках зварних швів, планується встановити оптимальне сполучення хімічного складу присадних дротів, що залучаються для зварювання, при використанні яких можна отримати нерознімні з'єднання сплаву Д16 відповідно до вимог і призначення конструкції.

Для реалізації процесу вдосконалено технологічне обладнання одночасного механічного подання двох дротів у загальну ванну, умови синхронізації подання дротів і відпрацьовано режими процесу з'єднання сплаву Д16. Аналіз хімічного складу дротів і закладних елементів проводили спектральним методом, використовуючи обладнання «Спектравак-1000» фірми «Baird» (табл. 2).

Перед зварюванням заготовки обробляли у 10%-му розчині NaOH і освітлювали у 13%-му

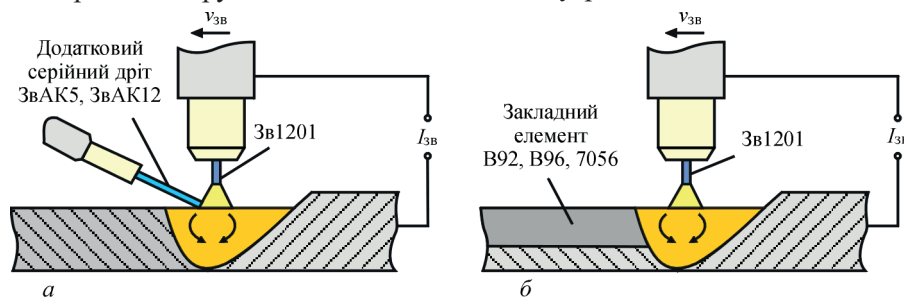


Рис. 1. Технологічні варіанти виконання зварювання сплаву Д16 двома присадними дротами (а) та закладними елементами (б) для легування металу шва і підвищення механічних властивостей

Таблиця 2. Хімічний склад досліджуваних присадних матеріалів, мас. %

Марка присадного матеріалу	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Ti	Zn
Зв1201(Al–Cu)	0,16	0,14	3,8	0,42	0,7	0,08	0,02...0,1	–
ЗвАК5 (Al–Si)	0,70	0,15	3,8	0,42	0,63	0,08	0,15	–
ЗвАК12 (Al–Si)	1,8	0,23	3,0	0,37	0,60	0,07	0,15	–
Закладний елемент зі сплаву В92 (Al–Mg–Zn)	0,17	0,35	2,80	0,31	1,0	–	0,01	0,50
В96 (Al–Zn–Cu–Mg)	0,15	0,14	2,90	0,32	1,0	–	0,04	2,6
7056(Al–Zn–Cu–Mg)	0,13	0,10	2,80	0,31	0,76	–	0,06	2,4

розчині HNO_3 . Зварювання заготовок виконували в горизонтальному положенні плавким електродом з використанням дослідних матеріалів. Дроти подавали у ванну відповідно до стандартних вимог, тобто безпосередньо з її лицевої поверхні.

Для розширення технологічних варіантів застосовували закладні елементи розміром $2 \times 2 \times 2,5$ мм, які розташовували у нижній ділянці стику, оскільки дротів з цинком не існує. Обрано сплави В92, В96 та 7056 з різним вмістом цинку. Хімічні елементи (цинк, магній, мідь, марганець, цирконій), що входять до складу цих сплавів, забезпечують фізико-хімічні умови формування дрібнозернистої структури металу швів при зварюванні та значний ефект їхнього зміцнення за умов подальшої термічної обробки [4–9].

Погонну енергію зварювання обирали за умови мінімального значення електричного струму, необхідного для повного проплавлення сплаву. Тому процес здійснювали на режимі $I_{зв} = 240 \dots 250$ А, $U_d = 20 \dots 21$ В, $v_{зв} = 31 \dots 33$ м/год. Ширина швів з лицевого боку зварювання та проплавлення була майже однаковою та знаходилась у межах $9 \dots 11$ мм. Процес здійснювали із застосуванням формувальної підкладки, оскільки відомо, що за умов її наявності процес кристалізації зростання стовбчастих кристалітів має двовимірний напрям, що впливає на якість швів. Модуляція головних параметрів режиму з періодом тривалості циклів $2,2 \pm 0,2$ с створювала відповідні теплофізичні умови для покращення керування процесом перенесення крапель з основного дроту, отримання належної форми зварювальної ванни та утворення структури швів. Разом це забезпечувало збільшення кількості пересиченого твердого розчину, зростання щільності виділень дисперсних часток зміцнювальної фази під час наступного етапу (розпаду твердого розчину), поліпшення механічних властивостей з'єднань [5–7].

Якість формування швів стикових з'єднань сплаву Д16 оцінювали візуально та методом рентгенографії (ГОСТ 7512 [13]) на рентгенівській установці РАП-150/300. Щільність металу шва контролювали на приладі «Денситометр ДП-30».

Зі зварених стиків виготовляли зразки для механічних випробувань згідно з нормативними документами. Механічні випробування проводили відповідно до ГОСТ 1497 [14] і ГОСТ 6996-66 [15] на машині «Інстрон-1126» зі швидкістю переміщення траверси 6 мм/хв. Під час випробувань за допомогою персонального комп'ютера безперервно реєстрували показники навантаження та деформації, за результатами яких розраховували відповідні показники тимчасового опору розриву (межу міцності зварних з'єднань ($\sigma_{Б}^{зв.з}$) та металу шва ($\sigma_{Б}^{м.шва}$)).

Металографічний аналіз основного металу і зварних з'єднань виконували за допомогою мі-

кроскопа «ММТ-1600В». Дослідження проводили на шліфах, вирізаних поперек прокату листів. Мікроструктуру виявляли електролітичним поліруванням в розчині такого складу: хлорна кислота – 1000 см^3 + крижана оцтова кислота – 75 см^3 .

Результати та їх обговорення. На підставі аналізу отриманих результатів визначено ефективність досліджуваних присадних дротів для зварювання сплаву Д16, їхній вплив на механізм формування швів, коефіцієнт їхньої форми, рівень механічних властивостей та особливості структури зварних з'єднань залежно від хімічного складу.

Металографічними дослідженнями мікроструктури зварних з'єднань встановлено, що спостерігається значна кількість виділень пересичених фаз, які утримують мідь. Під дією термічного циклу відбувається їхній розпад, який супроводжується утворенням і коагуляцією зміцнювальних фаз, а також їхнім розчиненням в твердому розчині алюмінію.

Зварні шви щільні, грубої пористості в металі шва та зоні сплавлення не спостерігається (рис. 2–4), але відзначається наявність легкоплавких евтектик у міжзерненому та міжкристалітному просторі, що може свідчити про неоднорідність розподілу заліза, міді, кремнію в структурі. Температура утворення евтектик, їхній склад і кількість є визначальними факторами при виборі температури нагрівання для гартування та гарячої деформації [1–4]. Вони є також основними факторами, які визначають поведінку цих сплавів при зварюванні плавленням [1, 3, 11, 12]. Згідно з даними аналізу мікроструктури виділення евтектичної фази фіксуються переважно на міжкристалітній межі. Оскільки при заданому режимі зварювання швидкість кристалізації відносно ширини зварного шва змінюється в широких межах, тому спостерігається значна зміна характеру фазових виділень в міру зростання кристалітів. Евтектичні виділення в центрі шва, де швидкість кристалізації вища, мають більш тонкі стінки міжкристалітних шарів, а ширина чарунок менша, ніж біля межі сплавлення. Біля зони сплавлення з основним металом спостерігається часткове розплавлення, відзначається збільшення легкоплавких евтектик, що є особливістю класу дуралюмінів.

Порівняльний аналіз структури швів сплаву Д16, отриманих обома технологічними варіантами, свідчить, що в досліджуваних швах відбувається зміна розподілу рідкої евтектичної фази (рис. 2–4). Це може бути зумовлено зміною температурних інтервалів їхньої кристалізації завдяки додатковому модифікуванню структури швів. Протяжність кристалізаційних тріщин та кількість пор в зварних з'єднаннях при цьому зменшується. Введення кремнію у кількості 5 % дало змогу уникнути появи тріщин як у швах, так і вздовж лінії сплавлення завдяки збалансованій кількості

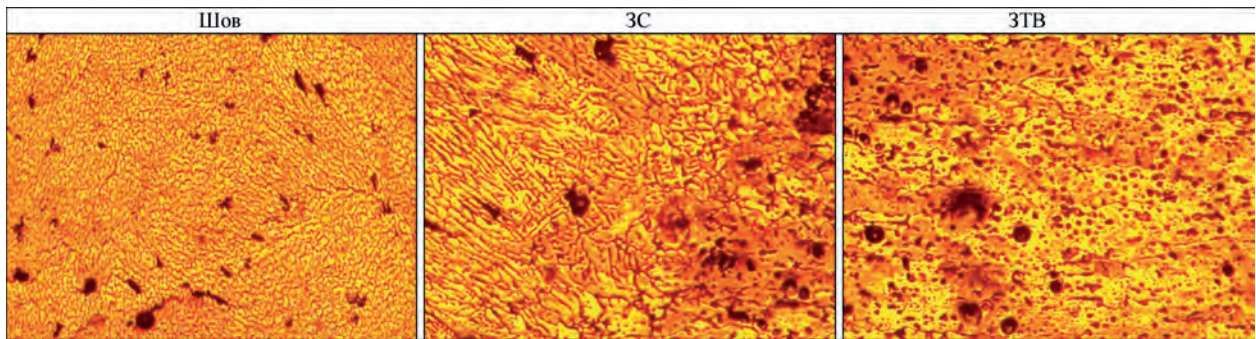


Рис. 2. Мікроструктура зварних з'єднань сплаву Д16, отриманих серійним дротом Зв1201 при зварюванні плавким електродом ($\times 320$)

легкоплавкої евтектики (рис. 3). Це, ймовірно, зумовлено тим, що кремній сприяє зростанню рухливості рідкої евтектики та зниженню температури формування первинних дендритів у швах [4–9, 12]. Застосування дроту ЗвАК12 з більшою кількістю кремнію (12 %) не забезпечує належні умови отримання нерознімного з'єднання, що може бути зумовлено інтенсивним збагаченням кремнієм рідких міжзеренних прошарків у процесі зварювання сплаву. Внаслідок цього спостерігається зростання ширини евтектики прошарків у даній ділянці шва.

Аналіз особливостей структури зварних з'єднань показав, що введення у метал шва цинку, який має температуру плавлення $419\text{ }^{\circ}\text{C}$, також впливає на здатність формування якісного з'єднання. Хімічні елементи цинк, магній, мідь, марганець, цирконій, які входять до складу закладних електродів, діють на структуру по-різному (рис. 4). Об'єм евтектичної фази також збільшується, що обмежує схильність сплаву Д16 до кристалізаційних тріщин як в шві, так і в зоні сплавлення. Завдяки збільшенню кількості легкоплавкої евтектики

та збалансованості її складу забезпечуються умови заліковування кристалізаційних тріщин та пор (табл. 3). При використанні сплавів В92 та В96, в яких відповідно кількість цинку становить 0,50 і 2,4 %, збільшення його кількості у зоні сплавлення призводить до збагачення евтектики на ділянці ЗТВ, де при зварюванні відбувається часткове розплавлення. Це збільшує ширину евтектичного прошарку між зернами. Аналогічне спостерігається також, коли цинку 2,6 % (при технологічному варіанті Зв1201+7056). В усіх швах формується дрібнозерниста структура (рис. 4). Хоча кількість міді коливається в межах від 4,8 до 6,2 %, кремнію – 0,27...2,2 %, цинку – 0,99...3,2 %, їхня комбінація забезпечує значний ефект зміцнення структури швів за умов подальшої термічної обробки зварних з'єднань (табл. 4), що співпадає з результатами, отриманими в роботах [7–10]. Порівняльне оцінювання показало, що при використанні серійних дротів ЗвАК5 і ЗвАК12 з кремнієм міцність зварних з'єднань становить 186...188 МПа. Міцність металу шва при цьому коливається в межах

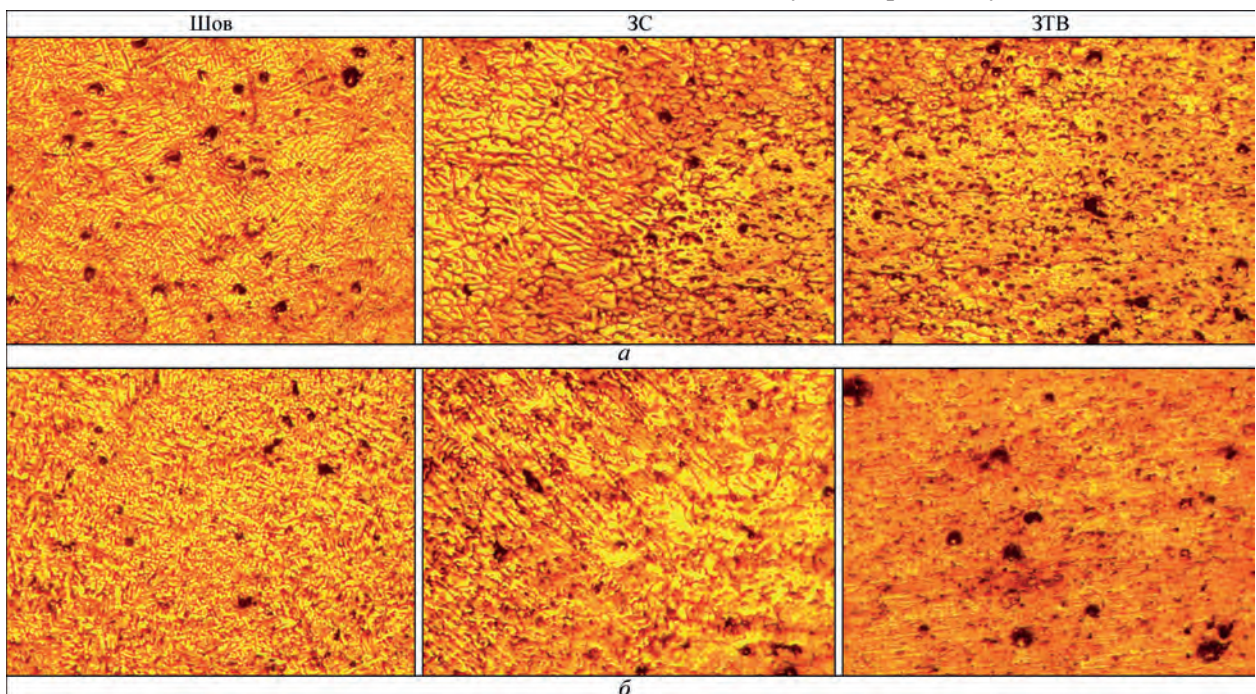


Рис. 3. Мікроструктура зварних з'єднань сплаву Д16, отриманих серійним дротом Зв1201+ЗвАК5 (а) та Зв1201+ЗвАК12 (б) при зварюванні плавким електродом ($\times 320$)

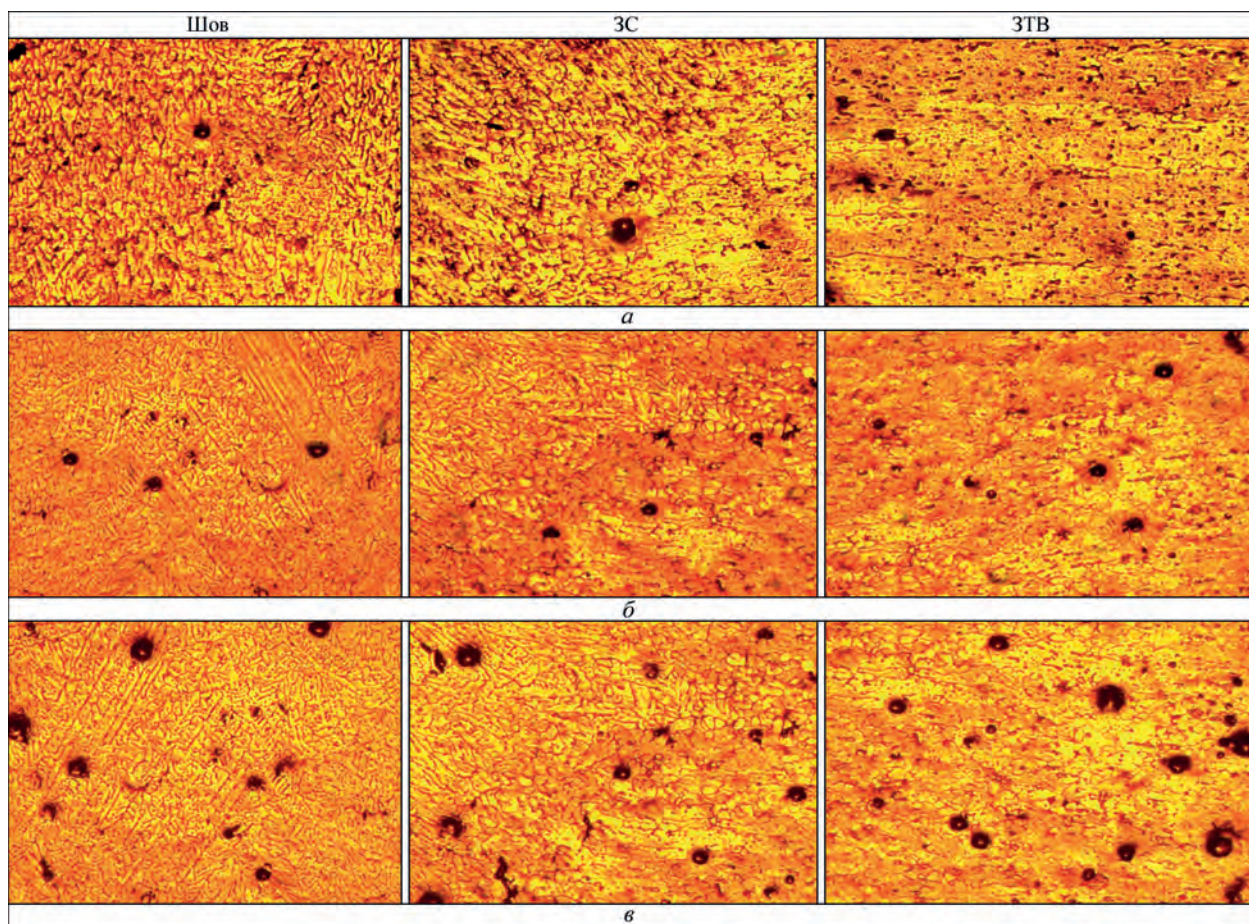


Рис. 4. Мікроструктура зварних з'єднань сплаву Д16, отриманих серійним дротом Зв1201 і закладним елементом зі сплавів В92 (а), В96 (б) та 7056 (в) при зварюванні плавким електродом ($\times 320$)

Таблиця 3. Вміст основних хімічних елементів у металі шва при зварюванні сплаву Д16 плавким електродом двох ізольованих присадних матеріалів в загальну ванну, мас. %

Технологічні варіанти	Fe	Zn	Mn	Si	Mg	Cu	Zr
Зв1201	0,31	–	0,48	0,27	0,93	6,01	0,08
ЗвАК5	0,26	–	0,34	1,02	0,73	4,95	0,08
ЗвАК12	0,32	–	0,37	2,2	0,79	5,29	0,07
Закладний елемент зі сплаву В92	0,65	0,99	0,51	0,21	1,12	5,18	–
В96	0,2	2,25	0,36	0,21	1,16	4,9	–
7056	0,27	3,2	0,3	0,46	1,51	4,81	–

Таблиця 4. Вплив технологічних варіантів на механічні властивості зварних з'єднань сплаву Д16 залежно від хімічного складу закладних елементів* та присадних дротів**

Технологічні варіанти	$\sigma_{\text{в.з}}$, МПа	$\sigma_{\text{в.шва}}$, МПа	α , град
Зв1201 (Al–6,3%Cu–0,3%Mn) – базовий	193,0	186,0	40
Зв1201 + ЗвАК5 (Al–5,5%Si)	188,0	187,0	44
Зв1201 + ЗвАК12 (Al–12%Si)	186,0	180,0	27
Зв1201 + сплав В92 (Al–0,5%Cu–4,2%Mg–3,5%Zn)	190,0	191,0	27
Зв1201 + сплав В96 (Al–2,3%Cu–2,6%Mg–8,5%Zn)	200,0	194,0	36
Зв1201 + сплав 7056 (Al–1,65%Cu–1,8%Mg–9,5%Zn)	190,0	194,0	31

*Руйнування відбувається по основному металу в ЗТВ.

**Руйнування відбувається по осі шва і межі зони сплавлення сплаву Д16.

180...187 МПа (табл. 4). Зазначимо, що в табл. 4 наведено середні значення показників міцності зварних з'єднань і пластичності після механічних випробувань трьох зразків. Показник пластичності (кут загину) становить для зразків, виконаних за технологічною схемою Зв1201+ЗвАК5 44 град, а за схемою Зв1201+ЗвАК12 – 27 град, що може бути зу-

мовлено утворенням поміж кристалітами шва більш широких евтектичних прошарків з низькою когезивною міцністю.

При використанні закладних елементів зі сплавів В92, В96 і 7056, які утримують цинк в якості допоміжного матеріалу, спостерігається суттєве зростання міцності зварних з'єднань. Найбіль-

ше зростання міцності (до 200,0 МПа) як зварних з'єднань сплаву Д16, так і металу шва (до 194,0 МПа) має місце при використанні сплаву В96 за умов збереження показника пластичності (кута згину) на рівні 23 град. Цьому сприяє наявність цинку, який утворює в процесі кристалізації металу шва складні інтерметалідні фазові сполуки такі, як $Mg(Zn_2AlCu)$ і $Mg_3Al_2Zn_3$. Межа показника міцності залежить від хімічного складу матеріалів закладних елементів.

Характер зміни міцності в різних ділянках зварних з'єднань вивчали шляхом вимірювання значень показника твердості в цих зонах, а саме: у шві, зоні сплавлення та ЗТВ (табл. 5). Це зумовлено відомою кореляцією міцності та твердості металу при зварюванні алюмінієвих сплавів [2–4, 9]. Як показав їхній аналіз у стиках в стані після зварювання, тобто без термічної обробки, використання серійних дротів ЗвАК5 і ЗвАК12, що містять відповідно 5 і 12 % кремнію, майже не впливає на рівень твердості у різних зонах з'єднань.

При виконанні процесу зварювання з використанням у якості допоміжного матеріалу закладних елементів зі сплавів В92, В96 і 7056 з різним вмістом цинку, твердість металу в різних зонах з'єднань зростає на 2...5 одиниць порівняно зі з'єднаннями, отриманими з використанням серійних дротів ЗвАК5 і ЗвАК12, що містять кремній. Найбільша відмінність спостерігається у металі шва. Значення твердості визначається кількістю цинку у відповідних допоміжних матеріалах.

У зоні сплавлення різниця в значеннях твердості дорівнює 1...2 одиниці, а в ЗТВ показники майже однакові (табл. 5). Як і в попередньому випадку, після проведення штучного старіння відзначається підвищення на 3...5 % рівня твердості відповідно до кількості цинку в допоміжному матеріалі. Ще більше твердість зростає після проведення операцій повної термічної обробки зварних з'єднань. Аналіз результатів вимірювання твердості свідчить, що такий режим обробки є найбільш прийнятний для отримання високих значень механічних властивостей, а саме належного рівня міцності поряд з достатньою пластичністю, які забезпечать працездатність зварних конструкцій. На це вказує і мікроструктура зразків зварних з'єднань, отриманих двома серійними дротами з кремнієм та закладними елементами з матеріалів, легуваних цинком (див. рис. 2–4).

Рельєф поверхні руйнування зварних з'єднань після механічних випробувань умовно можна розділити на характерні структурні зони: початкову, де зароджується мікротріщина, ділянку стабільного та ділянку прискореного її зростання до утворення магістральної тріщини, поява якої призводить до повного руйнування зразків. Мікрорельєф кожної зазначеної ділянки змінювався під впливом зазначених технологічних факторів. Реалізація процесу зумовлена значною інтенсивністю

Таблиця 5. Вплив хімічного складу присадних дротів з кремнієм та закладних елементів зі сплавів з цинком на твердість зварних з'єднань сплаву Д16 (65...67 НВ), виконаних плавним електродом, МПа

Технологічні варіанти	Шов	ЗС	ЗТВ
Зв1201	88...89	60...89	59...65
Зв1201 + ЗвАК5	89...90	62...87	60...65
Зв1201 + ЗвАК12	88...90	62...87	59...65
Зв1201 + (7056)	90...91	61...87	59...65
Зв1201 + (В96)	89...90	61...85	59...65
Зв1201 + (В92)	89...90	62...88	60...65

Примітки. 1. Твердість НВ зварних з'єднань вимірювали за Брюнелем на приладі «Rockwell» при навантаженні $P = 600$ Н кулькою розміром 1/16". 2. В дужках зазначено марку сплаву, використаного як закладний елемент.

пластичної деформації металу, коли рівень напруження перевищує значення сил когезії матриці та включення в напрямі, перпендикулярному їх границі [9, 12]. Мікротріщини зароджуються на грубих фазових частках та інтерметалідах, що розташовані вздовж границь кристалітів. Довжина тріщин визначається її об'ємною часткою в основному металі. Частково оплавлені зерна основного металу, що розташовані біля зони його сплавлення зі швом, вказують на незначний перегрів металу при зварюванні. При цьому відзначається розвиток неоднорідності за розмірами надлишкових фаз та інтерметалідних скупчень. Зазначене зумовлено відповідною кількістю легуючих елементів і домішок внаслідок їхньої сегрегації вздовж границь кристалітів шва і зерен основного металу, а також утворення окремих ділянок міжзеренних прошарків з пересичених фаз.

На зламі ділянки з плоскими гребнями мають місце слабкорозвинені деформаційні смуги. Чарунки переважно середнього розміру (6...8 мкм), обмежені гребнями відриву та утримують на дні зруйновані включення інтерметалідних фаз. Формування таких локальних осередків руйнування у вигляді чарунок може бути пов'язано з релаксацією компактних скупчень дислокацій високої щільності та утворенням мікропустот у процесі пластичної деформації. Рельєф поверхні руйнування біля устя магістральної тріщини містить також мікронадриви, що виникають вздовж границь кристалітів у процесі гальмування руху тріщин (див. рис. 5). Осередком утворення тріщини є включення, які не розчинюються при зварювальному нагріванні та утворюють інтерметалідні конгломерати. Значна локалізація напруження, особливо в місцях стику зерен, призводить до їхнього руйнування. В'язкі чарунки на рельєфі утримують елементи квазівідколу, що може свідчити про концентрацію пластичних зсувів у окремих найбільш напружених ділянках структури сплаву Д16. Розмір фасеток на поверхні руйнування коливається від 2 до 5 мкм. Малі їх розміри визначаються швидкістю розпаду твердого розчину в умовах зварювання, коли фазові перетворення не встигають розвинути.

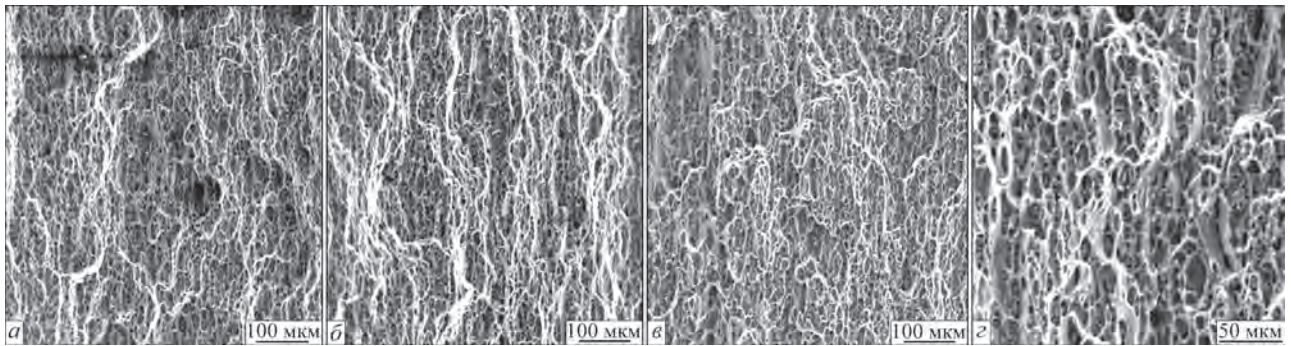


Рис. 5. Панорама поверхні руйнування вздовж осі шва від технологічної опуклості (а), середніх ділянок (б, в) до кореня (з) – з'єднання сплаву Д16, отриманого зварюванням плавким електродом, після механічного випробування ($\times 500$)

Висновки

1. Проведено попередні дослідження зварювання алюмінієвого сплаву Д16 товщиною 6 мм плавким електродом з двома присадними дротами марок Зв1201, ЗвАК5, ЗвАК12 діаметром 1,6 мм, а також закладними елементами зі сплавів В92, В96 та 7056. Дроти подавали в зварювальну ванну безпосередньо з її лицевої поверхні. Визначено оптимальні параметри режиму зварювання: $I_{зв} = 240 \dots 250$ А, $U = 20 \dots 21$ В, $v_{зв} = 31 \dots 33$ м/год. Ширина швів з лицевого боку зварювання та проплавлення в усіх швах була майже однаковою. Наявність кремнію та цинку в присадках сприяє утворенню значної кількості легкоплавкої складової в структурі, що зменшує ризики утворення кристалізаційних тріщин і пор у швах.

2. Структурний аналіз швів сплаву Д16, отриманих різними присадками, показав, що достатня кількість легкоплавкої складової утворюється при застосуванні дроту ЗвАК5 (5 % Si) і дозволяє уникнути дефектів у швах. У разі використання дроту ЗвАК12 (12 % Si) якісного формування шва не спостерігається, що обумовлено збільшенням ширини міжзеренних евтектичних прошарків внаслідок збагачення кремнієм. Аналогічне явище також відбувається при використанні закладних елементів зі сплавів В92, В96 (0,50 і 2,4 % відповідно) та 7056 (Zn = 2,6 %). Кількість цинку впливає на ширину прошарків.

3. Встановлено залежність механічних властивостей з'єднань сплаву Д16 від хімічного складу дротів і закладних елементів. При використанні дротів ЗвАК5 і ЗвАК12 міцність з'єднань становить 186...188 МПа, а металу шва – 180...187 МПа. Показник пластичності (кут згину) становить 44 та 27 град відповідно, що може бути пов'язано з низькою когезивною міцністю евтектичних прошарків. Руйнування з'єднань відбувається в ЗТВ, біля шва, де вздовж границь зерен відзначається крихка інтерметалідна сітка через коагуляцію зміцнювальних фаз. Крім того, відбувається перегрів металу з частковим оплавленням окремих складових та низка структурних перетворень – низькотемпературне повернення, відпал, рекристалізація, часткове загартування. Наявність цинку у закладних елементах підвищує рі-

вень міцності з'єднань до 190...200 МПа та металу шва в межах 191...194 МПа порівняно з дротами, що утримують кремній.

4. Руйнування з'єднань відбувається на грубих фазових частках та інтерметалідах, розташованих вздовж границь кристалітів шва в зоні сплавлення з основним металом. Зазначене визначається об'ємною часткою в основному металі та ефектом модифікування присадками, яке зумовлено наявністю відповідної кількості легуючих елементів і домішок, їхньою сегрегацією, утворенням в структурі окремих ділянок міжзеренних прошарків з пересичених фаз і неоднорідністю надлишкових фаз та інтерметалідних скупчень. Частково оплавлені зерна основного металу, які розташовані біля зони сплавлення сплаву Д16 зі швом, вказують на незначний перегрів металу при зварюванні плавким електродом.

Список літератури

1. Патон Б.Е. (ред.). (1998) *Сварка в самолетостроении*. Киев, МИИВЦ.
2. Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*: Справочник. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, Коминтех.
3. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка.
4. Ищенко А.Я. (2003) Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций. *Прогрессивни матеріали і технології*. Киев, Академперіодика, Т.1, 50–82.
5. Лебедев В.А. (2007) Некоторые особенности дуговой механизированной сварки алюминия с управляемой импульсной подачей электродной проволоки. *Сварочное производство*, II, 26–30.
6. Wenez, A. (2005) Hundertfuntzig Jahre Aluminium. *Der Praktiker*, 5, 74–75.
7. Кононенко В.Я. (2010) *Сварка алюминиевых сплавов*: Справочник. Киев, ЭкоТехнология.
8. Ищенко А.Я., Лозовская А.В. (2001) Улучшение свариваемости алюминиевых сплавов путем оптимизации количества примесей. *Проблемы современного материаловедения: Труды V сессии Научного совета по новым материалам Международной Ассоциации академии наук (12 мая 2000 г., Киев)*. Гомель, ИММС НАНБ, сс. 72–77.
9. Teh, N.J. (2006) Small joints make a big difference. *TWI Connect*, 143, 4, 1–7.
10. Norlin, A. (2000) A century of aluminium – a product of the future. *Svetsaren*, 2, 31–33.
11. Лабур Т.М. (2021) Тенденції технологічного розвитку процесів дугового зварювання для з'єднання сучасних алюмінієвих сплавів. *Зварник*, 6, 6–17.
12. Головатюк Ю.В., Поляцький А.Г., Лабур Т.М., Остап О.П. (2018) Підвищення конструкційної міцності зварних з'єднань сплаву системи Al–Cu–Mg. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 54, 3, 112–119.

13. ГОСТ 7512-82. *Контроль неразрушающий. Сварные соединения. Радиографический метод.*
14. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) *Металлы. Методы испытаний на растяжение.*
15. ГОСТ 6996-66. *Сварные соединения. Методы механических испытаний.* Введ. 01.1967. Москва, Изд-во стандартов.

References

1. (1998) *Welding in aircraft construction.* Ed. by B.E. Paton. Kyiv, MIIVTs [in Russian].
2. Beletsky, V.M., Krivov, G.A. (2005) *Aluminium alloys (composition, properties, technology, application): Handbook.* Ed. by I.N. Fridlyander. Kyiv, Komintekh [in Russian].
3. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures of aluminium alloys.* Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Ishchenko, A.Ya. (2003) *Aluminium high-strength alloys for welded structures. Progressivni Materialy i Tekhnologii.*
5. Lebedev, V.A. (2007) Some peculiarities of mechanized arc welding of aluminium with controlled pulse feed of electrode wire. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 26–30 [in Russian].
6. Wenez, A. (2005) Hundertfuntzig Jahre Aluminium. *Der Praktiker*, **5**, 74–75.
7. Kononenko, V.Ya. (2010) *Welding of aluminium alloys: Handbook.* Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
8. Ishchenko, A.Ya., Lozovskaya, A.V. (2001) Improvement of weldability of aluminium alloys by optimization of amount of additives. In: *Proc. of 5th Session of Sci. Council on New Materials of Int. Ass. of Sci. Acad. (12 May, 2000, Kyiv).* Gomel, NANB, 72-77.
9. Teh, N.J. (2006) Small joints make a big difference. *TWI Connect*, **143**, **4**, 1–7.
10. Norlin, A. (2000) A century of aluminium – a product of the future. *Svetsaren*, **2**, 31–33.
11. Labur, T.M. (2021) Tendencies of technological development of arc welding processes for joining of modern aluminium alloys. *Zvarnyk*, **6**, 6–17 [in Ukrainian].
12. Golovatyuk, Yu.V., Poklyatskyi, A.G., Labur, T.M., Ostash, O.P. (2018) Increase in structural strength of welded joints of Al–Cu–Mg system alloy. *Fiz.-Chim. Mekhanika Materialiv*, **54**(3), 112–119.
13. ГОСТ 7512-82. *Nondestructive testing. Welded joints. Radiography method* [in Russian].
14. ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84, СТ СМЭА 471-88) *Metals. Tensile test methods.*
15. ГОСТ 6996-66. *Welded joints. Methods of mechanical tests.* Introd. 01.1967. Moscow, Izd-vo Standartov

CONSUMABLE ELECTRODE WELDING OF D16 ALUMINIUM ALLOY WITH WELD METAL MICROALLOYING

T.M. Labur, V.A. Koval, M.R. Yavorska

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper gives the results of investigation of the features of formation of D16 aluminium alloy welds in consumable electrode welding with application of two insulated filler wires or embedded elements of different chemical composition. Wires of Zv1201, ZvAK5, ZvAK12 grades of 1.6 mm diameter and embedded elements cut out of V92, V96 and 7056 alloy blanks with different content of zinc were evaluated. It is shown that ZvAK5 wire ensures reduction of the length of solidification cracks and quantity of pores in welded joints, and welded joint strength becomes higher at addition of zinc into the welds. 15 Ref., 5 Tabl., 5 Fig.

Keywords: aluminium alloy, arc welding, consumable electrode, welded joints, filler wires, structure, solidification cracks, mechanical properties, investigations

Надійшла до редакції 03.09.2022

ПЕРЕДПЛАТА 2023



Журнал «**Автоматичне зварювання**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання, наплавлення та інших споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних металоконструкцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для подовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах; гібридні технології зварювання. В журналі публікується також інформація про нові зварювальні матеріали, джерела живлення та технології; звіти про виставки, конференції та семінари, анонси нових книг та винаходів, новини від відомих компаній та інше.



Журнал «**Сучасна електрометалургія**» є міжнародним науково-теоретичним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень у сферах: металургія чорних і кольорових металів та сплавів; спеціальна електрометалургія (електрошлакова, електронно-променева, плазмово-вакуумно-дугова технології); нові матеріали; енерго- і ресурсозбереження; матеріалознавство, 3D технології у спеціальній електрометалургії. Публікується також допоміжна інформація з тематики журналу.



Журнал «**Технічна діагностика та неруйнівний контроль**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень з діагностики матеріалів і конструкцій та методи неруйнівного контролю для оцінки стану матеріалів і конструкцій; теорія, методи і засоби технічної діагностики. Розміщуються матеріали з моніторингу конструкцій та подовження ресурсу та працездатності засобами НК. Публікується супутня інформація з тематики журналу, а також інформація про події та новини в Українському товаристві НК та ТД.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.

Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм. А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥК, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

Ціна договірна. Передбачена система знижок. Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі. Публікується тільки профільна реклама з тематики журналів. Відносно вартості, знижок та термінів публікації прохання звертатися у видавництво.

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: 38044 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>