

ОЦІНКА ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПРИСАДНИХ ДРОТІВ НА ЗВАРЮВАНІСТЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д16

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

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

Алюмінієвий сплав марки Д16 широко застосовується в авіаційній промисловості, але при дуговому зварюванні неплавким електродом він виявляє схильність до утворення кристалізаційних («гарячих») тріщин в швах і зоні сплавлення з основним металом. Це пов'язують з дією механізму високотемпературного ліквідаційного розтріскування границь зерен і розривання металевих зв'язків при кристалізації металу внаслідок збільшення локального залишкового напруження, що зменшує міцність з'єднань. В подальшому склад сплаву був оптимізований за кількістю легуючих елементів і домішок. У теперішній час застосовують новітні сплави та зварювальні технології. Метою дослідження є оцінка умов формування бездефектних швів, характеристик їх міцності та пластичності в залежності від хімічного складу серійних присадних дротів ЗвАК5 і Зв1201. Перший дріт розширює вміст кремнію в структурі шва, сприятиме зниженню чутливості сплаву до технологічного нагрівання, гальмуванню окрихченню металу, другий – близький за хімічним складом сплаву. Встановлено, що схильність сплаву Д16 до утворення тріщин визначається технологією дугового зварювання, хімічним складом присадного дроту, схемою його подавання у металеву ванну. Показано, що умови зварювання плавким електродом гальмують реалізацію механізму розтріскування металу, характерного для зварювання неплавким електродом. Механічні властивості з'єднань при цьому зростають на 10...12 % в залежності від марки присадного дроту. Бібліогр. 10, табл. 6, рис. 7.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, зварювання неплавким і плавким електродами, нероз'ємні з'єднання, гарячі тріщини, структура швів, механічні властивості, дослідження

Вступ. Поява нових або удосконалених конструкційних алюмінієвих сплавів, технологій їх зварювання сприяє розробці літаків нового покоління. Базою для впровадження являється використання минулого досвіту та новітніх наукових знань про залежність «хімічний склад – мікроструктура – технологічність – властивості». Перевагу віддають матеріалам, які відповідають критеріям промислового попиту. Прикладом такого матеріалу є сплав Д16 системи легування Al–Cu–Mg–Si. Слід зазначити, що починаючи з моменту створення (1906 р.), його ретельно досліджували та удосконалювали, оскільки попит на нього був високий. В результаті з'явився новий модифікований сплав з оптимізованим співвідношенням легуючих елементів і значним обмеженням шкідливих домішок [1–4].

В сучасному поколінні літаків подовженого ресурсу сплав використовують для виготовлення різних вузлів, деталей силових елементів та агрегатів: каркасу, обшивки, стрингерів, нервюрів, лонжеронів, тяги керування та інших. Впровадження зумовлено широкою номенклатурою напівфабрикатів (листів, пресованих виробів штамповок, поковок тощо), які виготовляються за жорсткими технологічними параметрами, за яких підвищуються статична міцність, витривалість і в'язкість руйнування. Окрім авіаційної техніки сплав Д16 використовують в конструкціях наземного призна-

чення, які працюють під навантаженням [5]. Рекомендована температура експлуатації таких конструкцій, зазвичай, не перевищує 120 °С, оскільки при більш високих температурах він виявляє схильність до міжкристалічної корозії [4].

Особливістю сплаву Д16 є здатність до структурної рівноваги при нагріванні. В деформованому стані це відбувається швидше, ніж в литому. В процесі розпаду пересиченого твердого розчину міцність сплаву зростає, але при цьому знижуються показники пластичності [1–3]. Відмічене супроводжується зниженням корозійної стійкості металу – міжкристалічною корозією та корозією під напругою в умовах технологічного нагрівання вище 100 °С. Зазначимо, що сплав у вихідному (литому) стані характеризується невисоким рівнем міцності (200МПа) та низькою пластичністю порівняно з іншими конструкційними алюмінієвими сплавами [6]. Його структура при цьому нерівновісна та складається з твердого розчину і виділень інтерметалідних фаз, розташованих вздовж границь зерен і між осями дендритів у вигляді псевдоевтектики.

Основними фазами виділення є $\text{CuAl}_2(\theta)$ та $\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{S})$. При співвідношенні легуючих компонентів $\text{Cu}/\text{Mg} \leq 2,6$ утворюється фаза Mg_2Si , яка сприяє зміцненню сплаву в атмосферних умовах і в умовах технологічних нагрівань. При співвідношенні $\text{Mg}/\text{Si} = 1,73$, крім того, утворюється фаза

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, 2023

Mg₂Si. Хімічний склад сплаву підбрано таким чином, щоб в рівновісному стані металу всі легуючі компоненти під час його нагрівання переходили в твердий розчин, який можна фіксувати швидким гартуванням. Завдяки такій послідовності термічної обробки при виготовленні сплаву досягаються належний рівень механічних властивостей. Марганець і залізо розчиняються у фазах, що викликає зміну складу та температуру їх подальшого утворення [6]. До складу фаз, які зміцнюють сплав, марганець не входить, але його присутність збільшує стійкість металу проти міжкристалічної корозії, а наявність у вигляді дисперсних часток фази T(Al₁₂Mn₂Cu) підвищує температуру рекристалізації та покращує механічні властивості сплаву Д16. Залізо та кремній входять до складу домішок, які не розчиняються у рідкому металі. Сполуки заліза (Mn,Fe)Al₆ кристалізуються у вигляді грубих пластин, що зменшує міцність та пластичність сплаву [7, 8]. Крім того, залізо утворює сполуку Al₂Cu₂Fe, яка не розчиняється в алюмінії, а зв'язує мідь, тим самим обмежує механізм зміцнення металу під час природного або/та штучного старіння. Тому кількість заліза у сплаві регламентують на рівні 0,5...0,7 %. Фази Mg₂Si та W(Al_xMg₅Cu₆Si₄ з кремнієм розчиняються в рідкому алюмінії та сприяють зростанню показника міцності сплаву Д16 при подальших операціях термічної обробки, але ефект незначний. Перебільшення вмісту кремнію у сплаві може зменшити кількість включень фаз S та θ, що негативно впливає на загальну його міцність.

У стані відпалу значення пластичності сплаву задовільне. Загартування сплаву відбувається від температури 500 ± 5 °C у воді, а природне (зонне) старіння – при кімнатній температурі протягом 90...100 год. Після гартування тимчасовий опір руйнуванню сплаву збільшується на 110 МПа порівняно з відпаленим станом. Внаслідок природного старіння протягом 15 діб в атмосферних умовах цей показник додатково зростає на 100 МПа. Показники міцності сплаву при цьому дорівнюють: $\sigma_B = 470$ і $\sigma_{0,2} = 300$ МПа, а рівень відносного подовження (δ) становить 19 %. Нагартвані листи часто піддають штучному (фазовому) старінню за температурних умов 190 ± 5 °C протягом 12...13 год, що збільшує рівень міцності на 10...15 % [4, 5].

В умовах промислового виробництва легких конструкцій поширено застосування двох стандартизованих способів дугового зварювання – плавким і неплавким електродами. Шви, отримані при цьому, мають порівняно високий рівень міцності та пластичності, що дозволяє забезпечити належні експлуатаційні характеристики з'єднань в зварних конструкціях. Концентроване введення

теплової енергії дуги, притаманне зварюванню плавким електроодом, на відміну від неплавкого електрода, дозволяє глибоко проплавляти матеріал, змінювати швидкість зварювання в широкому діапазоні, тим самим зменшити зону термічного впливу та ступінь деформації виробів [9]. Недоліками зварювання плавким електроодом є «лускастість» швів, малий радіус і підвищений кут його переходу до основного металу, а також ймовірність втрати з електродного дроту легкокиплячих легуючих елементів. Крім того, в структурі швів і зоні сплавлення можуть виникати пори як наслідок високого вмісту водню в основному та електродному (присадному) матеріалі, можливе перегрівання електродного металу та порушення технологічного процесу з'єднання. Для подолання таких явищ використовують випрямлячі постійної напруги або постійного струму, інверторні випрямлячі та імпульсні джерела живлення дуги. Крім того, удосконалюються механізми подачі дроту, залучають пальники з високою стабілізацією вихідних параметрів при значних коливаннях мережі живлення змінного струму або дії інших випадкових електричних збурень [2, 9].

Головною проблемою процесу дугового зварювання сплаву Д16 визнають високу його схильність до утворення кристалізаційних тріщин в швах і зоні сплавлення з основним металом, що призводить до зниження міцності [4, 10]. Тріщини виникають при температурі вище лінії солідуса, тобто у середині області діаграми розчинення при широкому інтервалі температури затвердіння (рис. 1). Неоднорідність хімічного складу сплаву викликають зростання локального залишкового напруження, а при технологічному нагріванні також відбувається розкриття (розривання) границь зерен, де розташовуються фазові сполуки з міддю, магнієм та кремнієм [7, 9]. Позитивним є той факт, що комбінація легуючих елементів сплаву забезпечує потрібний рівень конструктивної міцності порівняно з чистим алюмінієм. Водночас, саме це гальмує якісне формування швів при кристалізації (особливо міді). Інші легуючі елементи (марганець, залізо, титан) обмежують розчинність міді, магнію і кремнію в алюмінії, змінюють при цьому об'єм легкоплавкої евтектики в структурі та сприяють утворенню стійких інтерметалідних сполук, що дозволяє отримати різноманітні фазові комбінації та евтектики [5, 6]. Їх хімічний склад і температура плавлення відомі неповністю. В табл. 1 надані параметри деяких з них. Температуру утворення евтектик визначають параметри гартування та режими гарячої деформації, їх склад і кількість. Вони також впливають на ступінь чутливості сплаву до термічного циклу зварювання. Тому зварюваність сплаву Д16 визна-

Таблиця 1. Склад і температура плавлення евтектик системи Al–Cu–Mg–Si

Фазовий склад евтектики	Хімічний склад евтектики	Температура плавлення евтектики, °C
Al+AlCu ₂ +CuMgAl ₂	27...31%Cu–6,0–7,2%Mg	500...507
Al+CuAl ₂ +Mg ₂ Si	28%Cu–6%Mg–3,5%Si	514...517
Al+CuAl ₂ +CuMg ₂ Si ₄ Al ₄	25%Cu–1,7%Mg–8,3%Si	509

ють незадовільною [2, 4, 9]. В зв'язку з цим при виготовленні зварних конструкцій застосовують лише з'єднання, отримані в твердій фазі: точкове або роликкове [5].

Схильність до утворення гарячих тріщин пояснюють нерівномірністю розподілу шкідливих домішок кремнію і заліза як наслідок використання недоброякісної лігатури на металургійному етапі виробництва напівфабрикатів. Залишаючись після зварювання в структурі з'єднань, вони створюють більш складні нерозчинні фазові включення, ніж у сплавах високої чистоти. Зниження їх сумарної кількості до 0,05...0,1 % у сплаві поліпшує зварюваність та механічні властивості з'єднань. Також цьому сприяє застосування прогресивних способів зварювання неплавким та плавким електродами, за яких з'являються технологічна можливість формування дрібнокристалічної структури швів, що зменшує ризики утворення гарячих тріщин [7, 8]. Гальмування механізму розтріскування металу при структурно-фазових перетвореннях в умовах охолодження зварювальної ванни спостерігають при використанні дротів, близьких за хімічним складом до основного металу [4, 10].

На появу тріщин також впливає періодичність процесів нагрівання та послідовного затвердіння металу у зварювальній ванні. Зазвичай, тріщини активно поширюються на завершальному етапі кристалізації шва та мають переважно міжкристалітний характер, розкриваються та закриваються в межах одного або декількох шарів структури [7]. При неправильному виборі основного та присадного матеріалу дефекти виникають й в зоні біля шва, оскільки саме тут фіксується скупчення легкоплавких фазових комбінацій. У разі їх накопичення можливе утворення магістральної тріщини аж до зони вже затверділого металу. До фізичних причин утворення гарячих тріщин відносять: ви-

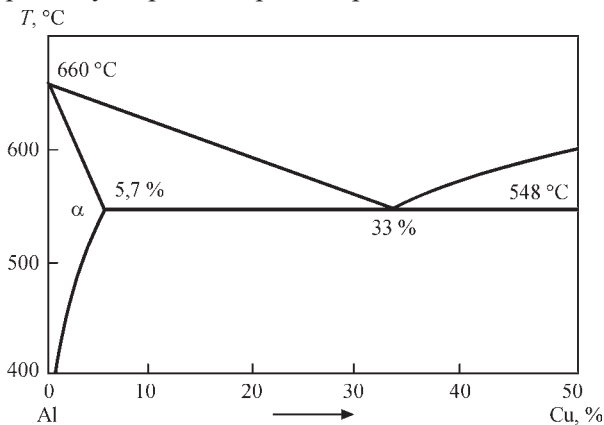


Рис. 1. Діаграма розчинення міді в алюмінії [1]

соку пружність пари легуючих елементів, які входять до складу сплаву; значну теплопровідність; підвищену текучість металевої рідини при температурі плавлення; повну втрату міцності при температурах вище 400 °C; високий коефіцієнт лінійного розширення; низький модуль пружності [1, 4, 6]. При зварюванні поряд з вигоранням легуючих елементів (особливо магнію) та виходом міді у поверхневий шар рідкого металу у ванні відбувається зниження твердості металу в шві та зоні термічного впливу з'єднань, що викликає зменшення кількості міді в об'ємі зварного шва [2, 3].

Метою дослідження є оцінка умов формування бездефектних швів, характеристик їх міцності та пластичності в залежності від хімічного складу серійних присадних дротів ЗвАК5 і Зв1201. Тому доцільно ретельно та обґрунтовано дослідити зварюваність сплаву Д16, визначити вплив хімічного складу серійних присадних дротів на структурні особливості та щільність металу шва, оцінити технологічні умови зварювання сплаву та значення механічних властивостей з'єднань.

Для досягнення мети доцільно оцінити хімічний склад серійних присадних дротів ЗвАК5 і Зв1201 (ГОСТ 7871-75). Застосування першого дроту передбачає збільшення вмісту кремнію у шві, що може звузити інтервал твердо-рідкого стану металу та збільшити рівень пластичності, кремній входить до складу фаз Mg₂Si та W(Al_xMg₅Cu₆Si₄) [9]. Отримати належну міцність з'єднань без тріщин і зниження пластичності може дозволити ідентичний за хімічним складом інший дріт. В табл. 2 надано хімічний склад досліджуваних марок дротів.

Методика проведення досліджень. Визначення впливу хімічного складу присадного дроту при зварюванні сплаву Д16 здійснювали за результатами двох поширених технологічних проб – «точковий шов» та «риб'ячий скелет» Хоулдрокфта (Holdcroft), які реалізуються в умовах неплавкого електрода, тобто коли присадний дріт безпосередньо подається в зварювальну ванну [4, 6]. Оцінку зварюваності, зазвичай, проводять не за абсолютними величинами, а за показником відхилення властивостей зварних з'єднань відносно основного металу. Тому були виготовлені відповідні експериментальні зразки зі сплаву Д16Т завтовшки 2 мм (рис. 2 і 3). Поверхні заготовок перед зварюванням знежирювали розчинником, потім хімічно травили та видаляли плакувальний шар в зоні зварювання механічним шляхом.

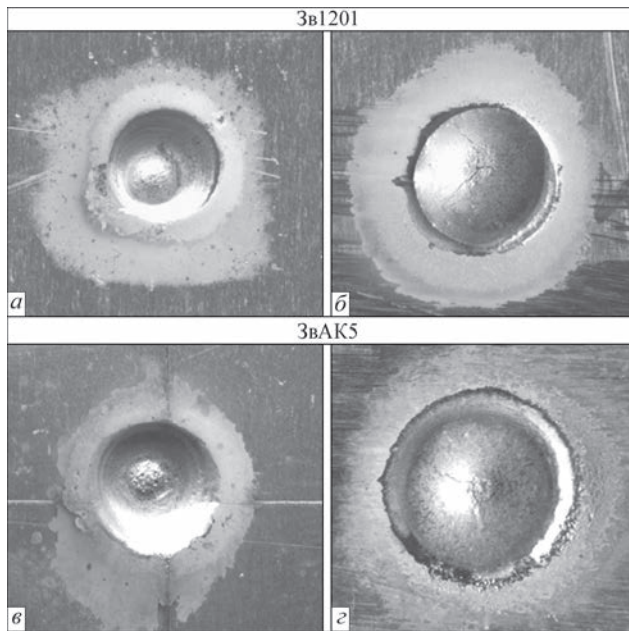


Рис. 2. Зовнішній вигляд сплаву Д16Т після виконання технологічної проби «точковий шов» з присадками різного хімічного складу після ручного зварювання (а, б) та після повторного переплавлення (в, г)

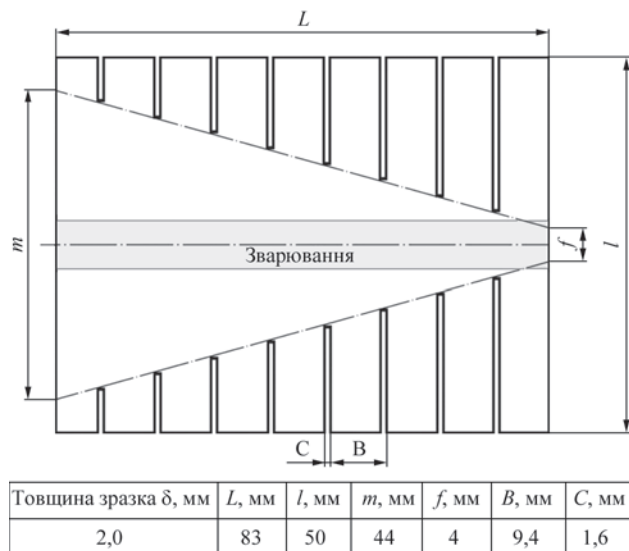


Рис. 3. Ескіз технологічної проби Хоулдрокфта для визначення схильності металу шва до утворення гарячих тріщин при зварюванні без присадкового дроту

Проба «точковий шов» дозволяє оцінити схильність сплаву до утворення кільцевих кристалізаційних тріщин вздовж границі зони сплавлення шва з основним металом [7]. На листових зразках розміром 120×120×2 мм ручним способом, застосовуючи джерело живлення ТІР-315, було зварено три зразка по 3 точки на кожному на відстані 40 мм одна від одної. Величина зварювального струму становила 120 А. Особливості формування швів визначали, використовуючи дроти діаметром 2,0 та 3,15 мм. Зовнішній вигляд точкових швів, а також наявність і протяжність гарячих тріщин вивчали з використанням лупи з 10-кратним збільшенням. Величину протяжності кільцевих

Таблиця 2. Хімічний склад присадних дротів, мас. %

Присадні дроти	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn	Zr	Fe	Si	Sc
ЗвАК5	5,8	0,06	–	–	–	–	0,46	0,10	–
Зв1201	6,7	0,02	0,30	0,15	0,04	0,14	0,15	0,08	–

тріщин у зразках реєстрували у відсотках порівняно до значень повного периметру зварних точок. Кількість радіальних тріщин у зварному кратері оцінювали за трибальною шкалою. Верхній рівень визначали опосередковано словом «багато», середній – «мало», а нижній рівень – «відсутні».

Для визначення якості лінійних швів була застосована технологічна проба Хоулдрокфта [4]. Показником схильності до утворення гарячих тріщин при цьому вважається величина співвідношення довжини тріщини ($L_{тріщ}$) до довжини шва ($L_{шва}$), яка розраховується у відсотках та позначається літерою А (табл. 3). Дослідні зразки відповідних розмірів (рис. 4) вирізали зі зварних стиків сплаву. Вони були отримані також ручним способом неплавким електродом з використанням формуючої підкладки з канавкою розміром 1×4 мм. Величина зварювального струму при цьому становила 120 А.

Більш об'єктивну оцінку якості формування точкових швів здійснювали після механічного зачищення. Поверхню зони технологічного посилення повторно проплавливали без присадки, тобто створювали умови жорстко нормованого за величиною та тривалістю дії зварювального струму. Операцію здійснювали за допомогою джерела живлення MW450 фірми «Fronius» (Австрія), машинного пальника та дистанційного пульта, який забезпечує програмоване гасіння дуги. Величина струму в цьому випадку складала 160 А при час-

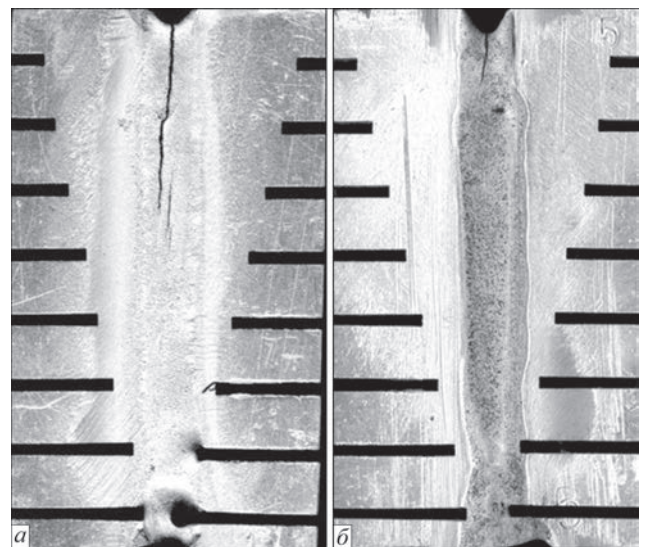


Рис. 4. Зовнішній вигляд після повторного переплаву технологічних проб Хоулдрокфта, вирізаних із зварних з'єднань, отриманих дротами Зв1201 (а) та ЗвАК5 (б)

Таблиця 3. Вплив хімічного складу присадного матеріалу на схильність сплаву Д16 до утворення гарячих тріщин при зварюванні

Присадка	Показник схильності до утворення тріщин А, %
Зв1201	30...33
ЗвАК5	17...18

тоті 100 Гц, а довжина дуги 3 мм. Для посилення катодного очищення поверхні зразків було обрано відповідний режим зварювання, коли електричний струм протікає переважно при зворотній полярності. Термін горіння дуги у дослідних стиках становив 7 с. Використання системи програмного гасіння дуги дозволило закінчувати роботу дуги миттєво, тобто в кратері. Слід зазначити, що окрім радіальних тріщин у швах при цьому спостерігаються кільцеві тріщини.

На відміну від технології зварювання неплавким електродом присадний дріт при з'єднанні плавким електродом подавався безпосередньо в зону стику. Така схема подачі дроту дозволяє корегувати режим його нагрівання та основного металу, тим самим здійснювати належне формування шва.

Застосування зварювання електродом, який плавиться та імпульсно-дугового режиму зварювання сплаву Д16 дозволило підвищити ККД процесу та знизити погонну енергію зварювання, необхідну для досягнення повного проплавлення металу, а введення концентрованої теплової енергії дуги забезпечувало повне проплавлення стику. Реалізацію процесу здійснювали завдяки зварювальній установці TransPulsSynergic-450 (надалі TPS-450) виробництва фірми Fronius. Вона відноситься до обладнання інверторного типу з первинним перетворюючим контуром, призначеним для здійснення процесів MIG/MAG модульованим струмом та в звичайному режимі. Транзисторна техніка та електронна схема комплектації роблять установку придатною для виконання різноманітних технологічних завдань зварювання алюмінієвих сплавів різних систем легування, дозволяє регулювати енергетичні параметри процесу та його швидкість. Погонну енергію та швидкість зварювання (31...33 м/год) обирали за умов досягнення ефекту повного проплавлення металу. Ширина швів з лицьової та оберненої сторони заготовок була майже однаковою.

Якість формування швів сплаву Д16 оцінювали візуально та методом рентгенографії (ГОСТ 7512) на рентгенівській установці РАП-150/300. Щільність металу шва контролювали на приладі Денситометр ДП-30.

Для визначення рівня міцності зварних з'єднань сплаву Д16, отриманих дослідними дротами, були використані зразки за ескізом, наведеним на рис. 5. Їх вирізали з стиків, отриманих ручним і

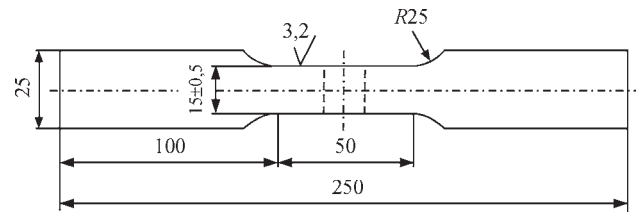


Рис. 5. Ескіз зразка для визначення міцності основного металу та зварних стикових з'єднань

автоматичним зварюванням неплавким і плавким електродами з використанням формуючої підкладки, за режимами, наведеними вище. Їх міцність оцінювали за середніми значеннями результатів випробування на розтяг трьох зразків (ГОСТ 1497) і порівнювали з показниками основного металу. При цьому в зразках були усунуті технологічне посилення та корінь шва. Випробування проводили на машині Інстрон-1126, швидкість переміщення траверси якої становила 6 мм/хв. Значення навантаження та деформації при розтягу дослідних зразків реєстрували на персональному комп'ютері, що дозволило розрахувати показники тимчасового опору розриву – межу міцності зварних з'єднань ($\sigma_{в.зв.з}$) та металу шва ($\sigma_{в.м.шва}$). За їх значеннями була оцінена чутливість структури сплаву до термічного циклу дугового зварювання та коефіцієнт міцності з'єднань відповідно до рівня основного металу ($k_{св} = \sigma_{в.м.шва}^{м.шв} / \sigma_{в.ом}$).

Металографічне дослідження сплаву та його зварних з'єднань проводили на мікроскопі ММТ-1600В, використовуючи шліфи, вирізані поперек напрямку прокату напівфабрикату і зварювання. Особливості мікроструктури виявляли шляхом застосування електролітичного полірування в розчині: хлорна кислота – 1000 см³ + крижана оцтова кислота – 75 см³.

Результати та обговорення. Розглянемо вміст елементів легування (масової частки) основного металу сплаву Д16. Він складається, мас. %: 1,5 Mg; 4,3 Cu; 0,47 Mn; 0,16 Si; 0,21 Fe; 0,09 Zn; 0,05 Ti. Його структура утримує зерна твердого розчину алюмінію розміром 15...18 мкм та включень надлишкових інтерметалідних фаз $T(Al_{12}Mn_2Cu)$ і Al_2Cu_2Fe (рис. 6). Сполуки заліза $(Mn,Fe)Al_6$ кристалізуються у вигляді грубих пластин (0,06...0,16 мкм), витягнутих вздовж прокату, що впливає на міцність та пластичність сплаву. Кремній входить до складу фазових включень Mg_2Si та $W(Al_xMg_5Cu_6Si_4)$. Механічні властивості даного сплаву надані в табл. 4.

Таблиця 4. Механічні властивості основного металу сплаву Д16Т завтовшки 2 мм

Напрямок прокату	Міцність $\sigma_{в}$, МПа	Межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Кут згину α , град
Вздовж	446	313	106
Поперек	441	303	103

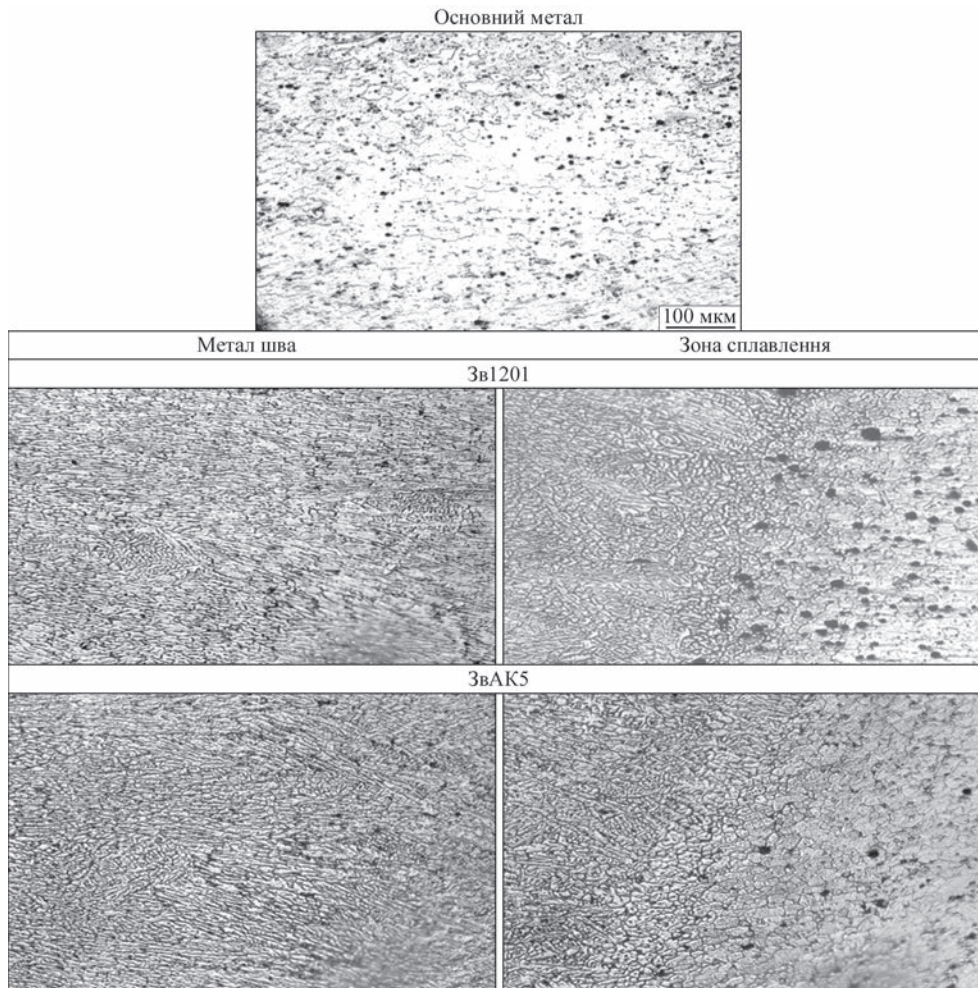


Рис. 6. Мікроструктура ($\times 320$) зварних з'єднань сплаву Д16, отриманих плавким електродом при використанні досліджуваних присадних дротів

За даними візуального аналізу точкових швів, при використанні дротів діаметром 3,15 мм відмічаються більш сприятливі фізичні умови їх формування, оскільки радіальні тріщини в кратері були відсутні або спостерігалися у незначній кількості в залежності від стабільності процесу ручного зварювання. Незалежно від хімічного складу застосованого дроту на поверхні точкових швів спостерігаються лише радіальні тріщини (див. рис. 2). Коли застосовують дріт марки ЗвАК5, кільцеві тріщини у з'єднаннях відсутні лише з лицьової сторони зразків. В кореневій частині їх протяжність в 2 рази менша порівняно з маркою Зв1201. Оскільки зварні точки мали майже однаковий рівень протяжності кільцевих швів – 30 % як з лицьової, так й кореневої частини шва, тому на завершальному етапі процесу було доцільно застосування вивідних планок за межа-

ми виробу. Як показав аналіз результатів експериментальних досліджень зварних точок, хімічний склад присадних дротів визначає кількість і протяжність кільцевих тріщин, їх характер розгалуження на поверхні шва (табл. 5).

Аналіз результатів оцінки сплаву за технологічною пробою Хоулдрокфта показав (рис. 3), що лінійні шви, отримані з додаванням присадки Зв1201, характеризуються показником A на рівні 33 % відносно довжини зразків (табл. 3). При використанні дроту ЗвАК5 схильність сплаву Д16 до утворення гарячих тріщин знижується до рівня 17 %. Порівнюючи дані щодо зварюваності сплаву Д16, які отримані за двома технологічними пробами («точковий шов» і проба Хоулдрокфта), можна відзначити, що найменша його схильність до утворення тріщин спостерігається при використанні дроту ЗвАК5 (табл. 3, 5).

Таблиця 5. Результати визначення зварюваності сплаву Д16Т за методикою «точковий шов»

Марка присадки	Наявність тріщин			
	На лицьовій поверхні		В кореневій частині	
	кільцеві, %	радіальні	кільцеві, %	радіальні
Зв1201 (Al-6,7Cu-0,3Mn)	30	Мало	32	Мало
ЗвАК5 (Al-5,8Si)	Відсутні	Мало	17	Мало

Таблиця 6. Механічні властивості зварних з'єднань листів сплаву Д16Т завтовшки 2 мм, отриманих ручним зварюванням неплавким електродом з присадками ЗВАК5 і Зв1201

Марка присадки	Міцність зразків зі знятим посиленням і проплавом $\sigma_{\text{в}}^{\text{мш}}$, МПа	Кут згину α , град
ЗВАК5	272	30
Зв1201	202	30

Оскільки на реальному виробі при експлуатації зварної конструкції зі сплаву Д16 застосовуються елементи з видаленим проплавом і технологічним підсиленням на швах, тому для повного аналізу їх поведінки в умовах випробування на розтяг залучали зразки, вирізані поперек лінії зварювання стиків з використанням обох дротів. В з'єднаннях були усунені механічним шляхом зазначені частини швів. Результати випробування порівнювали з властивостями основного металу, аналогічно вирізаних відносно поперечного напрямку прокату напівфабрикату.

Узагальнюючи дані, отримані за двома технологічними пробами, та механічні властивості, встановлено, що при застосуванні дроту марки ЗВАК5 спостерігається менша здатність металу швів до утворення гарячих тріщин, але коефіцієнт міцності таких з'єднань становить 0,61 від рів-

ня основного металу (табл. 6). У разі зварювання стиків дротом марки Зв1201 коефіцієнт міцності з'єднань вищий та дорівнює 0,66. Як видно з табл. 6, показник пластичності (кут згину) при використанні зазначених дротів складає 30°. Руйнування зварних з'єднань за обох технологічних варіантах відбувалось вздовж осі металу шва. В зв'язку з цим, для з'єднання стиків сплаву Д16 і ремонту його дефектних швів можна рекомендувати технологію зварювання неплавким електродом, застосовуючи присадні дроти обох марок.

Відомо [1–5], що структура швів алюмінієвих сплавів визначається не тільки хімічним складом присадних дротів, але й способом зварювання. Тому була залучена технологія зварювання плавким електродом з використанням тих самих дротів (Зв1201 та ЗВАК5). Металографічний аналіз структури отриманих швів показав, що вони щільні і не мають грубої пористості за обох марок дротів (рис. 6). Вона крупнокристалічна з дендритною будовою та характерною для литого стану алюмінієвих сплавів і являє собою кристаліти різних розмірів і орієнтації. Середній розмір дендритів становить 32,2 мкм. Деякі з них мають вигляд однаково спрямованих окремих пакетів дендритів. В центрі шва спосте-

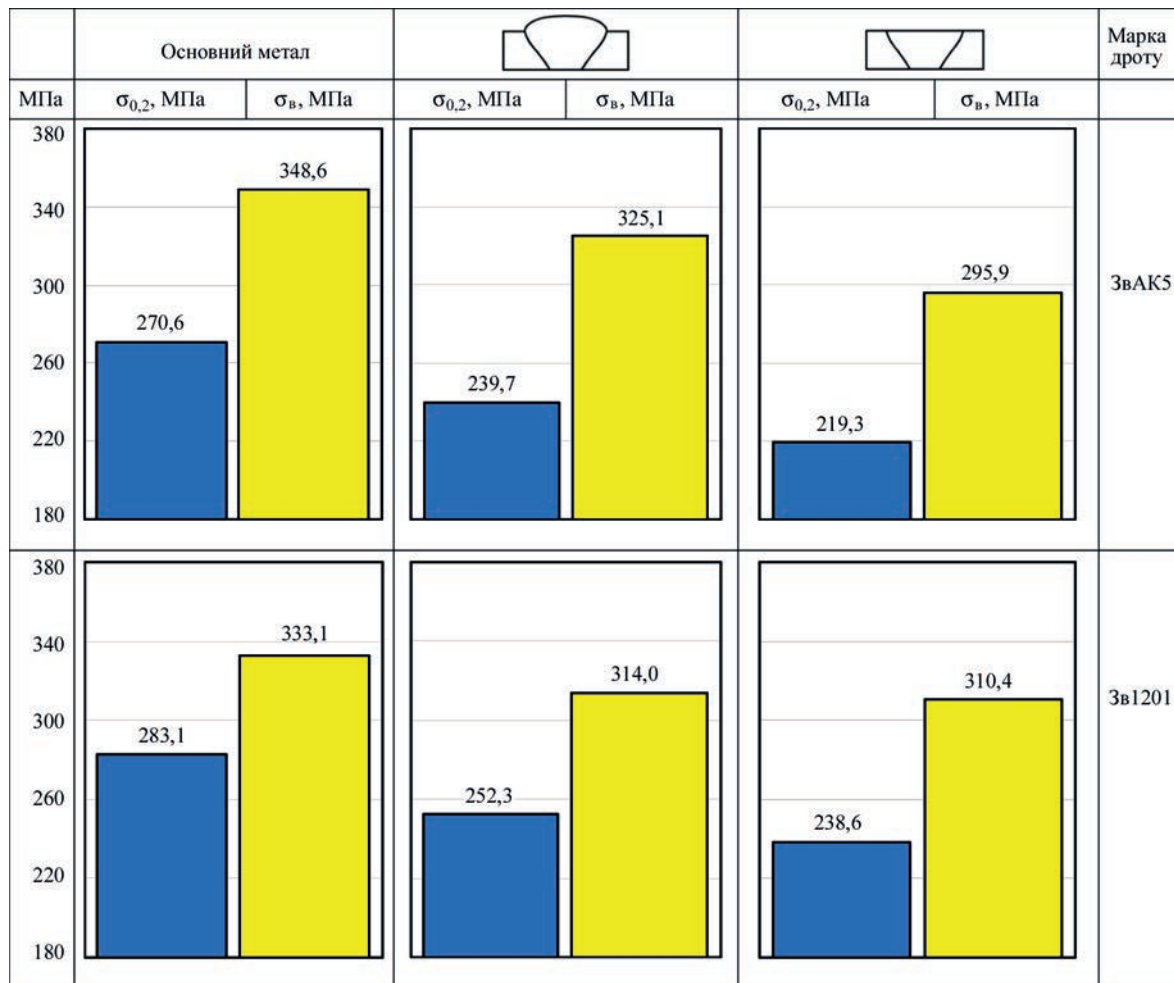


Рис. 7. Середні значення механічних властивостей з'єднань сплаву Д16 завтовшки 2 мм, отриманих плавким електродом

рігаються витягнуті дендрити, орієнтовані до осі шва під невеликим кутом ($3...5^\circ$). Виділення дисперсних фаз спостерігається переважно як вздовж границь, так і в середині кристалітів. Характерним для всіх з'єднань сплаву Д16 при використанні досліджуваних присадок є ділянка біля лінії сплавлення шва з основним металом. В умовах охолодження зерна на цій ділянці структура швів подрібнюється. Зі сторони шва біля зони сплавлення розташовані кристаліти, які мають переважно стовпчасту форму та спрямовані у напрямку максимального тепловідводу при кристалізації зварювальної ванни. Вектор зростання розмірів дендритів (до $48...53$ мкм) співпадає з напрямком відведення пальника в процесі зварювання.

Згідно результатів аналізу морфологічних особливостей мікроструктури з'єднань сплаву Д16, виконаних з різними дротами, будь-яких помітних відхилень в розмірах дендритного параметру не виявлено. Він дорівнює $28...40$ мкм. Більш крупні дендрити притаманні з'єднанням, отриманим при використанні дроту ЗвАК5, а менші – Зв1201. Ознак переходу від дендритної форми зерна до субдендритної в структурі швів не спостерігається.

Оскільки часто в умовах реальної експлуатації зварного конструктивного елементу використовують з'єднання з видаленим коренем шва або його вилучають разом з його технологічним підсиленням, то для повної оцінки значень властивостей залучали макетні з'єднання, випробування яких здійснювали на зразках без зазначених частин швів. Їх порівнювали з механічними властивостями основного металу, вирізаних з напівфабрикату відносно поперечного напрямку прокату. На рис. 7 представлено результати випробування на розтяг зразків зварних з'єднань, отриманих плавким електродом. Їх аналіз показав, що в зразках, де корінь шва усунутий, значення міцності майже однакові. При використанні дроту марки ЗвАК5 значення міцності дорівнює $325,1$ МПа, що на $2,5...3,5$ % вище, ніж при зварюванні дротом Зв1201 (314 МПа). Аналогічне співвідношення значень міцності відмічається й у показника межі плинності. В зразках зварних з'єднань, в яких повністю були відсутні і корінь шва, і технологічне посилення, має місце зворотна залежність. У разі застосування дроту марки Зв1201 цей рівень становить $310,4$ МПа, що майже на 15 МПа вище, ніж при застосуванні дроту ЗвАК5 ($295,9$ МПа). Така ж тенденція спостерігається при зварюванні сплаву Д16 неплавким електродом. Міцність з'єднань при цьому на $10...12$ % вище, ніж отриманих плавким електродом (табл. 6). Значення показників межі плинності зварних з'єднань становлять $238,6$ та $219,3$ МПа, відповідно.

Висновки

1. Встановлено, що застосування способу зварювання електродом, який плавиться, при зварюванні сплаву Д16 дає можливість гальмувати його здатність до утворення гарячих тріщин. На це впливають теплофізичні умови зварювання, марка присадного дроту та схема його подачі у металеву ванну. Подання дроту безпосередньо в стик поміж заготовок сплаву Д16 разом з оптимальними параметрами режиму зварювання забезпечують умови утворення щільних швів без грубих дефектів.

2. Рівень міцності з'єднань, отриманих ручним зварюванням неплавким електродом з присадкою Зв1201, вищі на 20 МПа порівняно зі швами, виконаними дротом ЗвАК5. Показник пластичності (кута згину) металу швів, зварених з використанням обох присадок, практично однаковий та становить 30° .

3. Структура металу швів за обох технологій зварювання дрібнозерниста, має дендритну будову та утримує значну кількість вторинних фазових включень. Розмір дендритного параметру становить $28...40$ мкм і визначається хімічним складом присадного дроту, застосованого при зварюванні. Більші розміри дендритів притаманні з'єднанням, отриманим при залучанні дроту АК5, а менші – Зв1201, що підвищує рівень тимчасового опору руйнуванню та значення межі плинності металу зварних з'єднань на $10...12$ % при зварюванні плавким електродом.

4. Руйнування зварних з'єднань за обох технологічних варіантах відбувається вздовж осі металу шва. В зв'язку з цим для з'єднання стиків сплаву Д16 і ремонту його дефектних швів можна рекомендувати технологію зварювання як неплавким, так і плавким електродами, застосовуючи присадні дроти обох марок.

Список літератури

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка.
2. Wenez, A. (2005) Hundertfuntzig Jahre Aluminium. *der Praktiker*, 5, 74–75.
3. (2002) *Metal 2002: Good prospects for the future as the Newly Industrialised Countries gain greater importance*. IKB Deutsche Industriebank.
4. Ищенко А.Я. (2003) *Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций*. В сб.: *Прогресивні матеріали і технології*. Т.1. Киев, Академперіодика, сс. 50–82.
5. Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*. Справочник. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, Коминтех.
6. Мильман Ю.В., Коржова Н.П. Сирко А.И. (2008) *Алюминий и его сплавы*. В сб.: *Неорганическое материаловедение. Металлы и технологии*. Т.2, кн. 1. Киев, Наукова думка, 52–68.
7. Жерносеков А.М., Андреев В.В. (2007) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, 10, 48–51.
8. Машин В.С., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е. (2005) Механические свойства соединений алюминиевых сплавов

- при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. *Там же*, **9**, 43–49.
- Colchen, D. (2000) Application des calculs aux elements finis pour definir et valider des modeles analytiques de calcul de contrainte sur un assemblage bout a bout en alliage d'aluminium. *Soudage et techniques connexes*, **54**, 3/4, 3–16.
 - 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 академических наук (12 мая 2000 г., Киев). Гомель, ИММС НАНБ*, сс. 72–77.
 - Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 - Wenez, A. (2005) Hundertfuntzig Jahre Aluminium. *Der Praktiker*, **5**, 74–75.
 - (2002) *Metal 2002: Good prospects for the future as the Newly Industrialised Countries gain greater importance*. IKB Deutsche Industriebank.
 - Ishchenko, A.Ya., Lozovskaya, A.V. (2001) Improvement of weldability of aluminium alloys by optimization of quantity of impurities: Problems of current materials science. In: *Proc. of 5th Session of Scientific Council on New Materials of Intern. Association of Academies of Sciences (May 12, 2000, Kyiv). Gomel, IMMS NANB, 72-77* [in Russian].
 - Zhernosekov, A.M., Andreev, V.V. (2007) Pulsed metal arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 48–51.
 - Mashin, V.S., Poklyatsky, A.G., Fedorchuk, V.E. (2005) Mechanical properties of aluminium alloys in consumable and nonconsumable electrode arc welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 39–45.
 - Colchen, D. (2000) Application des calculs aux elements finis pour definir et valider des modeles analytiques de calcul de contrainte sur un assemblage bout a bout en alliage d'aluminium. *Soudage et Techniques Connexes*, **54**, 3/4, 3–16.
 - Ishchenko, A.Ya., Lozovskaya, A.V. (2001) Improvement of weldability of aluminium alloys by optimization of quantity of impurities: Problems of current materials science. In: *Proc. of 5th Session of Scientific Council on New Materials of Intern. Association of Academies of Sciences (May 12, 2000, Kyiv). Gomel, IMMS NANB, 72-77* [in Russian].

References

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF FILLER WIRES ON WELDABILITY OF D16 ALUMINIUM ALLOY

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: paton39@ukr.net

Aluminium alloy of D16 grade is widely used in aircraft industry, but at nonconsumable electrode arc welding it demonstrates a susceptibility to solidification (“hot”) cracking in the weld and zone of fusion with the base metal. This is associated with the action of the mechanism of high-temperature segregation cracking of the grain boundaries and breaking of metal bonds at metal crystallization, as a result of increase of local residual stress, which reduces the joint strength. Furtheron, the alloy composition was optimized by the quantity of alloying elements and admixtures. At present advanced alloys and welding technologies are used. The objective of the study is evaluation of the conditions of sound weld formation, their strength and ductility characteristics, depending on the chemical composition of batch-produced ZvAK5 and Zv1201 filler wires. The first wire widens the silicon content in the weld structure, it will promote lowering of the alloy susceptibility to technological heating and slowing down of metal embrittlement, and the second one is close to the alloy by its chemical composition. It is found that the cracking susceptibility of D16 alloy is determined by arc welding technology, filler wire chemical composition, and scheme of its feeding into the weld pool. It is shown that the conditions of consumable electrode welding slow down the realization of metal cracking mechanism, characteristic for nonconsumable electrode welding. The joint mechanical properties here are increased by 10...12 %, depending on filler wire composition. 10 Ref., 6 Tabl., 7 Fig.

Keywords: aluminium alloy, nonconsumable and consumable electrode welding, permanent joints, hot cracks, weld structure mechanical properties, investigations

Надійшла до редакції 22.03.2023



VII Міжнародна конференція

«Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування»

18–20 жовтня 2023 року на базі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя відбудеться 7-а Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування» (VII International Conference «In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction»).

Організатори заходу – Європейське товариство з цілісності конструкцій (ESIS), Українське товариство з механіки руйнування матеріалів, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України та Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Наукові напрями конференції: методи оцінювання, прогнозування та виявлення пошкодження матеріалів, неруйнівний контроль, методи оцінювання деградації та запобігання руйнуванню, проблеми впливу середовища на руйнування і міцність матеріалів, довговічність, цілісність та подовження терміну служби конструкцій.

Робоча мова: англійська.

Форма участі у конференції: очна, онлайн. Кінцевий термін реєстрації учасників – 1 вересня 2023 року. Тези доповідей приймаються до 1 вересня 2023 року.

Виголошені доповіді після рецензування буде опубліковано у спецвипуску «Procedia Structural Integrity», що індексується базами «Scopus» і «WoS».