

УДК 539.43: 621.791: 669.71

## КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМОЗМІЦНЕНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Al–Cu–Mg

О. П. ОСТАШ<sup>1</sup>, Т. М. ЛАБУР<sup>2</sup>, Ю. В. ГОЛОВАТЮК<sup>1</sup>, В. В. ВІРА<sup>3</sup>,  
В. А. КОВАЛЬ<sup>2</sup>, В. С. ШИНКАРЕНКО<sup>2</sup>, М. Р. ЯВОРСЬКА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

<sup>3</sup> НУ "Львівська політехніка"

Досліджено зварні з'єднання листів товщиною 4 mm з алюмінієвого сплаву Д16Т (аналога сплаву 2024-T3) у стані постачання (гартування і природне старіння) і після додаткового штучного старіння. З'єднання отримано зварюванням плавленням імпульсно-дуговим методом плавким електродом (Зв1201). Встановлено, що за певних режимів термічної обробки зварюваного сплаву і зварного з'єднання відношення міцності металу шва (МШ) і основного металу (ОМ) рівне 0,9. За комплексним параметром конструкційної міцності матеріалу  $P = [\sigma_U \cdot \Delta K_{th} \cdot \Delta K_{fc}]$  МШ переважає ОМ в 1,25 рази. Розглянуто можливість оцінювання механічних характеристик досліджуваних зварних з'єднань неруйнівним методом за питомою електропровідністю.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав, зварювання плавленням, термообробка, міцність, циклічна тріщиностійкість.

**Вступ.** Високу конструкційну міцність матеріалів та їх зварних з'єднань (ЗЗ) визначає оптимальне поєднання характеристик міцності (яка обумовлює матеріалоемність елементів конструкцій) і тріщиностійкості (від якої залежить їх опір крихкому руйнуванню і довговічність) [1]. За циклічного навантаження конструкцій, особливо, коли під час їх експлуатації застосовують принцип безпечної пошкоджуваності (damage tolerance), конструкційну міцність матеріалу можна ефективно оцінювати [2] за комплексним параметром  $P = [\sigma_U \cdot \Delta K_{th} \cdot \Delta K_{fc}]$ , де  $\sigma_U$  – границя міцності (ultimate strength);  $\Delta K_{th}$  – поріг втоми (fatigue threshold) і  $\Delta K_{fc}$  – циклічна в'язкість руйнування (cyclic fracture toughness), які є характеристиками циклічної тріщиностійкості (ЦТ) матеріалу (fatigue macrocrack growth resistance characteristics).

За такого підходу з'єднання високоміцних алюмінієвих сплавів, зокрема системи Al–Cu–Mg, отримані зварюванням плавленням, є проблемними через схильність до "гарячих" тріщин, пороутворення тощо [3]. В результаті метал шва (МШ) таких ЗЗ має порівняно низькі міцність і тріщиностійкість. Для вирішення цієї проблеми розробляють нові технології зварювання таких сплавів, серед яких – імпульсно-дугове, коли безперервною модуляцією основних параметрів процесу з періодом  $\sim 2$  s можна періодично змінювати рівень тепловкладення у зварюваний метал, а отже, керувати швидкістю кристалізації рідкого металу у ванні та надійно формувати шов навіть за локальних зазорів шириною до 1 mm [4]. Проте, застосовуючи різні технології імпульсно-дугового зварювання плавленням сплаву Д16М (система Al–Cu–Mg) у відпаленому стані, виявили [5, 6], що після зварювання та різних термічних обробок МШ за міцністю помітно поступається

основному металу (ОМ), що обумовлено, крім дефектності МШ, розпадом і коагуляцією під час плавлення зміцнювальної інтерметалідної фази вихідного сплаву [4].

Високі механічні характеристики термічно зміцнювальних алюмінієвих сплавів системи Al–Cu–Mg типу Д16Т(Т1), – аналогів закордонних типу 2024–Т3 (Т4, Т6), на відміну від сплаву Д16М у відпаленому стані, забезпечують дисперсійним зміцненням після гартування та природного (стан Т) або штучного (стан Т1) старіння. Тому доцільно вивчити закономірності зміни міцності і ЦТ з'єднань, отриманих зварюванням плавленням листів із термозміцненого сплаву Д16Т, та порівняти їх з відповідними ЗЗ зі сплаву Д16М. Такі дані у літературі відсутні.

**Матеріал і методика.** Досліджували ЗЗ заготовок розміром 250×100 mm, вирізаних з листів товщиною 4 mm зі сплаву Д16АТ (mass%: 4,5 Cu; 1,7 Mg; 0,53 Mn; 0,39 Si; 0,41 Fe; 0,11 Zn; 0,10 Ti; решта – Al) у стані постачання (гартування і природне старіння) та після додаткового штучного старіння (Д16А (Т + ШС)). Останнє пов'язано з тим, що властивості напівфабрикатів зі сплаву Д16Т після тривалого зберігання на складах можуть змінюватись порівняно з вихідними внаслідок достарювання. Тому, моделюючи цей процес, сплав Д16АТ штучно достарювали при 190±5°C з витримкою 12 h. Зварювали вздовж напрямку вальцювання листів автоматичним імпульсно-дуговим методом з періодом тривалості циклів 2,2±0,2 s плавким електродом (дротом Зв1201) в аргоні, використовуючи установку TPS-450 виробництва фірми Fronius, за таких параметрів: струм 240...250 А; напруга 20...21 V; швидкість подачі дроту 3...12 m/min; швидкість зварювання 31...33 m/h.

Властивості металу ЗЗ досліджували в стані після зварювання (ПЗ) без термообробки, після штучного старіння (ПЗ + ШС), а також після гартування з наступним штучним (ПЗ + Г + ШС) або природним (ПЗ + Г + ПС) старінням. Режими гартування і старіння описані раніше [5].

Для встановлення механічних властивостей ЗЗ зразки вирізали і навантажували перпендикулярно до осі зварного шва. Міцність ОМ ( $\sigma_U^{BM}$ ) і МШ ( $\sigma_U^{WM}$ ) та пластичність МШ визначали на стандартних зразках-смугах завширшки 20 mm: міцність  $\sigma_U^{WM}$  металу шва без посилення і його пластичність – за кутом  $\alpha$  загину зразка до руйнування [7].

Характеристики ЦТ визначали на зразках-смугах шириною 30 mm з гострим (радіус 0,1 mm) боковим вирізом уздовж осі зварного шва за стандартною методикою [8]. Будували діаграми швидкостей росту втомної макротріщини, тобто залежності  $da/dN$ – $\Delta K$  за частоти 10...12 Hz і коефіцієнта асиметрії  $R = 0,1$  циклу навантаження у повітрі при 20°C. Довжину тріщини виміряли катетометром КМ-6 за 25-кратного збільшення з похибкою 0,02 mm. Діаграми описували аналітичними залежностями [5], які зображені відповідними кривими (див. рис. 1). Характеристиками ЦТ матеріалів вибрали поріг втоми  $\Delta K_{th} = \Delta K_{10}^{-10}$  та циклічну в'язкість руйнування  $\Delta K_{fc} = \Delta K_{10}^{-5}$  – розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень за швидкості росту тріщини  $da/dN = 10^{-10}$  і  $10^{-5}$  m/cycle, відповідно.

Структурно-механічний стан металу у різних зонах ЗЗ оцінювали за його питомою електропровідністю (ПЕП), використовуючи вихрострумний структуроскоп ВЕП-21 [9] з похибкою вимірювання 0,1 MSm/m, яка є фізичною характеристикою алюмінієвих сплавів, чутливою до зміни їх структури і локального напружено-деформованого стану [1]. Значення ПЕП  $\chi$  вимірювали з кроком 1 mm за частоти змінного струму 85...100 kHz, що забезпечило глибину контролю до 2 mm [10].

**Результати та їх обговорення.** Додаткове штучне старіння загартованого і природно зістареного сплаву Д16АТ мало змінює його міцність (позиція 9 проти 1

у табл. 1). Після перегартування і старіння міцність вихідного сплаву (ОМ) знижується на 1...9% (позиції 5 і 7 проти 1 та 13 і 15 проти 9), що узгоджується з відомими результатами [11]. Через це різниця між міцністю ОМ і МШ зменшується, тобто відношення  $\sigma_U^{WM} / \sigma_U^{BM}$  для термооброблених ЗЗ порівняно зі станом ПЗ поліпшується (табл. 1): 0,66...0,81 проти 0,64 для з'єднань зі сплаву Д16АТ; 0,74...0,9 проти 0,65 – зі сплаву Д16А (Т + ШС). Пластичність МШ після гартування і старіння ЗЗ обох досліджуваних сплавів вища, ніж після зварювання, особливо за природного старіння (позиція 6 проти 2 і позиція 14 проти 10 у табл. 1). Слід відзначити, що загалом отримані характеристики міцності і пластичності МШ вищі, ніж МШ аналогічних з'єднань сплаву Д16М [5, 6].

Вплив термообробки ЗЗ на опір росту втоми макротріщини в МШ залежить від стану зварюваного сплаву. Для МШ з'єднань сплаву Д16АТ у стані після зварювання поріг втоми  $\Delta K_{th}$  і циклічна в'язкість руйнування  $\Delta K_{fc}$  зростають порівняно з ОМ у вихідному стані (позиція 2 проти 1 у табл. 1). Подальше штучне старіння ЗЗ зумовлює незначний ріст  $\Delta K_{th}$  і зниження  $\Delta K_{fc}$  (крива 2 проти 1 на рис. 1а). Гартування і природне старіння після зварювання слабо впливають на характеристики ЦТ, спричиняючи несуттєве зниження  $\Delta K_{th}$  (крива 3 проти 1). Різноплановий вплив зафіксували після гартування і штучного старіння: значення  $\Delta K_{th}$  дещо зростає, але суттєво (більш ніж удвічі) падає значення  $\Delta K_{fc}$  (крива 4 проти 1).

**Таблиця 1. Механічні характеристики ОМ і МШ досліджуваних ЗЗ**

№ за/п	Сплав	Стан матеріалу	Зона з'єднання	$\sigma_U^{BM}$ , $\sigma_U^{WM}$ , МПа	$\frac{\sigma_U^{WM}}{\sigma_U^{BM}}$	$\alpha$ , degree	$\Delta K_{th}^{BM}$ , $\Delta K_{th}^{WM}$	$\Delta K_{fc}^{BM}$ , $\Delta K_{fc}^{WM}$
							МПа $\sqrt{m}$	
1	Д16АТ	ПЗ	ОМ (ВМ)	390	0,64	–	3,4	35
2			МШ (ВМ)	249		32	3,8	43
3		ПЗ + ШС	ОМ	393	0,64	–	–	–
4			МШ	252		38	4,3	33
5		ПЗ + Г + ПС	ОМ	387	0,66	–	–	–
6			МШ	256		51	3,0	43
7		ПЗ + Г + ШС	ОМ	364	0,81	–	–	–
8			МШ	295		34	5,0	20
9	Д16А (Г + ШС)	ПЗ	ОМ	392	0,65	–	–	–
10			МШ	257		37	4,2	21
11		ПЗ + ШС	ОМ	392	0,67	–	–	–
12			МШ	262		29	4,6	48
13		ПЗ + Г + ПС	ОМ	366	0,74	–	–	–
14			МШ	271		46	3,4	38
15		ПЗ + Г + ШС	ОМ	355	0,90	–	–	–
16			МШ	320		45	3,8	38

**Примітка:** ПЗ – після зварювання (AW – after welding); Г – гартування (Q – quenching); ПС – природне старіння (NA – natural aging); ШС – штучне старіння (AA – artificial aging).

Іншу ситуацію маємо для МШ з'єднань сплаву Д16А (Т + ШС), коли за різних режимів термообробки за незначної зміни  $\Delta K_{th}$  суттєво поліпшується ЦТ на середньо- і високоамплітудній ділянках діаграми швидкостей росту втомної макротріщини (рис. 1b). Це призводить до зростання  $\Delta K_{fc}$ , особливо за штучного старіння після зварювання (крива 2 проти 1).

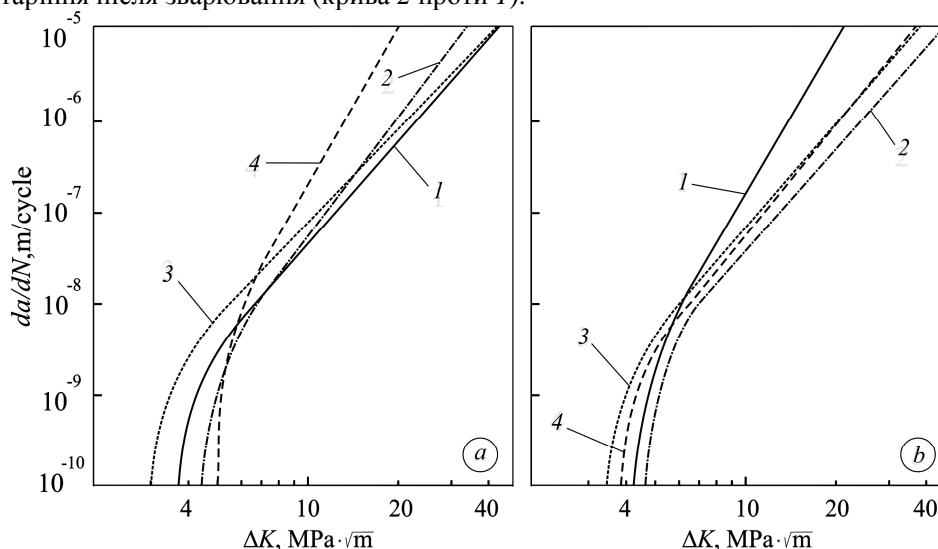


Рис. 1. Діаграми швидкостей росту втомної макротріщини в МШ зварних з'єднань сплавів Д16АТ (а) і Д16А (Т + ШС) (b) у стані після зварювання та різних термообробок: 1 – ПЗ; 2 – ПЗ + ШС; 3 – ПЗ + Г + ПС; 4 – ПЗ + Г + ШС.

Fig. 1. Fatigue macrocrack growth rates for WM of Д16АТ (a) and Д16А (Т + АА) (b) welded joints in the state after welding and various heat treatments: 1 – AW; 2 – AW + AA; 3 – AW + Q + NA; 4 – AW + Q + AA.

Така механічна поведінка металу ЗЗ впливає на параметр конструкційної міцності  $P$  (табл. 2). Його найвище значення зафіксовано для МШ з'єднання зі сплаву Д16А (Т + ШС), коли після зварювання виконали штучне старіння ( $P = 57850 \text{ MPa}^3 \cdot \text{m}$ ), яке в 1,25 рази перевищує встановлене для ОМ у вихідному стані ( $P = 46410 \text{ MPa}^3 \cdot \text{m}$ ). До того ж воно значно більше, ніж отримане [12] для МШ з'єднання зі сплаву Д16М ( $P = 27910 \dots 29760 \text{ MPa}^3 \cdot \text{m}$ ), але майже вдвічі менше, ніж для МШ з'єднання зі сплаву Д16Т за зварювання тертям з перемішуванням ( $P = 110160 \text{ MPa}^3 \cdot \text{m}$ ).

Таблиця 2. Параметр конструкційної міцності МШ досліджуваних ЗЗ

Варіант матеріалу *)	1	2	4	6	8	10	12	14	16
$P \cdot 10^{-3}, \text{MPa}^3 \cdot \text{m}$	46,41	<u>40,69</u> 0,88	<u>35,76</u> 0,77	<u>33,02</u> 0,71	<u>29,50</u> 0,63	<u>22,67</u> 0,49	<u>57,85</u> 1,25	<u>35,01</u> 0,75	<u>46,21</u> 0,99

**Примітка:** \*) – згідно з номером у табл. 1; у знаменнику порівняно з ОМ у вихідному стані (варіант 1).

Існує певна кореляційна залежність між міцністю алюмінієвих сплавів та їх ПЕП [9–11]. Це дає можливість оцінювати якість термообробки, моніторити структурно-механічний стан цих сплавів під час тривалої експлуатації тощо неруйнівним методом. Отримані дані для ОМ досліджуваних ЗЗ в основному підтверджують таку кореляцію (рис. 2a), коли зниженню міцності металу відповідає

ріст ПЕП. Зафіксували різні тенденції залежності між ПЕП та міцністю ОМ і МШ. Зокрема, після різних термообробок ЗЗ зі сплаву Д16 у станах Т і (Т + ШС) діапазон зміни ПЕП для МШ значно менший: 15...18 проти 19...25 MSm/m. За нижчих значень  $\sigma_U$  для МШ порівняно з ОМ (див. табл. 1) її значення нижчі, а для ОМ падіння міцності супроводжується ростом ПЕП (рис. 2a). У результаті для МШ маємо якісно протилежну, ніж для ОМ, залежність між  $\sigma_U$  і ПЕП (рис. 2b проти 2a). Її підтверджують дані [12] для МШ зварного з'єднання, отриманого зварюванням тертям з перемішуванням: підвищення його міцності порівняно з МШ після зварювання плавленням також супроводжується ростом ПЕП.

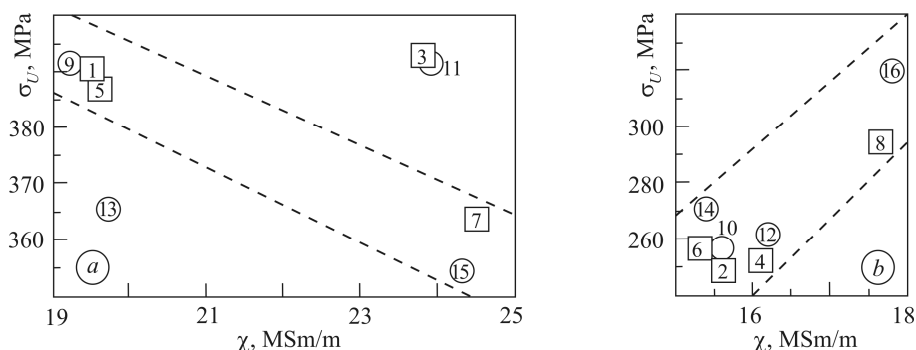


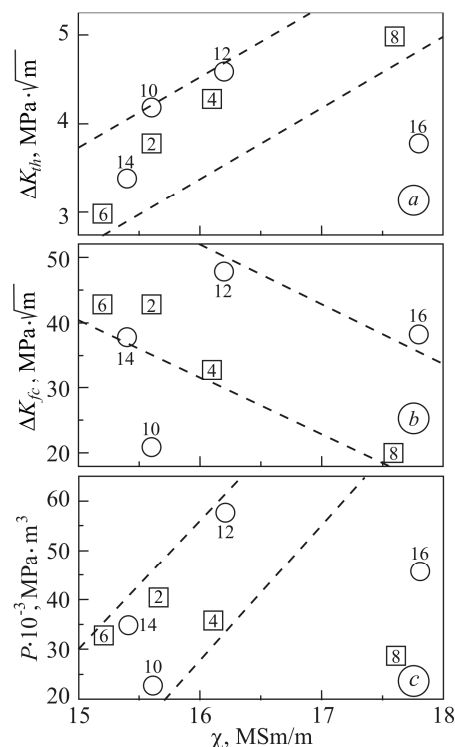
Рис. 2. Залежності між питомою електропровідністю та міцністю ОМ (a) і МШ (b) з'єднань сплавів Д16АТ (□) і Д16А (Т + ШС) (○). Цифри в символах відповідають номеру в табл. 1.

Fig. 2. Dependences between specific electrical conductivity and strength of BM (a) and WM (b) for welded joints of Д16АТ (□) and Д16А (Т + АА) (○) alloys. Numbers in symbols correspond to the number in Table 1.

Рис. 3. Залежності між питомою електропровідністю та порогом втоми (a), циклічною в'язкістю руйнування (b) і параметром конструкційної міцності (c) МШ з'єднань сплавів Д16АТ (□) і Д16А (Т + ШС) (○). Цифри в символах відповідають номеру в табл. 1.

Fig. 3. Dependences between specific electrical conductivity and fatigue threshold (a), cyclic fracture toughness (b), and structural strength parameter (c) of WM for welded joints of Д16АТ (□) and Д16А (Т + АА) (○) alloys. Numbers in symbols correspond to the number in Table 1.

Різні тенденції також можна відстежити для кореляційних залежностей між ПЕП та характеристиками ЦТ і параметром конструкційної міцності для МШ досліджуваних ЗЗ (рис. 3). Якщо для порога втоми  $\Delta K_{th}$  вона порівняно чітко виражена (рис. 3a) і якісно подібна до отриманої для границі міцності (рис. 2b), то для циклічної в'язкості руйнування  $\Delta K_{fc}$  і параметра конструкційної міцності  $P$  менш чітка (рис. 3b, c).



Можна вказати лише певні особливості: зниження  $\Delta K_{fc}$  супроводжується ростом  $\chi$  (рис. 3b), а зростання  $\chi$  відповідає підвищенню  $P$  (рис. 3c). Очевидним є факт, що для встановлення таких кореляційних залежностей потрібна ширша база даних випробувань з'єднань сплаву типу Д16, отриманих за різних технологій зварювання.

### ВИСНОВКИ

За зварювання плавленням термозміцненого алюмінієвого сплаву типу Д16 (система Al–Cu–Mg) (використовуючи імпульсно-дуговий метод і плавкий електрод Зв1201) міцність МШ у стані після зварювання та різних термообробок становить 0,64...0,9 від міцності ОМ, при цьому відносне значення параметра конструкційної міцності  $P_{WM}/P_{BM} = 0,49...1,25$ . Найвищі відношення  $\sigma_U^{WM}/\sigma_U^{BM} = 0,9$  і  $P_{WM}/P_{BM} = 1,25$  отримано, коли зварювали сплав Д16 у стані після гартування і природного старіння зі штучним достарюванням та подальшого гартування і старіння З3. Встановлено тенденції можливих кореляційних залежностей між ПЕП та механічними властивостями ОМ і МШ досліджуваних З3. Вони якісно протилежні для характеристик  $\sigma_U^{BM}$  і  $\Delta K_{fc}^{WM}$  та  $\sigma_U^{WM}$ ,  $\Delta K_{th}^{WM}$  і  $P_{WM}$ .

**РЕЗЮМЕ.** Исследованы сварные соединения листов толщиной 4 mm из алюминиевого сплава Д16Т (аналога сплава 2024-T3) в состоянии поставки (закалка и естественное старение) и после дополнительного искусственного старения. Соединения получены сваркой плавлением импульсно-дуговым методом плавящимся электродом (Зв1201). Установлено, что при использовании определенных режимов термической обработки свариваемого сплава и сварного соединения отношение прочности металла шва (МШ) и основного металла (ОМ) равно 0,9. Комплексный параметр конструкционной прочности  $P = [\sigma_U \cdot \Delta K_{th} \cdot \Delta K_{fc}]$  МШ выше, чем ОМ, в 1,25 раза. Рассмотрена возможность оценки механических характеристик исследуемых сварных соединений неразрушающим методом по значению удельной электропроводности.

**Ключевые слова:** *алюминиевый сплав, сварка плавлением, термообработка, прочность, циклическая трещиностойкость.*

**SUMMARY.** The welded joints of 4 mm thick sheets of aluminum Д16Т alloy (analogue of 2024-T3 alloy) in as-received state (quenching and natural aging) and after additional artificial aging are investigated. The joints are obtained by fusion welding using a pulsed-arc method by a fusible electrode (1201 wire). It is established that after the certain modes of heat treatment of the welded alloys and welded joints, the ratio of the strength of the weld metal (WM) to the base metal (BM) is equal to 0.9. The complex parameter of material structural strength  $P = [\sigma_U \cdot \Delta K_{th} \cdot \Delta K_{fc}]$  of WM predominates the BM in 1.25 times. The possibility of evaluation of the investigated welded joints mechanical characteristics by the non-destructive method based on the value of specific electrical conductivity has been considered.

**Keywords:** *aluminum alloy, fusion welding, heat treatment, strength, fatigue crack growth resistance.*

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 15: О. П. Осташ. Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій. – Львів: СПОЛОМ, 2015. – 312 с.*
2. *Патент України № 105440. Спосіб термічної обробки високоміцних низьколегованих вуглецевих сталей / О. П. Осташ, О. А. Гайворонський, В. Д. Позняков, В. В. Кулик. – Опубл. 25.03.2016; Бюл. № 6.*
3. *A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints / A. Squillare, A. De Fenzo, G. Giorleo, F. Bolluci // J. Mater. Process Tech. – 2004. – 152. – P. 97–105.*
4. *Woodward N. J., Richardson I. M., and Thomas A. Variable polarity plasma arc welding of 6.35 mm aluminium alloys: parameter development and preliminary analysis // Sci. Technol. Welding Joining. – 2000. – 5 (1). – P. 21–25.*

5. *Вплив легування і термообробки на міцність і циклічну тріщиностійкість зварних з'єднань сплаву системи Al–Cu–Mg. Ч. 1* / Т. М. Лабур, О. П. Остап, Ю. В. Головатюк, В. А. Коваль, В. С. Шинкаренко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 2. – С. 7–15.  
(*Influence of alloying and thermal treatment on the strength and cyclic crack resistance of welded joints of alloys of the Al–Cu–Mg system. Part 1* / Т. М. Labur, О. Р. Ostash, Yu. V. Holovatyuk, V. A. Koval', V. S. Shynkarenko // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 2. – P. 131–140.)
6. *Вплив легування і термообробки на міцність і циклічну тріщиностійкість зварних з'єднань сплаву системи Al–Cu–Mg. Ч. 2* / Т. М. Лабур, О. П. Остап, Ю. В. Головатюк, В. А. Коваль, В. С. Шинкаренко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 4. – С. 28–33.  
(*Influence of alloying and thermal treatment on the strength and cyclic crack resistance of welded joints of alloys of the Al–Cu–Mg system. Part 2* / Т. М. Labur, О. Р. Ostash, Yu. V. Holovatyuk, V. A. Koval', V. S. Shynkarenko // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 4. – P. 453–459.)
7. *ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы механических испытаний*. – М.: Изд-во стандартов, 1967. – 26 с.
8. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. ASTM Standards, E 647-08, V03.01, ASTM, 2008.
9. *Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації* / О. П. Остап, Д. С. Ківа, В. М. Учанін, О. І. Семенець, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк // *Техн. діагностика и неразр. контроль*. – 2013. – № 2. – С. 15–22.
10. *Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft* / О. Ostash, V. Uchanin, O. Semenets, Yu. Holovatyuk, L. Kovalchuk, V. Derecha // *Res. in Nondestructive Evaluation*. – 2018. – **29**, № 3. – P. 156–166.
11. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос.* / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остап, В. М. Федірко, В. М. Учанін, С. А. Бичков, О. Г. Моляр, О. І. Семенець, В. С. Кравець, В. Я. Дереча. Під ред. О. П. Остапа і В. М. Федірка. – Львів: СПОЛЮМ, 2007. – 1068 с.
12. *Підвищення конструкційної міцності зварних з'єднань листів зі сплаву системи Al–Cu–Mg* / Ю. В. Головатюк, А. Г. Покляцький, О. П. Остап, Т. М. Лабур // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2018. – **54**, № 3. – С. 112–119.  
(*Elevation of structural strength of welded joints of sheets made of alloy of the Al–Cu–Mg system* / Yu. V. Holovatyuk, A. H. Poklyats'kyi, O. P. Ostash, N. V. Labur // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 3. – P. 412–420.)

Одержано 27.03.2019