

ВПЛИВ НЕРЕГУЛЯРНОГО ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОПІР ВТОМІ ТОНКОЛИСТОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНОЗМІЦНЕНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

В.В. Книш, І.М. Клочков, С.І. Мотруніч, А.Г. Покляцький

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

Досліджено вплив нерегулярного вузькосмугового циклічного навантаження на опір втомі зварних з'єднань термічно-зміцнених алюмінієвих сплавів товщиною 1,8...2,0 мм, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом (АДЗНЕ) та зварюванням тертям з перемішуванням (ЗТП). Визначені основні механічні властивості отриманих зварних з'єднань алюмінієвих сплавів Д16, 1420 та 1460. Побудовані криві втоми досліджуваних зварних з'єднань при вузькосмуговому циклічному блок-програмному навантаженні з близьким до нормального (Гауса) та експоненціального розподілу величини амплітуди напружень. Показано, що міцність та опір втомі зварних з'єднань досліджуваних алюмінієвих сплавів, отриманих ЗТП, перевищують відповідні показники для з'єднань, отриманих АДЗНЕ у всій області довговічності $10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень. Бібліогр. 15, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: алюмінієві сплави, аргонодугове зварювання неплавким електродом, зварювання тертям з перемішуванням, механічні властивості, опір втомі, нерегулярні циклічні навантаження

Зменшення металоємкості виробів з високими експлуатаційними характеристиками та ресурсом є важливим і актуальним напрямком розвитку сучасної техніки. Вирішення цієї проблеми тісно пов'язане з використанням алюмінієвих сплавів різних систем легування [1, 2]. Алюмінієві сплави широко застосовуються для виготовлення вузлів ракетно-носіїв і космічних апаратів, стартових комплексів, суден повітряного та водного призначення, наземного транспорту, сільськогосподарських машин, хімічного обладнання та інших зварних конструкцій, які зазвичай експлуатуються в умовах дії змінних навантажень [3, 4]. В залежності від особливостей змінного навантаження виробів або конструкцій використовуються алюмінієві сплави, зварні з'єднання яких мають необхідні показники опору втомі. Проектування новітніх авіакосмічних виробів передбачає в основному використання алюмінієвих сплавів з низькою питомою вагою, наприклад, високоміцних термічнозміцнених сплавів систем легування Al–Cu–Mg, Al–Cu–Li, Al–Mg–Li [4–6]. Для отримання нероз'ємних з'єднань при виготовленні різноманітних конструкцій із алюмінієвих сплавів у більшості випадків застосовуються технології зварювання плавленням, а також сучасні технології зварювання з меншим тепловим вкладенням, такі як зварювання в твердій фазі тертям з перемішуванням [7, 8].

Переважає більшість зварних металоконструкцій довготривалого використання експлуатуються при дії змінного нерегулярного навантаження [9]. Такі навантаження виникають, наприклад, при перевезенні чи переміщенні вантажів різної величини, під впливом вітру та хвиль, які за своєю природою постійно змі-

нюються, та внаслідок різних видів коливань і вібрацій, що виникають в процесі експлуатації конструкцій. У більшості випадків такий процес навантаження є випадковим і може бути описаний певним законом розподілу випадкової величини амплітуди напружень (наприклад, нормальним розподілом Гауса, розподілом Релея, експоненціальним чи логнормальним розподілом) із заданими параметрами математичного очікування та середнім квадратичним відхиленням [10]. При цьому режими випадкового навантаження відрізняються широкою різноманітністю. Наприклад, в елементах швидкісних транспортних засобів, легких металоконструкцій, антено-щоглових споруд, у конструкціях морських глибоководних стаціонарних платформ та ін., які можна розглядати як слабо демпфуючі механічні системи, зміна експлуатаційних напружень представляє собою вузькосмуговий випадковий процес. Тому врахування особливостей змінного навантаження при проектуванні та розрахунку на втому зварного елемента алюмінієвої металоконструкції або виробу, в умовах якого вони будуть експлуатуватися, є актуальною та важливою задачею, направленою на забезпечення їх надійності і безпечної експлуатації [11]. Саме тому основна мета роботи полягає в дослідженні впливу нерегулярного циклічного навантаження на опір втомі тонколистових стикових зварних з'єднань термічнозміцнених алюміній-літєвих сплавів 1420Т1, 1460Т1 та дюралюмінію – Д16Т, отриманих за технологією аргонодугового зварювання неплавким електродом (АДЗНЕ) та зварюванням тертям з перемішуванням (ЗТП).

Для оцінки межі міцності та досліджень впливу нерегулярного циклічного навантаження на

Книш В.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1289-4462>, Клочков І.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6490-8905>,

Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>, Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>

© В.В. Книш, І.М. Клочков, С.І. Мотруніч, А.Г. Покляцький, 2021

опір втомі тонколистових стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 1420Т1, 1460Т1 та Д16Т використовували листи товщиною 1,8...2,0 мм, механічні властивості яких приведені в табл. 1. Зварювання тертям з перемішуванням здійснювали на розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона лабораторній установці, використовуючи спеціальний інструмент з конічним наконечником і буртом діаметром 12 мм [12], швидкість обертання якого складала 1420 об/хв. Алюмінієві сплави з літієм зварювали на швидкості 14 м/год., а сплав Д16Т – на швидкості 10 м/год. Для порівняння такі ж стикові з'єднання отримували аргонодуговим зварюванням неплавким електродом за допомогою установки MW-450 («Fronius», Австрія) при швидкості зварювання 20 м/год. В якості присадного матеріалу при АДЗНЕ сплавів 1420Т1 і Д16Т використовували присадний дріт СвАМг63, а сплаву 1460Т1 – присадний дріт Св1201 діаметром 1,6 мм. Величина зварювального струму для алюмінієвих сплавів з літієм становила 145 А, а для сплаву Д16Т – 160 А. При цьому ширина швів, отриманих АДЗНЕ, знаходилася на рівні 6,5 мм, а зварених тертям з перемішуванням – 3,5 мм (при ширині зони термомеханічного впливу з лицьової сторони шва близько 12 мм).

З отриманих зварних пластин відповідно до ДСТУ ISO 4136 виготовляли зразки для визначення межі міцності з'єднань при одноосному розтягуванні. Ширина робочої частини зразків становила 15 мм. При цьому на зразках, виконаних зварюванням плавленням, проводили також механічну зачистку підсилення кореневої частини шва врівень з основним матеріалом, як це прийнято при

Таблиця 1. Механічні властивості досліджуваних алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1420Т1	459	322	11
1460Т1	565	523	9
Д16Т	484	347	15

виготовленні більшості конструкцій відповідального призначення. Значення межі міцності досліджуваних зварних з'єднань, отриманих за технологіями АДЗНЕ і ЗТП, приведені в табл. 2.

Втомні випробування зразків з'єднань проводили на універсальному сервогідрравлічному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН. Зразки випробовували при осьовому синусоїдальному навантаженні з постійною асиметрією циклу та частотою навантаження 10...15 Гц до повного руйнування. Криві втомі будували для багатоциклової області довговічності $10^5...2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень.

Випробування при нерегулярному навантаженні проводили при вузькосмуговому спектрі навантаження з близьким до нормального (Гауса) та близьким до експоненціального розподілу величини амплітуди напружень (табл. 3). Асиметрія циклу напружень спектрів навантажень була прийнятою $R_\sigma = 0,1$, оскільки ця асиметрія для конструкцій авіа- та ракетобудування є найбільш пошкоджуючою.

Зразки для втомних випробувань основного металу та зварних з'єднань (рис. 1) сплавів 1420Т1, 1460Т1 та Д16Т, виконаних АДЗНЕ та ЗТП, виготовлялися відповідно до діючого державних та міжнародних стандартів [13, 14].

При одних і тих же умовах випробовували серію з 5...8 однотипних зразків. Експериментальні дані втомних випробувань оброблялися методами лінійного регресійного аналізу, загальноприйнятими для

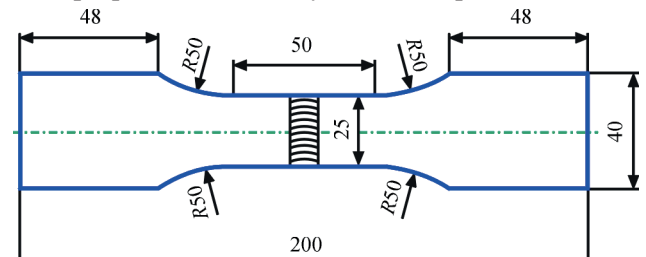


Рис. 1. Вид і геометричні розміри зразка для втомних випробувань стикових зварних з'єднань

Таблиця 2. Межа міцності зварних з'єднань досліджуваних алюмінієвих сплавів, отриманих за технологіями АДЗНЕ та ЗТП

Марка сплаву	АДЗНЕ				ЗТП	
	Зразки з підсиленням		Зразки без підсилення		Зразки без підсилення	
	σ_b , МПа	Місце руйнування	σ_b , МПа	Місце руйнування	σ_b , МПа	Місце руйнування
1420Т1	373	ЗС	320	Шов	342	ЗС
1460Т1	311	ЗС	257	Шов	309	ЗТМВ
Д16Т	330	ЗС	295	Шов	425	ЗТМВ

Таблиця 3. Еквівалентні блоки навантажень для вузькосмугового випадкового спектру напружень

Номер ступені блоку	Спектр № 1 (наближений до нормального розподілу Гауса)		Спектр № 2 (наближений до експоненціального розподілу)	
	Кількість циклів	$\sigma_{a,i} / \sigma_{a,max}$	Кількість циклів	$\sigma_{a,i} / \sigma_{a,max}$
1	18	1	13	1
2	170	0,96	78	0,9
3	1250	0,92	403	0,8
4	5750	0,88	2028	0,7
5	17500	0,84	10153	0,6
6	37812	0,80	50778	0,5

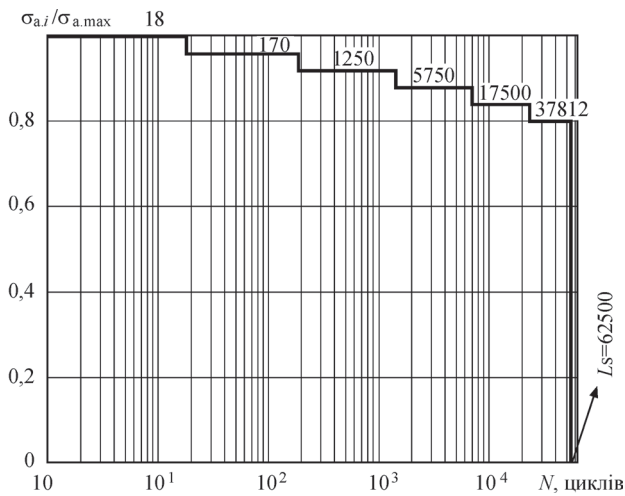


Рис. 2. Блок навантаження зразків сплавів Д16Т1 та 1420Т1 № 1 з наближеною до нормального розподілу Гауса величиною амплітуди напружень

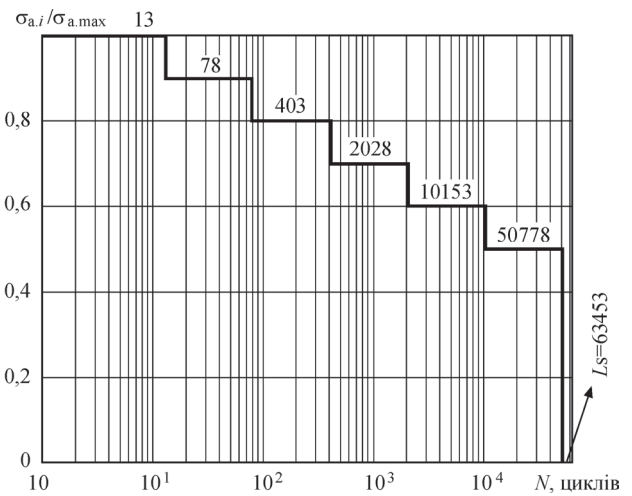


Рис. 3. Блок навантаження зразків з'єднань сплаву 1460Т1 з розподілом величини амплітуди напружень, наближеним до експоненціального закону розподілу

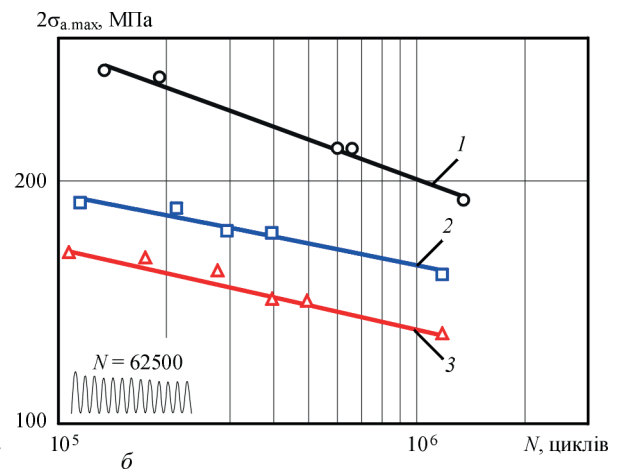
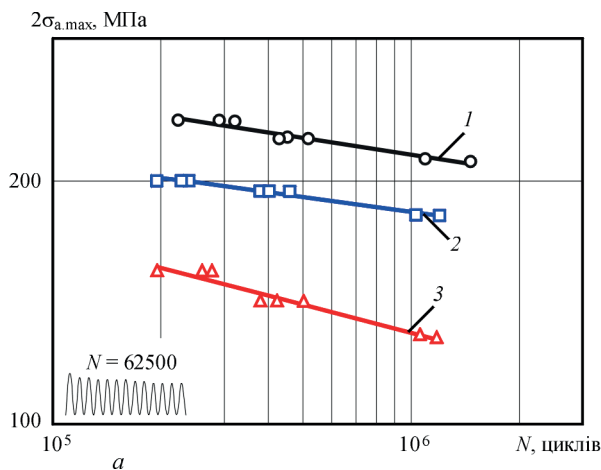


Рис. 4. Криві втоми Гаснера основного металу і зварних з'єднань алюмінієвого сплаву Д16Т1 (а) та 1420Т1 (б) товщиною 1,8 мм при блок-програмному навантаженні № 1: 1 – основний метал; 2 – зварні з'єднання, виконані ЗТП; 3 – зварні з'єднання, виконані АДЗНЕ

такого роду досліджень [15]. За результатами проведених втомних випробувань для кожної серії зразків на основі встановлених значень границь обмеженої витривалості будували відповідні криві втоми – лінії регресії в координатах $\lg(2\sigma_a^{max}) - \lg N$ [11].

Зразки зварних з'єднань сплаву 1420Т1 та Д16Т випробовувались при блок-програмному навантаженні № 1, характерному для конструкцій планера літака. Довжина блоку навантаження складала 62500 циклів змін напружень (рис. 2).

Зразки зварних з'єднань сплаву 1460Т1 випробовувались при блок-програмному навантаженні № 2, характерному для конструкцій, які експлуатуються під дією внутрішнього тиску, наприклад, такі, як криогенні паливні баки. На рис. 3 приведений блок програмного навантаження № 2, характерний для посудин тиску, довжина якого складає 63453 циклів змін напружень.

На рис. 4 приведені криві втоми Гаснера основного металу і зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 1420Т1 та Д16, зварених АДЗНЕ і ЗТП, отримані при блок-програмному навантаженні № 1. Отримані

результати демонструють, що обмежена границя витривалості на базі 10^6 циклів змін напружень для зварних з'єднань сплавів 1420Т1 і Д16Т1, отриманих ЗТП, на 25 та 18 % перевищує відповідні значення для з'єднань, виконаних АДЗНЕ, та складають 83 і 79 % відповідних значень основного металу.

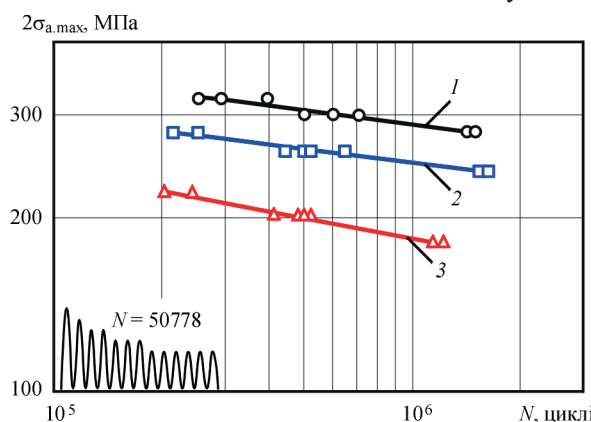


Рис. 5. Криві втоми Гаснера основного металу і зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1460Т1 товщиною 2 мм при блок-програмному навантаженні № 2: 1 – основний метал; 2 – зварні з'єднання, виконані ЗТП; 3 – зварні з'єднання, виконані АДЗНЕ

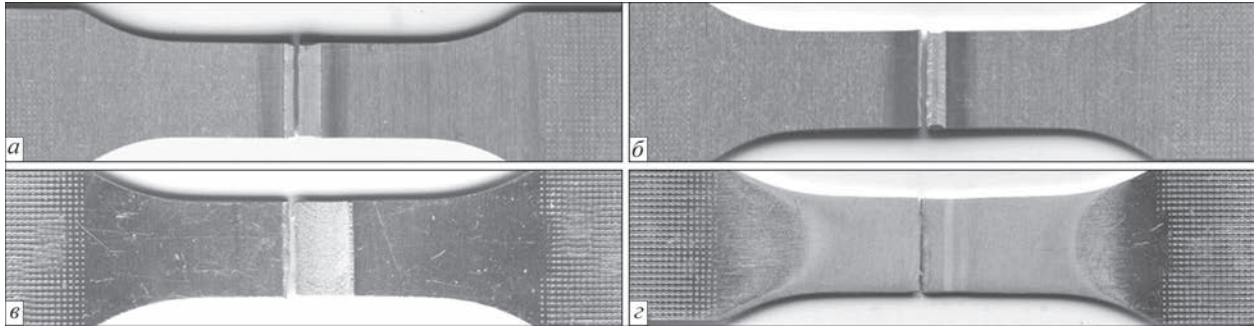


Рис. 6. Зовнішній вигляд лицьової (а, б) і нижньої (в, г) сторони зруйнованих після циклічних випробувань зразків стикових з'єднань сплаву Д16Т товщиною 1,8 мм, отриманих АДЗНЕ (а, б) і ЗТП (в, г)

На рис. 5 приведені криві втоми Гаснера при блочному навантаженні № 2 зварних з'єднань сплаву 1460Т1, виконаних АДЗНЕ і ЗТП. Показано, що значення обмеженої границі витривалості на базі 10^6 циклів складає 85 % для з'єднань, виконаних ЗТП, і 63 % для з'єднань, виконаних АДЗНЕ, по відношенню до відповідного значення основного металу.

Зародження та розповсюдження втомої тріщини у зразках з підсиленням шва зварних з'єднань алюмінієвого сплаву Д16Т, виконаних АДЗНЕ, відбувалося в зоні сплавлення шва з основним металом (рис. 6). Це пояснюється значною концентрацією напружень і значним розміщенням металу в шві та зоні термічного впливу. Руйнування зразків, отриманих ЗТП, відбувалося на межі зон термомеханічного і термічного впливу зі сторони набігання інструмента, де спостерігається значне розміщення металу та утворюється структурна і незначна геометрична неоднорідність.

Руйнування зразків зварних з'єднань сплаву 1420Т1 з підсиленням шва, отриманих АДЗНЕ, також відбувалося в зоні сплавлення шва з основним металом, де в процесі зварювання плавленням виникає значна концентрація напружень (рис. 7). Руйнування зразків з'єднань, отриманих ЗТП, відбувалося в зоні термомеханічного впливу.

Зварні з'єднання сплаву 1460, отримані ЗТП, також руйнувалися на межі зон термомеханічного

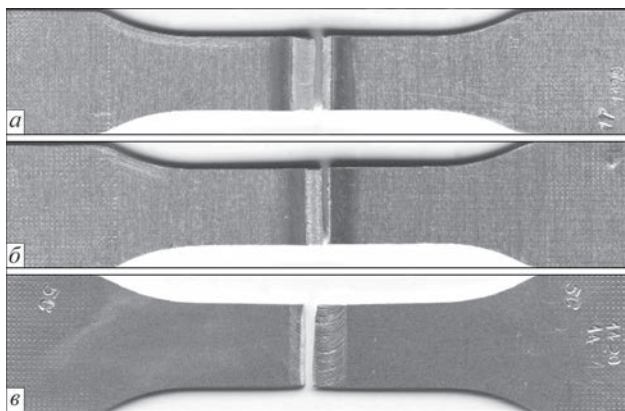


Рис. 7. Зовнішній вигляд лицьової (а, б) і нижньої (в) сторони зруйнованих після циклічних випробувань зразків стикових з'єднань сплаву 1420Т1 товщиною 1,8 мм, отриманих АДЗНЕ (а, б) і ЗТП (в)

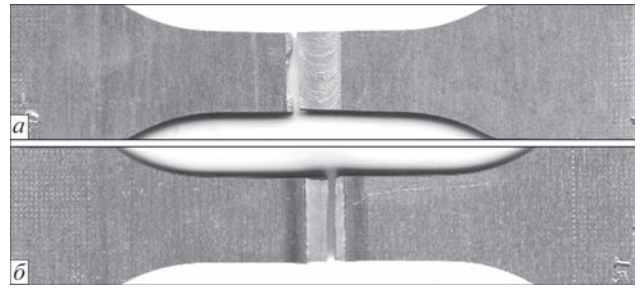


Рис. 8. Зовнішній вигляд лицьової сторони зруйнованих після циклічних випробувань зразків стикових з'єднань сплаву 1460Т1 товщиною 2,0 мм, отриманих ЗТП (а) і АДЗНЕ (б)

і термічного впливу зі сторони набігання інструмента, що зумовлено розміщенням легованого літієм металу в шві та в зоні термомеханічного впливу і утворенням на вказаній ділянці деякої геометричної неоднорідності (рис. 8). Зразки зварних з'єднань з підсиленням шва, отримані АДЗНЕ, руйнувалися в зоні сплавлення шва з основним металом, де виникає значна концентрація напружень і значне розміщення металу.

Висновки

1. Експериментально встановлені криві втоми Гаснера при нерегулярному навантаженні стикових зварних з'єднань термічно зміцнених алюмінієвих сплавів 1420Т1 та 1460Т1, виконаних з використанням технологій ЗТП і АДЗНЕ. Показано, що значення границь обмеженої витривалості таких з'єднань у всьому діапазоні довговічності $10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ становить 70...85 % від відповідних показників основного металу.

2. Отримані криві втоми Гаснера для вузькосмугового випадкового процесу навантаження з наближеною до нормального розподілу Гауса величиною амплітуди напружень для з'єднань сплаву 1420Т1 та Д16Т, виконаних АДЗНЕ та ЗТП. Показано, що при такому навантаженні границя обмеженої витривалості на базі 10^6 циклів для зварних з'єднань, виконаних ЗТП, на 18...25 % перевищує відповідні значення з'єднань, виконаних АДЗНЕ, та складає 79...83 % від границі обмеженої витривалості основного металу.

3. Встановлено, що для з'єднань сплаву 1460Т1, отриманих ЗТП і АДЗНЕ, значення границі обмеже-

ної витривалості на базі 10^6 циклів при вузькосмуговому випадковому процесі навантаження з наближеним до експоненціального закону розподілу величини амплітуди напружень складає 85 та 63 % від відповідного значення основного металу.

4. Зародження та розповсюдження втомної тріщини у зразках зварних з'єднань досліджуваних алюмінієвих сплавів, виконаних АДЗНЕ, відбувалося в зоні сплавлення шва з основним металом, де в процесі зварювання плавленням виникає значна концентрація напружень і відбувається значне розміщення металу. Руйнування зразків, отриманих ЗТП, при циклічних випробуваннях відбувалося на межі зон термомеханічного і термічного впливу зі сторони набігання інструмента, що обумовлено розміщенням металу та утворенням структурної і незначної геометричної неоднорідності на цій ділянці зварного з'єднання.

Список літератури

1. Ищенко А.Я., Лабури Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка.
2. Ищенко А.Я. (2003) Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций. *Прогресивні матеріали і технології*, **1**, 50–82.
3. Adrian, P. (2012) *Mouritz Introduction to Aerospace Materials*. Woodhead Publishing Limited.
4. Fridlyander, I.N., Sister, V.G., Grushko, O.E. et al. (2002) Aluminum Alloys: Promising Materials in the Automotive Industry. *Metal Science and Heat Treatment*, Sept. 44, pp. 365–370.
5. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. (2008) Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств. *ВИАМ/2008-205182, Октябрь*, 51–82.
6. Дриц А.М., Овчинников В.В. (2003) Сравнительные исследования свойств сварных соединений российских и американских алюминий-литиевых сплавов *Цветные металлы*, **12**, 71–77.
7. Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R., Withers, P.J. (2009) Friction stir welding of aluminium alloys. *J. International Materials Reviews*, **54**, **2**, 49–93.
8. Ищенко А.Я. (2004) Особенности применения алюминиевых высокопрочных сплавов для сварных конструкций. *Автоматическая сварка*, **9**, 16–26.
9. Schijve J. (2009) *Fatigue of structures and materials*. 2-nd Ed. Springer. Berlin.
10. Heuler, P., Bruder, T., Klätschke, H. (2005) Standardized load-time histories contribution on to durability issuer under Spectrum loading. *Mat.-wiss.u. Werkstofftech.*, **36**, **11**, 669–677.
11. Sonsino C.M. (2007) Fatigue testing under variable amplitude loading. *Int. J. Fatigue*, **29**, 1080–1089.

12. Ищенко А.Я., Покляцкий А.Г. (2010) *Инструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів*. Україна Пат. 54096, МПК В23К 20/12; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. № u201005315; заяв. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
13. (1979) ГОСТ 25.502-79. *Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость*.
14. (2017) ISO 1099:2017 *Metallic materials – Fatigue testing – Axial force-controlled method*.
15. Дрейпер Н., Смит Г. (1986) *Прикладной регрессионный анализ*. Кн. 1. В 2-х кн. Москва, Финансы и статистика.

References

1. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures of aluminium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Ishchenko, A.Ya. (2003) Aluminium high-strength alloys for welded structures. *Progresywni Materialy i Tekhnologii*, **1**, 50–82 [in Russian].
3. Adrian, P. (2012) *Mouritz introduction to aerospace materials*. Woodhead Publishing Ltd.
4. Fridlyander, I.N., Sister, V.G., Grushko, O.E. et al. (2002) Aluminum alloys: Promising materials in the automotive industry. *Metal Sci. and Heat Treatment*, Sept. 44, 365–370.
5. Gureeva, M.A., Grushko, O.E., Ovchinnikov, V.V. (2008) Welded aluminium alloys in structures of transport facilities. Moscow, *VIAM, October*, 51-82 [in Russian].
6. Drits, A.M., Ovchinnikov, V.V. (2003) Comparative investigations of properties of welded joints of Russian and American aluminium-lithium alloys. *Tsvetnye Metally*, **12**, 71–77 [in Russian].
7. Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R., Withers, P.J. (2009) Friction stir welding of aluminium alloys. *J. Int. Materials Reviews*, **54**, **2**, 49–93.
8. Ishchenko, A.Ya. (2009) Specifics in application of aluminium high-strength alloys for welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 15-25.
9. Schijve, J. (2009) *Fatigue of structures and materials*. 2nd Ed. Springer. Berlin.
10. Heuler, P., Bruder, T., Klätschke, H. (2005) Standardized load-time histories a contribution on to durability issuer under spectrum loading. *Mat.-wiss.u. Werkstofftech.*, **36**, **11**, 669–677.
11. Sonsino, C.M. (2007) Fatigue testing under variable amplitude loading. *Int. J. Fatigue*, **29**, 1080–1089.
12. Ishchenko, A.Ya., Porlyatsky, A.G. (2010) *Tool for friction stir welding of aluminium alloys*. Pat. Ukraine, 54096, Int. Cl. B23K 20/12. Fill. 30.04.2010; Publ. 25.10.2010 [in Ukrainian].
13. (1979) ГОСТ 25.502-79: *Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing* [in Russian].
14. (2017) ISO 1099:2017: *Metallic materials. Fatigue testing. Axial force-controlled method* [in Russian].
15. Drejper, N., Smit, G. (1986) *Applied regression analysis*. Book 1. In: 2 books. Moscow, Finansy i Statistika [in Russian].

INFLUENCE OF IRREGULAR CYCLIC LOAD ON FATIGUE RESISTANCE OF THIN-SHEET WELDED JOINTS OF HEAT-STRENGTHENED ALUMINIUM ALLOYS

V.V. Knys, I.M. Klochkov, S.I. Motrunich, A.G. Poklyatsky

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

The influence of irregular narrow-band cyclic load on fatigue resistance of welded joints of heat-strengthened aluminium alloys with a thickness of 1.8...2.0 mm produced by argon arc welding using non-consumable electrode (AAWNCE) and friction stir welding (FSW) was studied. The main mechanical properties of the produced welded joints of aluminium D16, 1420 and 1460 alloys were determined. The fatigue curves of the investigated welded joints at narrow-band cyclic block-program load with close to normal (Gaussian) and exponential distribution of stress amplitude were plotted. It is shown that the strength and fatigue resistance of welded joints of the investigated aluminium alloys produced by FSW exceed the corresponding values for the joints produced by AAWNCE in the whole range of service life of 10^5 ... $2 \cdot 10^6$ cycles of stress changes. 15 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: aluminium alloys, argon arc welding using non-consumable electrode, friction stir welding, mechanical properties, fatigue resistance, irregular cyclic loads

Надійшла до редакції 28.12.2020