

ВИЯВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ДЕФЕКТІВ НАДМАЛИХ РОЗМІРІВ В АЛЮМІНІЄВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ МЕТОДОМ ШИРОГРАФІЇ

Л.М. Лобанов, О.П. Шуткевич, І.В. Киянець, І.Л. Шкурат, К.В. Шиян, В.В. Савицький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: viktor.savitsky@nas.gov.ua

У сучасній промисловості забезпечення якості зварних з'єднань, зокрема з алюмінієвих сплавів, є важливим завданням для підвищення надійності конструкцій. Особливу увагу приділяють виявленню внутрішніх дефектів, які можуть призвести до їх передчасного руйнування. Метою роботи є розробка та застосування методу ширографічного неруйнівного контролю у поєднанні з термічним навантаженням для виявлення дефектів надмалих розмірів у зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів. Навантаження забезпечувалось автоматизованою системою, яка дозволяла прогрівати поверхню досліджуваних зразків на 3...7 °C протягом 2...4 с. Дослідження показали, що вдосконалене ширографічне обладнання виявляє дефекти розмірами від 0,3 мм у діаметрі, завглибшки до 1,8 мм як у зоні зварного шва, так і в основному металі. Запропоновані параметри термічного навантаження та налаштування оптичної схеми інтерферометра дозволили досягти максимальної чутливості до надмалих дефектів. Метод цифрової ширографії з автоматизованим термічним навантаженням є ефективним для виявлення внутрішніх дефектів у зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів і може бути використаний для неруйнівного контролю у виробничих умовах. Бібліогр. 12, рис. 9.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, ширографія, алюмінієві сплави, дефекти надмалих розмірів

Вступ. Виробництво сучасних деталей і конструкцій високої якості та надійності пов'язано з використанням новітніх конструкційних матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями. Забезпечення високої якості створюваних конструкцій є однією з нагальних науково-технічних проблем. Тому важливо удосконалювати відомі та розробляти нові сучасні автоматизовані методи та засоби контролю якості механізмів і конструкцій. На сьогодні для виявлення дефектів у матеріалах і конструкціях використовують групу неруйнівних методів, таких як радіографічні, акустичні, люмінесцентні, метод вихрових струмів та ін. [1, 2]. Кожен з цих методів має свої недоліки та переваги, але жоден з них не є універсальним і не задовольняє всім вимогам, що висуваються до засобів і методів неруйнівного контролю. У провідних галузях сучасної промисловості, особливо в автомобіле- та суднобудуванні, енергетичному та авіаційно-космічному машинобудуванні при виготовленні тонколистових конструкцій широко використовуються нові конструкційні матеріали. Здебільшого вони працюють у складних механічних і температурних умовах. Тому навіть незначна концентрація напружень, що виникає через дефекти у зварних швах або елементах конструкцій, призводить до їх руйнування.

Однією з основних причин зниження якості конструкцій є приховані дефекти, тобто дефек-

ти, які не було виявлено під час діагностики на підприємстві. Значна частина відмов виробів на початковому етапі їх експлуатації пов'язана з проявом саме таких прихованих дефектів. У більшості випадків вони також є причиною руйнування вузлів та елементів конструкцій у подальшому процесі їх використання. Тому для підвищення якості та надійності вузлів і елементів конструкцій важливим є застосування сучасних методів неруйнівного контролю якості [3–6]. Групу вищезазначених методів контролю якості вдало доповнюють методи лазерної інтерферометрії, особливо спекл-інтерферометричні. Перспективним для інженерних застосувань є метод ширографії [7, 8]. Цей метод дає можливість безпосередньо отримати значення похідних від переміщень і є ефективним при аналізі деформацій. Метод ширографії нечутливий до переміщення об'єкта як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації, а, отже, не потребує особливого захисту від вібрацій.

Інтенсивний розвиток комп'ютерної і обчислювальної техніки дозволив суттєво удосконалити метод ширографії і розробити метод цифрової ширографії [9]. Важливою характерною особливістю даного методу є те, що він дає можливість спостерігати динамічну картину інтерференційних смуг на моніторі в режимі реального часу. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення суттєво складніших задач,

Л.М. Лобанов – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, О.П. Шуткевич – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>,
І.В. Киянець – <https://orcid.org/0000-0002-2559-8200>, І.Л. Шкурат – <https://orcid.org/0009-0003-1888-4203>,
К.В. Шиян – <https://orcid.org/0000-0001-9198-6554>, В.В. Савицький – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>
© Л.М. Лобанов, О.П. Шуткевич, І.В. Киянець, І.Л. Шкурат, К.В. Шиян, В.В. Савицький, 2024

які пов'язані з аналізом деформацій і контролем якості конструкцій, у лабораторних і промислових умовах.

У [10, 11] наведено дослідження щодо виявлення дрібних дефектів у пластинчастих композитах за допомогою широкографії з термічним навантаженням, представлено як експериментальні, так і чисельні результати щодо виявлення невеликих дефектів. У цих статтях термомеханічна скінченно-елементна модель була створена в Abaqus, щоб оцінити різні схеми теплового навантаження для виявлення дефектів. Визначено раціональний вибір еталонної та сигнальної інтерферограм із послідовності нагріву/охолодження для надійного виявлення дефектів. Експериментальні та чисельні результати свідчать про те, що цей підхід дає можливість виявляти міліметрові та субміліметрові дефекти у пластинчастих композитах, армованих вуглецевим волокном.

У [12] пропонується метод фазової обробки в реальному часі з високочастотною синхронізацією цифрової камери, п'єзокерованого дзеркала та навантаження для покращення якості фазової картини та ефективності захисту від перешкод у процесі фазового зсуву. Метод застосовано до оптичних неруйнівних вимірювальних систем широкографії/ESPI для виявлення незначних дефектів розриву з мінімальним розміром 2 мм і оцінки міжфазної адгезійної міцності шарів зв'язування відповідно. На даний час цифрова широкографія інтенсивно розвивається і має такі переваги, як наочність, безконтактність, висока чутливість, можливість виконання досліджень об'єктів складної форми та значних розмірів у реальному масштабі часу.

Метою даної роботи є розробка технології для виявлення внутрішніх дефектів надмалих розмірів (діаметром менше 1 мм) в алюмінієвих зварних з'єднаннях із використанням методу цифрової широкографії у поєднанні з автоматизованим термічним навантаженням.

Метод широкографії для неруйнівного контролю якості. Для проведення експериментів з неруйнівного контролю якості застосовувалась широкографічна система, що базується на інтерферометрі Майкельсона і чутлива до деформацій, які ортогональні площині об'єкта (рис. 1). Проведення широкографічних експериментів здійснювалось за допомогою розроблених авторами програм, які містять додаткові опції для керування термічним навантаженням. Вони дозволяють встановлювати час запису початкового стану, вмикання та вимикання температурного навантаження, час запису навантаженого стану, а також час експортування

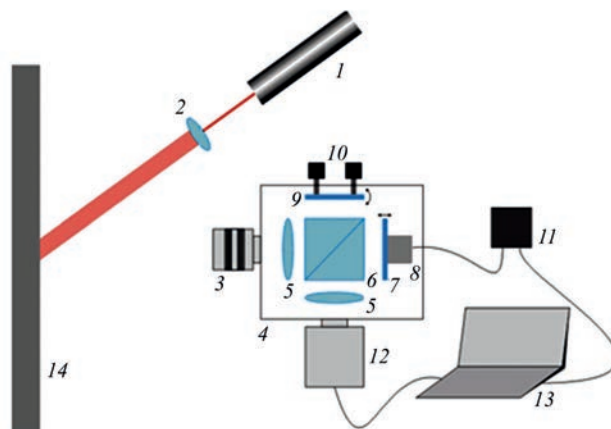


Рис. 1. Блок-схема широкографічної системи: 1 – джерело когерентного випромінювання; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – об'єктив; 4 – широкографічний інтерферометр, який містить лінзи 5, світлоподільний кубик 6, дзеркало 7, закріплене на п'єзoelementі 8, дзеркало 9, яке створює зсув зображення за допомогою гвинтів 10; 11 – контролер для керування п'єзoelementом 8; 12 – цифрова камера; 13 – ноутбук; 14 – досліджуваний об'єкт



Рис. 2. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра із лазерними модулями та змінним об'єктивом

початкового та навантаженого станів до програми для опрацювання отриманих зображень.

Неруйнівний контроль якості алюмінієвих зварних з'єднань методом широкографії. Експерименти з неруйнівного контролю методом широкографії у поєднанні з термічним навантаженням були виконані на зварних зразках із алюмінієвого сплаву. Зразки мали плоску форму і були виготовлені шляхом зварювання тертям з перемішуванням. У процесі проведення експериментів зраз-

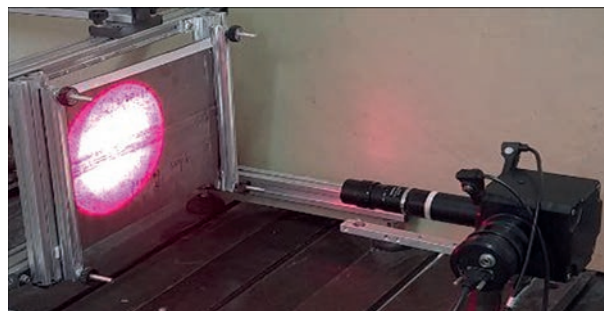


Рис. 3. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра з 10-кратним оптичним збільшенням і тестового зразка, що закріплений у фіксуючу рамку

ки закріплювались у фіксуючу рамку, яка дозволяла прикладати термічне навантаження (рис. 3). При цьому навантаження проводилось в автоматичному режимі за допомогою створеного програмного забезпечення. Запис широграм здійснювався як на стадії нагріву, так і на стадії охолодження з 10-кратним оптичним збільшенням, яке досягалось за рахунок встановлення об'єктива з фокусною відстанню 75 мм і додаткового оптичного кільця. Широкурс обирався вздовж напрямку OX або OY , а його величина складала 10 мм.

У процесі контролю алюмінієвих зразків застосовували термічне навантаження гарячим повітрям за допомогою промислового фена. Температура нагріву повітря задавалася 500 °С, відстань від фена до поверхні зразка ~20 мм, нагрів тривав 2...3 с, зміна температури поверхні при цьому складала до 10 °С.

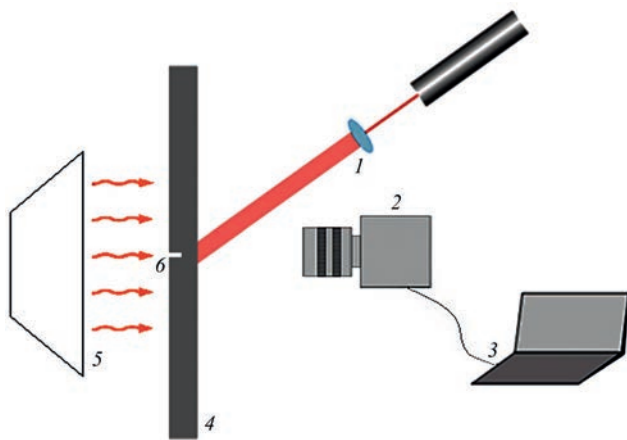


Рис. 4. Схема проведення експерименту: 1 – лазерне випромінювання; 2 – широкографічний інтерферометр; 3 – ноутбук; 4 – досліджуваний зразок; 5 – джерело нагріву; 6 – некрізнний отвір

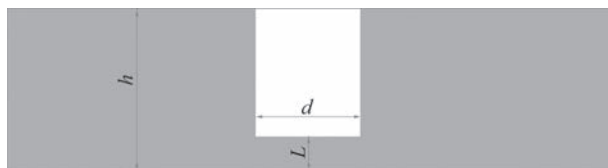


Рис. 5. Схема розташування дефекту в зварному зразку: h – товщина зразка, d – діаметр отвору, L – глибина залягання (товщина стінки, яка залишається після висвердлювання некрізного отвору діаметром d)



Рис. 8. Широкографічний контроль досліджуваної ділянки зварного шва алюмінієвого зразка: загальний вигляд ділянки з дефектами (a) і типова картина виявлених дефектів діаметром $d = 0,3$ мм і завглибшки $L = 0,35$ і $0,85$ мм (б)

На рис. 5 представлено схему розташування дефекту в зварному зразку. На рис. 6 представлено параметри, які використовувались для проведення автоматичного термічного навантаження. На першому кроці (Step1) записується початковий стан об'єкта. На другому кроці (Step2) вмикається та на третьому (Step3) вимикається температурне навантаження. На четвертому кроці (Step4) записується спекл-картина деформованого стану об'єкта. На п'ятому кроці (Step5) початковий і кінцевий стани об'єкта експортуються в програму для опрацювання.

Для відпрацювання методики виявлення дефектів на основному металі зварного зразка завтовшки $h = 2,5$ мм було висвердлено некрізні отвори діаметром $d = 0,5...0,8$ мм і завглибшки

Program settings			
Step1	Record Initial	1000	ms
Step2	Start Loading 1	2000	ms
Step3	Stop Loading 1	4000	ms
Step4	Record Final	4500	ms
Step5	Export I1	5000	ms

Рис. 6. Параметри навантаження досліджуваного зразка у мілісекундах

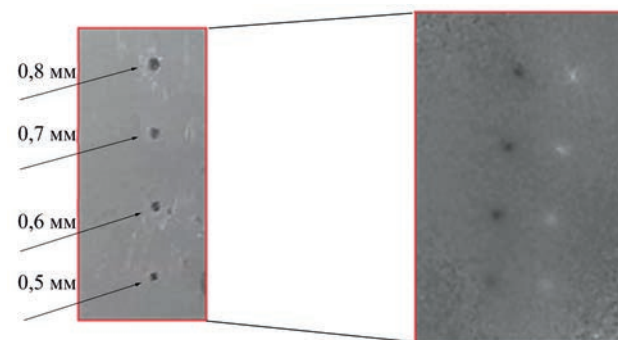


Рис. 7. Широкографічний контроль тестової ділянки алюмінієвого зразка: загальний вигляд ділянки (a) і типова картина виявлених дефектів діаметрами $d = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ мм (б)

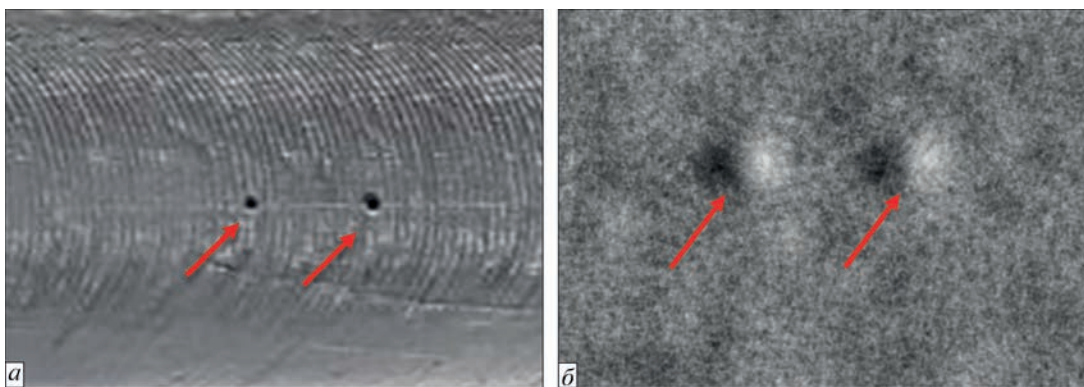


Рис. 9. Ширографічний контроль досліджуваної ділянки зварного шва алюмінієвого зразка: загальний вигляд ділянки з дефектом (а) і типова картина виявлених дефектів діаметром $d = 0,3$ мм і завглибшки $L = 1,8$ і $1,5$ мм (б)

$L = 0,1$ мм (рис. 7, а). Результати, які показують наявність дефектів на досліджуваній ділянці, наведено на рис. 7, б. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектної зони. Оскільки широзсув значно більший за розмір створених некрізних отворів, то такі дефекти проявляються на фоні рівномірного деформування як дві окремі ділянки у напрямку та на відстані широзсуву (темна та світла).

Після відпрацювання методики ширографічного контролю на тестових отворах проводився контроль дефектів надмалих розмірів. Дефекти являли собою отвори діаметром $d = 0,3$ мм та різної глибини висвердлення, що розташовані у зварному шві, виконаному зварюванням тертям з перемішуванням. Результати контролю дефектних ділянок представлено на рис. 8, 9.

На приведених широграмах чітко видно локальні особливості, що характеризують наявність закладених дефектів.

Висновки

Розроблено методику визначення дефектів надмалих розмірів ($<1,0$ мм), що знаходяться як на ділянках основного металу алюмінієвих зварних з'єднань, так і в зоні зварного шва. Це було досягнуто за рахунок використання ширографічного інтерферометра з 10-кратним оптичним збільшенням, вибором широзсуву, який більший за розміри дефектів, а також автоматизованого дозованого термічного навантаження. Експериментально підтверджено, що запропонований підхід дає можливість виявляти дефекти з мінімальним розміром $0,3$ мм у діаметрі, які знаходяться під поверхнею на глибині $0,35 \dots 1,8$ мм.

Список літератури/References

- (2001) *Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, Фіз.-мех. ін-т. (2001) Non-destructive testing and technical diagnostics. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
- Rastorgi, P.K., Inaudi, D. (2000) *Trends in optical non-destructive testing and inspection*. Oxford, Elsevier Science B.V.
- Nazarchuk, Z.T., Muravsky, L.I., Kuts, O.G. (2022) Nondestructive testing of thin composite structures for subsurface defects detection using dynamic laser speckles. *Research in Nondestructive Evaluation*, 33(2), 59–77. DOI: <https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407>
- Lai, W.L., Kou, S.C., Poon, C.S. et al. (2009) Characterization of flaws embedded in externally bonded CFRP on concrete beams by infrared thermography and shearography. *J. Nondestruct. Eval.*, 28(1), 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-009-0044-x>
- Vandenrijt, J.F., Xiong, H., Lequesne, C. et al. (2019) Shearography inspection of monolithic CFRP composites: finite element modeling approach for assessing an adequate strategy of artificial defects representing delamination. In: *Conf. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, Vol. 11056, pp. 107–113. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2527445>
- Menner, P., Gerhard, H., Busse, G. (2011) Lockin-interferometry: Principle and applications in NDE. *Strojnicki vestnik – J. of Mechanical Engineering*, 57(3), 183–191. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.169>
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 8, 35–40
- Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.: Reports*, 49(3), 61–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001>
- Лобанов Л.М., Савицький В.В., Киянець І.В. та ін. (2021) Неруйнівний контроль якості елементів титанових стільникових панелей методом ширографії з використанням вакуумного навантаження. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, 4, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02>
- Lobanov, L.M., Savytskyi, V.V., Kyianets, I.V., Shutkevich, O.P., Shyian, K.V. (2021) Non-destructive testing of elements of titanium honeycomb panels by shearography method using vacuum load. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02> [in Ukrainian].
- Tao, N., Anisimov, A.G., Groves, R.M. (2024) Shearography with thermal loading for defect detection of small defects in CFRP composites. In: *Proceedings of the 21st European Conference on Composite Materials (ECCM21)*, 02-05 July 2024, Nantes, France, Vol. 4 – Experimental techniques, pp. 85–90.
- Tao, N., Anisimov, A.G., Groves, R.M. (2022) Shearography non-destructive testing of thick GFRP laminates: Numerical and experimental study on defect detection with thermal loading. *Compos. Struct.*, 282, 115008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115008>
- Bin Liu, Shuo Wang, Mingming Zhan et al. (2022) Optical nondestructive evaluation for minor debonding defects and interfacial adhesive strength of solid propellant. *Measurement*, Vol. 194, 111066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111066>

DETECTION OF INTERNAL MICRODEFECTS IN ALUMINUM WELDED JOINTS BY THE SHEAROGRAPHY METHOD

L.M. Lobanov, O.P. Shutkevych, I.V. Kyyanets, I.L. Shkurat, K.V. Shyyan, V.V. Savitsky

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: viktor.savitsky@nas.gov.ua

In modern industry, ensuring the quality of welded joints, particularly those made from aluminum alloys, is a crucial task for enhancing the reliability of structures. Special attention is paid to detecting internal defects that may lead to premature failure. The aim of this work is to develop and apply a shearography non-destructive testing in conjunction with thermal loading to detect micro-sized defects in welded joints of aluminum alloys. Loading was provided by an automated system that allowed the surface of the tested samples to be heated by 3-7°C for 2-4 seconds. The studies showed that the advanced shearographic equipment can detect defects as small as 0.3 mm in diameter, with a depth of up to 1.8 mm, both in the weld zone and in the base metal. The proposed parameters of thermal loading and the settings of the interferometer optical scheme allowed achieving a high sensitivity to micro-defects. The shearography method with automated thermal loading is effective for detecting internal defects in welded joints of aluminum alloys and can be used for non-destructive testing in production conditions. 12 Ref., 9 Fig.

Keywords: non-destructive testing, shearography, aluminum alloys, microdefects

Отримано 14.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 15.11.2024

Прийнято 20.12.2024

