

УДК 621.791.18.05:661.874-047.37

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup1.15

А. Ф. САНІН, І. О. МАМЧУР, С. І. МАМЧУР

Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОУТВОРЕННЯ ПІСЛЯ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ З'ЄДНАННЯ НІКЕЛЬ-НІОБІЙ

Дифузійне зварювання - ідеальне рішення для з'єднань різномірних матеріалів. Цей спосіб особливо ефективний, якщо треба отримати міцне монолітне з'єднання без утворення грубого зварного або паєчного шва. Його застосовують, якщо неможливо використовувати стандартні засоби кріплення. Основна сфера застосування цього виду зварювання - область високих технологій - авіаційної, космічної та інших видів важкого машинобудування. Всі переваги роблять процес незамінним при певних умовах і відносять його до високотехнологічного виду. В роботі розглянуто з'єднання різномірних металів нікель-ніобій. У зв'язку з утворенням між цими металами ряду інтерметалідів, обрано технологію дифузійного зварювання у вакуумі. Цей спосіб дозволяє з'єднувати матеріали без розплавлення, за рахунок взаємної дифузії компонентів. Параметри зварювання впливають на фазоутворення дифузійної зони. Для дослідження фазового складу пропонується методика мікроструктурного, мікрорентгеноспектрального аналізу, а також діаграму стану нікель-ніобій. Під час дослідження зварюємості системи нікель-ніобій виготовлялись зразки у вигляді кубу зі стороною 10мм, який затискали в оправці та заливали сплавом Вуда. Зразки не піддавались травленню, тому що в процесі полірування за причини різної твердості фаз структура виявлялась тепловим поліруванням. Пропонується схема дозволила детально вивчити фазовий склад окремих слоїв дифузійної зони, їх розміри та залежність від параметрів зварювання. За результатами кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу не отримали точних даних фазового складу та протяжності дифузійних слоїв. Якісний мікрорентгеноспектральний аналіз, який проводився безперервним скануванням електронним зондом через дифузійну зону, дозволив зафіксувати рефлексії фаз на концентраційних кривих та встановити протяжність дифузійних слоїв. Для більш наочного уявлення розташування фаз розглянуто суміщену діаграму нікель-ніобій з концентраційною кривою. Проведені дослідження дозволили отримати якісне з'єднання, яке має механічні властивості, що забезпечують надійність в умовах експлуатації.

Ключові слова: мікрорентгеноспектральний аналіз; концентраційна крива; нікель; ніобій; фазоутворення.

Вступ

Умови експлуатації з'єднань, які зварюються часто представляють специфічні вимоги до матеріалів. Розробка режимів зварювання орієнтована на отримання наступних характеристик якості: герметичність, ерозійна стійкість та інше [1]. В цьому випадку недостатню міцність або пластичність з'єднання усувають конструкційними методами. Такі методи застосовуються у випадку з'єднання матеріалів які утворюють під час зварювання інтерметалідів. В роботі розглянута пара нікель-ніобій, яка утворює ряд інтерметалідів [2]. Пропонується метод дифузійного зварювання у вакуумі, який має наступні переваги: прецизійна точність обробки; відсутність явно вираженого шва; монолітність з'єднання; можливість зварювати матеріали, що не сполучаються іншим способом; можливість створювати вироби складної конструкції і конфігурації; мала витрата енергії; відсутність необхідності в застосуванні додаткових елементів, таких як присадки, електроди, прибої та флюси; екологічність зва-

ривального процесу - не має бризок розплаву, шкідливих випромінювань і газових виділень, відсутній викид ультрафіолету; висока міцність з'єднання; зручність створення пустотілих конструкцій, в тому числі композитних; економічність - в одній операції можна поєднати кілька різномірних матеріалів.

1. Постановка задачі дослідження

Метою роботи було дослідження формування дифузійної зони з'єднання нікель-ніобій. Склад і фазоутворення визначають якість з'єднання матеріалів, які утворюють інтерметалідні з'єднання. В якості методу отримання деталі обрано дифузійне зварювання у вакуумі. Цей метод дозволяє регламентувати параметри процесу, відповідно і протяжність фазових слоїв

Матеріал досліджень. Матеріалами досліджень були нікель та ніобій. Для розширення дифузійної зони виготовлялись косі мікрошліфи для вивчення деталей структуроутворення.

2. Результати досліджень

Для аналізу взаємодії нікелю з ніобієм було розглянуто діаграму стану [3]. Були розглянуті процеси за температури 1370 К, тому що ця температура обрана для дифузійного процесу зварювання. Встановлено, що утворюються 2 типи твердого розчину (зі сторони нікелю і ніобію), а також суміші цих твердих розчинів з двома типами інтерметалідів NbNi та NbNi₃. Після завершення процесу зварювання та охолодження фазовий склад в дифузійній зоні залишається незмінним (рис. 1).

Розташування фазових слоїв від нікелю до ніобію може відповідати порядку розташування цих фаз на діаграмі нікель-ніобій, за умови, що дифузія нікелю та ніобію пройшла рівномірно в обидва компоненти [3]. Для отримання достовірної інформації проводили мікрорентгеноспектральний аналіз, на основі якого були побудовані концентраційні криві по точкам. Вони не мають яскраво виражених рефлексів, які свідчать про утворення фаз. На кривій були чітко виділені інтерметаліди NbNi та NbNi₃, але на цих ділянках немає рефлексів інтерметалідів, зміна концентрації протікає повільно [4]. Єдина інформація, яку можна отримати по кривих – точки перегибу від 100 % нікелю і ніобію. Це дає змогу

визначити всю ширину дифузійної зони, вимірюючи протяжність ділянки з урахуванням масштабу [5,6]. Таким чином, за матеріалами кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу визначення розташування фаз, їх розміру і послідовності в дифузійній зоні не можливо.

Більш суттєву деформацію дають концентраційні криві якісного мікрорентгеноспектрального аналізу. Якщо розглянути концентраційні криві розподілення нікелю і ніобію в дифузійній зоні, кожна концентраційна крива записана зі значним запасом фону 100 % та 0 % кожного компоненту. Такий запис необхідний для повного захвату сканування всієї дифузійної зони. На кривих яскраво виражені графічні рефлекси, які характеризують фази і суміш фаз [6]. Проекція цих рефлексів на концентраційні вісі сумісно з діаграмою стану нікель-ніобій підтверджує фазовий склад дифузійної зони. Рефлекси інтерметалідів NbNi та NbNi₃ попадають в інтервали концентрацій з діаграми. Точки перегибів, які означають початок і кінець фазового слою твердого розчину, його суміші з інтерметалідами, а також початок і кінець слою інтерметалідів, чітко розрізняються для кожного поля на обох концентраційних кривих. Це дозволяє визначити протяжність фазового поля доволі точно.

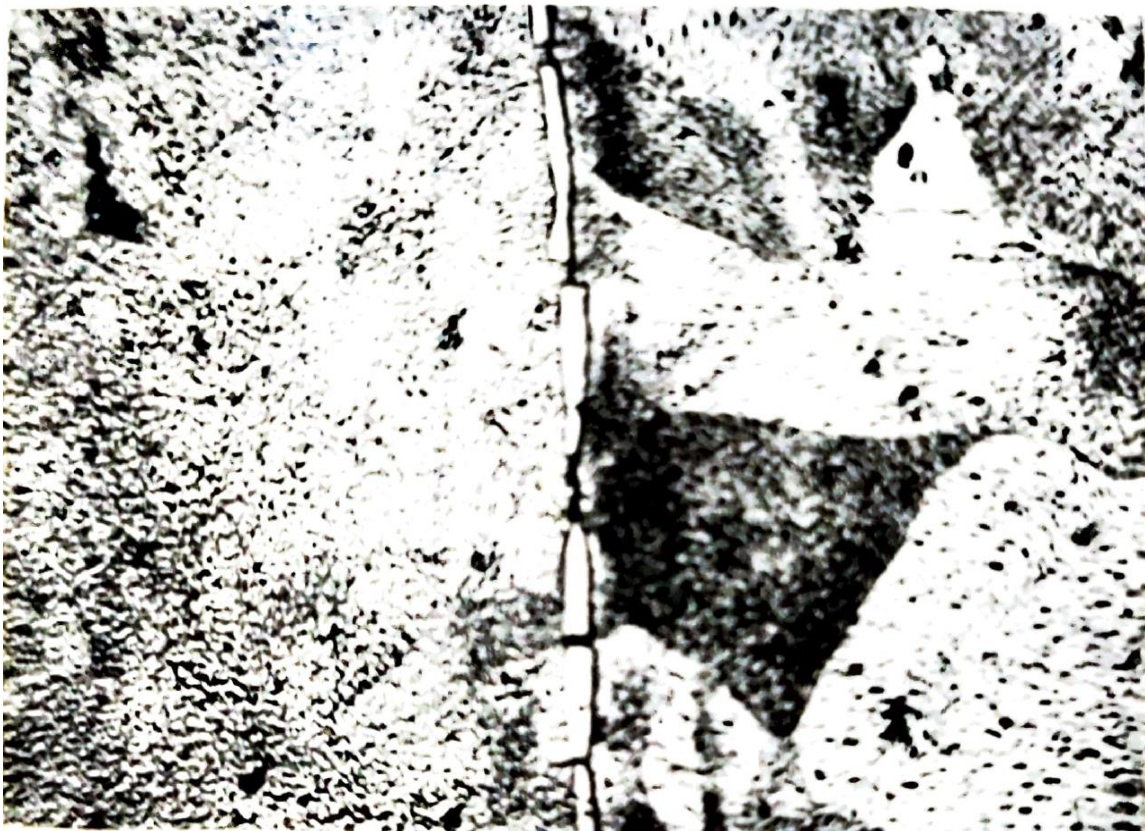


Рис. 1. Мікроструктура дифузійної зони з'єднання нікеля з ніобієм (x500)

Висновки

Аналізуючи отримані дані для системи нікель-ніобій, встановили, що використання мікрорентгеноспектрального аналізу сумісно з мікроструктурним, а також використання сумісних діаграм стану дають можливість більш детально вивчати фазовий склад окремих слоїв дифузійної зони, розміри дифузійних слоїв, зміну їх протяжності із зміною параметрів зварювання та вимірювати загальну протяжність дифузійної зони.

Встановлено, що результати кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу та концентраційні криві, побудовані за їх результатом, не дають точних даних про фазовий склад у зв'язку з відсутністю яскраво виражених рефлексів інтенсивності на мікроскопічних фазових ділянках. Це пов'язано з пропуском фазових слоїв під час переміщення електронного зонда.

В процесі зварювання в твердій фазі положення дифузійної зони та її підслоїв може змінюватись у зв'язку з різницею парціальних коефіцієнтів дифузії або їх зміни під час зустрічної дифузії в результаті утворення фазових слоїв.

Найбільш переважним для вивчення дифузійних зон з'єднань, які зварюються в твердій фазі, є якісний метод, який проводиться скануванням електронним зондом через дифузійну зону. Він дозволяє фіксувати рефлексії фаз на безперервних концентраційних кривих і точно вимірювати їх протяжність.

Література

1. Уравнение индентирования [Текст] / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский, Н. А. Мамека // Доп. Нац. Академії наук України. – 2007. – № 12. – С. 100–106.
2. Люшинский, А. В. Диффузионная сварка разнородных металлов [Текст] / А. В. Люшинский. – М. : Академия, 2006. – 208 с.

3. Казаков, Н. Ф. Диффузионная сварка материалов [Текст] / Н. Ф. Казаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.

4. Гуревич, С. М. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов [Текст] / С. М. Гуревич, В. Н. Замков. – К. : Наукова думка, 2017. – 300 с.

5. Какзаков, Н. Ф. Диффузионная сварка за рубежом [Текст] / Н. Ф. Какзаков, А. Г. Браун // Автоматическая сварка. – 1984. – № 11. – С. 50–54.

6. Пешков, В. В. Диффузионная сварки титановых слоистых конструкций аэрокосмической техники [Текст] / В. В. Пешков, А. Б. Булков. – Воронеж : ФГБОУ ВПО, 2016. – 312 с.

References

1. Firstov, S. A. Uravnenye yndentyrovaniya [Indentation equation]. Add. National Academy of Sciences of Ukraine, 2007, no. 12, pp. 100–106.
2. Lyushinsky, A. V. Dyffuzyonnaia svarka raznorodnykh metallov [Diffusion welding of dissimilar metals]. Moscow, Academy Publ., 2006. 208 p.
3. Kazakov, N. F. Dyffuzyonnaia svarka materialov [Diffusion welding of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 312 p.
4. Gurevich, S. M., Castles, V. N. Metallurgy and welding technology of titanium and its alloys]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2017. 300 p.
5. Kakzakov, N. F., Brown, A. G. Dyffuzyonnaia svarka za rubezhom [Diffusion welding abroad]. Automatic welding, 1984, no. 11, pp. 50–54.
6. Peshkov, V. V., Bulkov, A. B. Dyffuzyonnaia svarka tytanovykh sloystykh konstruktseyi aerokosmicheskoi tekhniki [Diffusion welding of titanium layered structures of aerospace engineering]. Voronezh, FGBOU VPO Publ., 2016. 312 p.

Надійшла до редакції 22.05.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

STUDY OF PHASE FORMATION AFTER DIFFUSION WELDING IN VACUUM OF NICKEL-NIOBIUM COMPOUND

Anatoliy Sanin, Igor Mamchur, Stella Mamchur

Diffusion welding is the ideal solution for joining dissimilar materials. This method is particularly effective if you should get a strong monolithic joint without the formation of a rough weld or solder seam. It is used if it is impossible to use standard fasteners. The main scope of this type of welding is the area of high technologies - aviation, space and other types of heavy engineering. All the advantages make the process indispensable under certain conditions and classify it as a high-tech type. This paper considers compounds of dissimilar metals nickel-niobium. In connection with the formation of many intermetallic compounds between these metals, the technology of diffusion welding in a vacuum was chosen. This method allows you to connect materials without melting due to the mutual

diffusion of the components. The welding parameters affect the phase formation of the diffusion zone. To study the phase composition, a method of microstructural, X-ray microanalysis, as well as a state diagram of nickel-niobium, is proposed. When studying the weldability of the nickel-niobium system, samples were made in the form of a cube with a side of 10 mm, which was clamped in a mandrel and filled with Wood's alloy. The samples were not subjected to digestion, since during the polishing process, due to the different hardness of the phases, the structure turned out to be thermal polishing. The proposed scheme made it possible to study in detail the phase composition of individual layers of the diffusion zone, their dimensions and dependence on welding parameters. According to the results of quantitative X-ray microanalysis, we did not obtain accurate data on the phase composition and extent of diffuse layers. Qualitative X-ray spectral microanalysis, which was carried out by continuous scanning with an electron probe through the diffuse zone, made it possible to fix the phase reflections on the concentration curves and to determine the extent of the diffusion layers. For a more visual representation of the arrangement of the phases, a combined nickel-niobium diagram with a concentration curve is considered. The studies carried out made it possible to obtain a high-quality joint with mechanical properties that ensure reliability under operating conditions.

Keywords: micro-X-ray spectral analysis; concentration curve; Nickel; niobium; phase formation.

Санін Анатолій Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технології виробництва, Дніпровський Національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Мамчур Ігор Олександрович – асп. каф. технології виробництва, Дніпровський Національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Мамчур Стелла Ігорівна – канд. техн. наук, доц. каф. технології виробництва, Дніпровський Національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Anatoliy Sanin - Doctor of Technical Sciences, Prof., Head of Production Technology Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: Afedsa60@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5614-3882.

Igor Mamchur - PhD student of Production Technology Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: mamchurmoney@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9957-5685.

Stella Mamchur - PhD, Associate Professor of Production Technology Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: 1964stella1965@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8146-8849.