

УДК 539.43:669.295

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЯНИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЖАРОТРИВКОГО СПЛАВУ Ni–20Cr–6Al–1Ti–1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

О. Ф. САЛЕНКО<sup>1</sup>, В. Т. ЩЕТИНІН<sup>1</sup>, Є. Є. ЛАШКО<sup>1</sup>, І. О. ГУСАРОВА<sup>2</sup>,  
В. П. СОЛНЦЕВ<sup>3</sup>, О. О. СИТНИК<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського;

<sup>2</sup> Державне підприємство “Конструкторське бюро Південне” ім. М. К. Янгеля, Дніпро;

<sup>3</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Київ;

<sup>4</sup> НПО “Карма”, Світловодськ

Досліджено вплив режимів паяння у вакуумі тонколистових заготовок зі сплаву Ni–20Cr–6Al–1Ti–1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на механічні властивості одержуваного з’єднання. Виявлено, що за паяння дрібнодисперсною сумішшю порошків нікелю, вольфраму та бору при 1350°C з витримкою 20 min у вакуумі 10<sup>-3</sup> Pa забезпечується міцність з’єднання до 320 МПа. Одержано рівняння, що пов’язують границю міцності з’єднання та температурні деформації тонких пластин з режимами паяння.

**Ключові слова:** жаротривкий сплав, вакуумне паяння, тонколистові заготовки, механічні властивості.

Жаротривкі багатокомпонентні сплави застосовують у спеціальному машинобудуванні, оскільки з успіхом витримують дію високих температур (до 1100...1200°C), зберігаючи при цьому задовільну міцність, жорсткість, твердість та інші механічні характеристики. Серед великої кількості марок жаротривких нікель-хромових сплавів – найперспективніші дисперсійно зміцнені, отримані методом спікання [1]. Крім вказаних властивостей, вони мають меншу питому вагу, що надзвичайно важливо для аерокосмічної галузі. Придатним для виготовлення багатопарових теплозахисних систем аерокосмічних апаратів є зміцнений наночастинками Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сплав Ni–20Cr–6Al–1Ti–1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [2, 3], який задовільно піддається дифузійному зварюванню та зварюванню-паянню [4].

Вивченню властивостей нероз’ємних з’єднань, одержаних дифузійним зварюванням або паянням багатокомпонентних жароміцних сплавів, присвячено чимало праць [5, 6], де в основному встановлено закономірності формування біляшовної зони та зони адгезійного контакту, які й визначають опір руйнуванню конструкції загалом. При цьому дослідники зосереджують увагу здебільшого на з’єднанні достатньо жорстких елементів, для яких площа контакту допускає напруження в межах 20...45 МПа, необхідні для формування якісного з’єднання.

Згідно із вимогами до з’єднань елементів теплозахисної системи [7] паяння має забезпечувати не тільки високу короткочасову міцність стику, а і довготривалу в умовах підвищених температур (до 800°C). Щоб отримати якісне паяне з’єднання в багатокомпонентних сплавах, необхідно забезпечити рівномірне нагрівання у вакуумній печі всієї площини стику до температур 1320...1375°C. Як прийом використовують дрібнодисперсний порошок нікелю або суміш бору, вольфраму і алюмінію на нікелевій основі. Крайки обробляють механічним способом, травлять для видалення оксидних плівок з поверхонь контакту, а порошок

вводять тонким шаром між стикованими поверхнями. Однак у сплаві, в якому присутні металева (Ni–Cr), оксидна (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та інтерметалідна (Ni<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>) фази, витримка в печі впродовж певного часу при температурах дифузії нікелю (понад 1200°C) призводить до зростання кількості інтерметалідів. У результаті твердість матеріалу підвищується [8], погіршуються пружні та втрачаються пластичні властивості, а також знижується границя міцності паяного з'єднання [9, 10].

Теплозахисні системи – це плитки-стільники, з'єднані U-подібними профілями, які складаються із верхньої та нижньої панелей зі стільниковим наповнювачем. Стільникова панель володіє обмеженою жорсткістю, через що потрібно виконати низку нероз'ємних з'єднань у стик та внапуск. Відомо [3], що тонкі елементи для конструкції отримують пластичним деформуванням (вальцюванням) матеріалу після його спікання у вакуумі, намагаючись досягти мінімальної поруватості. Як правило, вони мають суттєві залишкові напруження, а їх форма відхиляється від правильної геометричної, що ускладнює підготовку крайок під паяння. Температура під час паяння викликає додаткове деформування елементів, а через нежорсткість не вдається забезпечити стиснення площин пайки, за якого дифузія нікелю та формування адгезійного шару відбуватимуться в оптимальних умовах [4]. Крім того, у промислових вакуумних печах нагрів об'єктів у робочій камері нерівномірний, що необхідно враховувати, призначаючи режими термічної обробки та керуючи нагрівом [11].

Однак інформації про особливості паяння тонких листових заготовок не виявили, незважаючи на те, що проблема з'єднання тонколистових елементів, наприклад, у стільникову систему, є особливо актуальною [4], а її вирішення дасть можливість створити підґрунтя для виготовлення теплозахисних систем аерокосмічних апаратів нового покоління.

Нижче вивчено закономірності зміни властивостей паяних з'єднань тонколистових заготовок зі сплаву Ni–20Cr–6Al–1Ti–1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та встановлено вплив умов формування зони адгезії на механічні властивості конструкції, зокрема міцність шва.

**Матеріали та методика.** Під час паяння використовували такі припої: П1 (0,2% С; 8...10 Cr; 2,5...6,0 Al; 1,4...2,0 Мо; 2...5 Nb; 2...6 W; 2,5...3,0% В, решта – Ni) марки ВПр36; П2 (дрібнодисперсний порошок Ni); П3 (5% W; 1,0...1,5% В, решта – Ni). Паяли у вакуумній печі (10<sup>-3</sup> Па) за ступінчастого підвищення температури з різною витримкою на кожному ступені (рис. 1а).

Для визначення розподілу температур на з'єднувальних заготовках досліджували нагрівання моделі елемента теплозахисної системи у вигляді пластин заданої форми (рис. 1б), встановленої на теплопровідну основу вакуумної печі з розташованими уздовж зовнішньої стінки нагрівальними резистивними елементами. Температурний режим у кожній конкретній точці заготовки визначають граничні умови третього та четвертого роду (променева передача тепла та теплопровідність від основи) [12]. Нагрівали на столі з інструментальної оксидної кераміки типу ЦМ 332 (температурна тривкість 1400°C), забезпечуючи надійне базування зразків та відсутність контакту з вуглецевими підставками, що дало можливість унеможливити розвиток вуглецевої деградації пластин, яка властива цьому матеріалу.

Зону паяння досліджували на сканувальному електронному мікроскопі РЕМ-106-И. Для механічних випробувань паяли внапуск; пластини обирали різної товщини; площа контакту становила не менше 10 mm<sup>2</sup>. Визначали залишкову термічну деформацію паяного виробу  $\epsilon = \frac{h_t - h_0}{l_0}$ , де  $h_0$ ,  $h_t$  – його товщина до та

після паяння;  $l_0$  – початкова довжина паяної конструкції, а також границю міцності  $\sigma_B$  за статичного розтягу зразка.

За технологічно змінні параметри вибрали: максимальну температуру процесу  $T$  (1200...1450°C); час витримки за максимальної температури  $\tau$  (15...90 min); напруження в зоні контакту  $\sigma_k$  (0,1...1 МПа), створювані засобами стискування; товщину  $h$  заготовки (0,1...1,5 mm). Щоб виявити вплив кількості циклів паяння на механічні властивості елементів, шестикратно дублювали нагрів за термічним циклом пайки.

**Результати експериментів та їх обговорення.** Розв'язуючи теплову задачу за відомою методикою [12] для пластин розмірами 25×50 mm, розташованих на столі діаметром 300 mm, за циклу ступінчастого нагрівання до 1370°C (див. рис. 1а, де  $\tau_1 = 30$  min,  $\tau_2 = 15$ ,  $\tau_3 = 30$ ,  $\tau_4 = 15$ ,  $\tau_5 = 110$ ,  $\tau_6 = 17$  min), виявили, що температура  $T_i$  не є однаковою і при  $R \rightarrow 0$  становить  $(0,86...0,88)T_{\max}$ , а при  $R = R_{\max}$  сягає  $(0,95...0,97)T_{\max}$  (рис. 1b). При цьому після введення додаткових баластів-теплопоглиначів масою 0,3...0,5 kg, встановлюваних поряд з паяними елементами, теплові навантаження перерозподіляються і можливе зменшення нерівномірності нагрівання до 20...30°C, тобто  $T=(0,96...0,98)T_{\max}$ . Розташування баластів залежить від положення стику під паяння до нагрівальних ламелей. У зоні розташування баластів деформації стику (як верхньої, так і нижньої панелей) виявилися меншими на 30...40%, ніж у зоні без них. Максимальна деформація становила 1,18 mm/100 mm довжини стику, а відхилення форми елементів не перевищувало 0,6...0,8 mm.

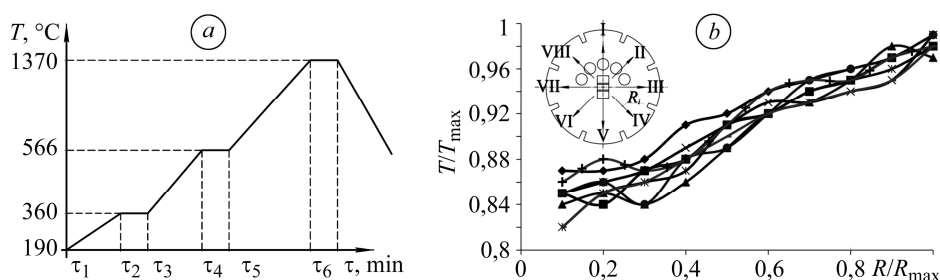


Рис. 1. Температурний цикл нагрівання печі (а) та нерівномірність температур на поверхні макета, виміряна у кількох напрямках (b):  
 ◆ – I; ■ – II; ▲ – III; × – IV; \* – V; ● – VI; + – VII; лінія – VIII.

Fig. 1. The furnace heating temperature cycle (a) and uneven temperatures on the layout surface, measured in several directions (b):  
 ◆ – I; ■ – II; ▲ – III; × – IV; \* – V; ● – VI; + – VII; line – VIII.

Електронно-мікроскопічний аналіз зразків засвідчив, що під час вакуумного паяння заготовок між з'єднуваними поверхнями утворюється адгезійний прошарок, який для припою П2 має чітко виражену порувату структуру (рис. 2b), а для припоїв П1 та П3 – однорідну щільну (рис. 2a). Відсутність пор можна пояснити вмістом бору, який дещо знижує температуру плавлення нікелю, а також вольфраму, що сприяє формуванню армованого прошарку. Спроба ввести карбід вольфраму замість вольфраму згідно з результатами, отриманими раніше [13], бажаного результату не дала: навіть незначний вміст вуглецю в припої або контакт із вуглецевмісними матеріалами призводять до активної вуглецевої ерозії тонких пластин.

Алюміній у припої П1 спричиняє утворення інтерметалідних сполук, що негативно впливає на комплекс фізико-механічних властивостей. Алюмініди нікелю спостерігали біля шовної зони, що обумовлено повільним (3...4 h) охоло-

дженням заготовки разом із вакуумною піччю. Такі інтерметалідні включення провокували появу сітки мікротріщин у пришовній зоні, через що значно знижувався опір руйнуванню з'єднань. Зокрема, під час згину з деформацією у межах 2...3% з'єднання руйнувалося, а у зламі спостерігали шарувату структуру, зумовлену багатостадійним вальцюванням листа та мікротріщинами.

Зменшити кількість інтерметалідів та поліпшити пружно-пластичні властивості вдалося різким охолодженням нагрітого до 1200°C виробу впродовж 15...20 min в інертному середовищі. При цьому відносне видовження зразка товщиною 0,4 mm збільшилося до 8...8,5%.

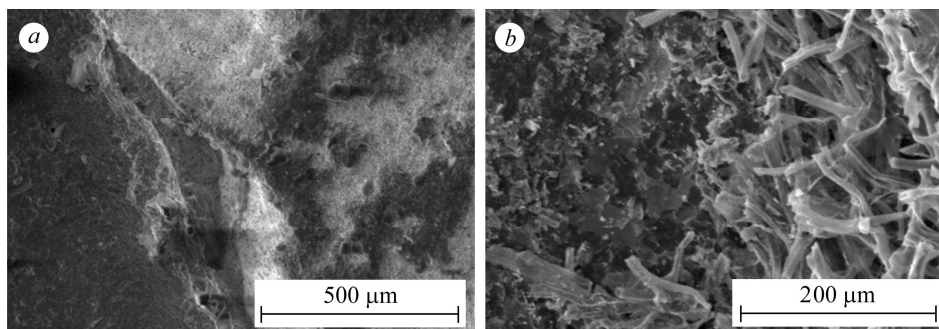


Рис. 2. Порівняння біляшовної зони, утвореної під час використання вольфрамвмісного припою П3 (а) та безвольфрамового П2 (б).

Fig. 2. Comparison of the heat affected zone, formed with the use of tungsten-containing (a) solder (a) and solder without tungsten (b).

Витримка зразків понад 20 min при температурі біля 1375°C призводить до виникнення дефектів, зокрема, до вигорання тонкої пластини (товщиною 0,15 mm), виникнення прогарин діаметром 0,8...1,5 mm, що локалізуються переважно у зоні максимального скупчення структурних дефектів, а також значного жолоблення тонкої пластини у місці її притиснення до іншого елемента. З падінням температури нижче 1275°C практично повністю припиняється дифузія і паяння ускладнюється: частинки припою без розплаву утворюють лише окремі конгломерати нікелю.

Найміцнішим виявилось з'єднання припоєм П3 ( $\sigma_B = 320 \pm 10$  МПа), причому саме руйнування відбулося не по паяній ділянці, а зоною розтікання припою по пластині. Міцність з'єднання припоєм П1 становила  $270 \pm 20$  МПа, а припій П2 забезпечив найменше її значення  $240 \pm 35$  МПа, що можна пояснити поруватістю адгезійного шару.

Розтікання припою по пластині виявилось небезпечним як через незначне зростання маси паяного з'єднання, так і через зміну модуля пружності та пластичності основного матеріалу внаслідок пошкодження матеріалу шляхом виникнення мікротріщин, локалізованих у приповерхневому шарі.

Статистичною обробкою експериментальних даних оцінено вплив температури пайки  $T$  (°C), тривалості витримки  $\tau$  (min), зусилля притиснення  $\sigma_k$  (МПа) і товщини заготовки  $h$  (mm) на границю міцності з'єднань  $\sigma_B$  (МПа) та їх залишкову деформацію  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} \sigma_B = & -5847 + 10,46T + 0,5254\tau - 1390\sigma_k - 2474h - 0,0046T^2 - 0,0427\tau^2 + \\ & + 1,33T\sigma_k + 2,12Th - 372\sigma_k h; \\ \varepsilon = & 0,721 + 10^{-4}(560h + 134\sigma_k - 11,2T - 4,8\tau + 0,004T^2 + 0,00121T\tau - 0,08T\sigma_k - \\ & - 0,36Th + 1,12\tau h). \end{aligned}$$

Встановили, що відчутніше на контрольовані показники впливають температура пайки і тривалість витримки (рис. 3).

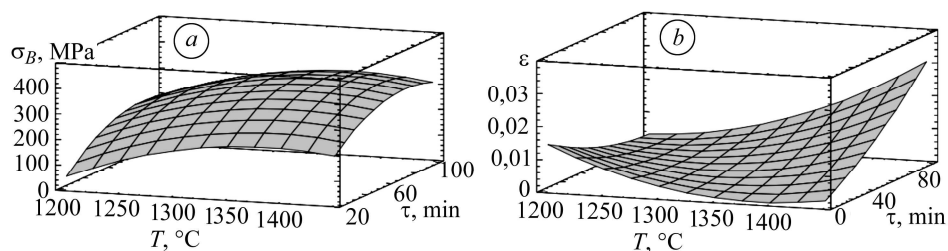


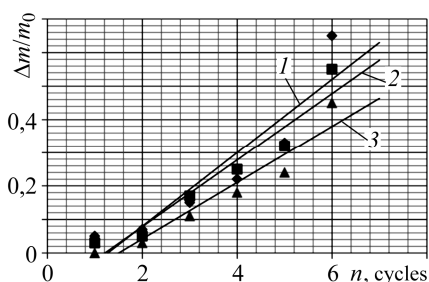
Рис. 3. Залежність границі міцності паяного з'єднання (а) та його залишкової термічної деформації (b) від температури паяння  $T$  та тривалості витримки  $\tau$ .

Fig. 3. Dependence of ultimate strength of soldered joint (a) and its residual thermal deformation (b) on the fusion temperature  $T$  and the duration of exposure  $\tau$ .

Виявили, що вже після трикратного нагрівання тонкі дослідні пластини почали інтенсивно руйнуватися із формуванням торцевих дефектів у вигляді пропалів та свищів, що зумовило втрату маси з'єднань. Залежність відношення втраченої маси  $\Delta m$  до початкової маси шовної ділянки  $m_0$ , визначеної як сума мас припою та частини з'єднаних елементів, що утворюють зону шва, подано на рис. 4. З отриманих результатів можна зробити висновок, що складати конструкції теплозахисних систем бажано, використовуючи мінімальну кількість операцій.

Рис. 4. Відносна втрата маси ( $\Delta m/m_0$ ) тестового зразка залежно від кількості ( $n$ ) термічних циклів паяння і товщини  $h$  заготовок:  
1 –  $h = 0,15$  mm; 2 – 0,25; 3 – 0,40.

Fig. 4. Relative mass loss ( $\Delta m/m_0$ ) of the test specimen vs the number ( $n$ ) of thermal cycles of soldering and thickness  $h$  of the thin sheets: 1 –  $h = 0.15$  mm; 2 – 0.25; 3 – 0.40.



## ВИСНОВКИ

Встановлено закономірності зміни властивостей тонкостінних паяних з'єднань з дисперсійно зміцненого жаротривкого сплаву Ni-20Cr-6Al-1Ti-1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Виявлено, що при 1350°C із витримкою 20 min у вакуумі 10<sup>-3</sup> Pa між тонкими пластинками і припоєм на основі нікелю з додаванням вольфраму і бору за стиснення крайок під контактними напруженнями до 0,1 МПа формується якісне нероз'ємне з'єднання з границею міцності 320 МПа. Доведена можливість виконання паяних з'єднань різновтовщинних заготовок.

**РЕЗЮМЕ.** Исследовано влияние режимов вакуумной пайки тонколистовых заготовок на механические свойства получаемого соединения из сплава Ni-20Cr-6Al-1Ti-1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Виявлено, что при пайке смесью порошков никеля, вольфрама и бора при 1350°C с выдержкой 20 min в вакууме 10<sup>-3</sup> Pa обеспечивается прочность соединения до 320 МПа. Получены уравнения, связывающие предел прочности соединения и температурные деформации тонких пластин с режимами пайки.

**SUMMARY.** The influence of vacuum soldering conditions of thin sheets on the mechanical properties of the resulting compound made of Ni-20Cr-6Al-1Ti-1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is investigated. Under soldering with a powder of nickel, tungsten and boron at a temperature of 1350°C with an exposure of 20 min in vacuum of 10<sup>-3</sup> Pa the compound strength up to 320 МPa is provided.

Equations connecting the ultimate strength of the compound and the value of the temperature deformations of thin plates with soldering conditions are obtained.

1. *Баных О. А., Лякишев Н. П., Поварова К. Б.* Принципы создания новых материалов на основе алюминидов для работы при высоких температурах // Перспективные материалы. – 1995. – № 3. – С. 69–80.
2. *Metallic Thermal Protection System Requirement, Environments and Integrated Concepts / J. T. Dorsey, C. C. Poteet, K. E. Wurster, and R. R. Chen // J. Spacecraft and Rockets.* – 2004. – **41**, № 2. – P. 162–172.
3. *Гусарова И. А., Божко С. А., Богачёва А. Г.* Исследование влияния космического пространства на свойства материалов теплового экрана. Ч. 1 // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – № 14 (168). – С. 58–63.
4. *Special features of diffusion welding of EP975 creep-resisting alloy and VKNA-4U cast single-crystal intermetallic alloy for blisk structures / V. I. Lukin, V. S. Ryl'nikov, A. N. Afanasyev-Khodykin, and O. B. Timofeeva // Welding Int.* – 2014. – **28**, № 7. – P. 562–567.
5. *Plunger frequency of the side couple accelerating structure for the IFUSP microtron / J. Takahashi, M. N. Martins, J. A. de Lima, A. A. Malafrente, L. Portante, M. T. F. da Cruz, and P. R. Pascholati // Particle Accelerator Conf. (Vancouver, Canada, May, 12–16, 1997).* – Vancouver, Canada, 1997. – P. 2998–3000.
6. *Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В.* Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке металлов с разными физико-механическими свойствами // Автомат. сварка. – 2008. – № 8. – С. 5–10.
7. *Кондратьев А. В., Коваленко В. А.* Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харьков, 2011. – Вып. 3 (67). – С. 7–18.
8. *Шевцова Л. И.* Получение композиционных материалов “алюминий–алюминид никеля” SPS-методом // Тр. XIII Всерос. школы-сем. “Новые материалы. Создание, структура, свойства”. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013. – С. 140–143.
9. *Weight optimization of honeycomb structures for space applications / V. Slyvyns'kyu, V. Gajdachuk, A. Gajdachuk, and N. Slyvyns'ka // 56<sup>th</sup> Int. Astronautical Congress (Fukuoka, Japan, October, 17–21, 2005).* – Fukuoka, Japan, 2005. – P. 1–10.
10. *Кляцкин А. С.* Изучение закономерностей формирования структуры высоколегированных никелевых жаропрочных сплавов и разработка на этой основе жаропрочного свариваемого сплава: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: Моск. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 1991. – 16 с.
11. *Pritchard J.* Hot-zone design for vacuum furnaces // Industrial Heating. – 2007. – September. – P. 95–98.
12. *Waitz R., and Wubben P.* Resistance heated furnaces for protective gas and vacuum operation // Heat Proc. – 2011. – **1**. – P. 29–38.
13. *Исследование структуры и свойств наплавленного алюминид никеля Ni<sub>3</sub>Al, легированного нанодисперсными карбидами вольфрама / И. В. Зорин, Ю. Н. Дубцов, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак, А. В. Самотин, Н. В. Алексеев, Ю. В. Цветков // Перспективные материалы.* – 2012. – № 2. – С. 21–27.

Одержано 23.02.2018