

ОТРИМАННЯ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ З НІТИНОЛУ (Огляд)

С.В. Максимова, Б.В. Стефанів

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

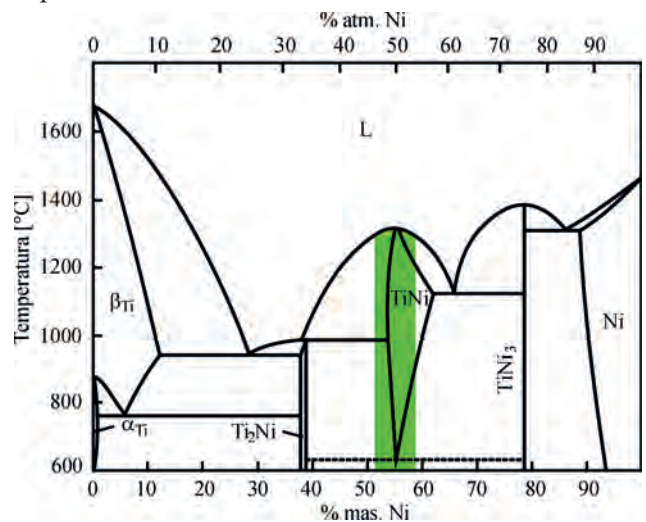
Сплави з ефектом пам'яті форми знаходять широке застосування у різних галузях промисловості, у тому числі в аерокосмічній, медичній, автомобільній та при виготовленні побутової електроніки. Використання цих матеріалів як елементів гібридних конструкцій є перспективним напрямком при створенні виробів з унікальним комплексом властивостей: високими механічними характеристиками, надпружністю, демпфуючою здатністю, підвищеною зносостійкістю та термомеханічною пам'яттю. При отриманні нероз'ємних з'єднань з нітинолу за допомогою зварювання утворюються крихкі фази типу Ti_2Ni , які погіршують якість виробів. В даному огляді розглянуто можливості створення високоміцних нероз'ємних з'єднань нітинолу між собою і з іншими сплавами шляхом паяння. Основною перевагою паяння в порівнянні з іншими методами є те, що основні метали не плавляться і можна уникнути деяких структурних перетворень. При паянні нітинолу в навколишній атмосфері добре себе зарекомендували припої системи $Ag-Cu-Zn-Sn-Ni$ з використанням флюсу $25AgCl-25KF-50LiCl$. Особливо слід зазначити використання срібних припоїв і проміжних прошарків з чистих металів, наприклад, ніобію, який забезпечує міцний металургійний зв'язок з основним металом. При температурі паяння $1180\text{ }^\circ\text{C}$ утворюється сплав на базі квазібінарної евтектичної системи $NiTi-Nb$, який забезпечує надійність паяним елементам при створенні прототипів надпружних стільникових форм з нікеліду титану. Бібліогр. 32, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: нікелід титану (нітинол), сплави з пам'яттю форми (СПФ), припої, паяння, зварювання, змочування, інтерметалідні крихкі сполуки, міцність, структура

Вступ. В даний час значний інтерес представляють сплави зі зворотним мартенситним перетворенням, що характеризуються в різній мірі властивостями пам'яті форми: $Ni-Ti$; $Ni-Ti-Cu$, $Ni-Ti-Pd$, $Ni-Ti-Fe$, $Ni-Ti-Nb$, $Ni-Fe-Ga$, $Ni-Ti-Co$, $Ni-Al$, $Ni-Co$, $Ti-Nb$; $Fe-Ni$; $Cu-Al$, $Cu-Al-Ni$, $Pt-Ti$, $Ag-Cd$, $Au-Cd$ і ін. [1, 2], та мають широке застосування в різних областях техніки. Ці сплави після пластичної деформації відновлюють свою первісну геометричну форму в результаті нагрівання (ефект пам'яті форми) або безпосередньо після зняття навантаження (напружність). Механізмом, що визначає властивості пам'яті форми, є зворотне кристалографічне термодпружне мартенситне перетворення – ефект Курдюмова. Це різновид поліморфного фазового переходу зі зміною кристалічної ґратки, що залежить від температури або рівня навантаження. Мартенситне перетворення супроводжується зміною об'єму, забезпечуючи пам'ять форми [3]. Високотемпературна фаза представляє собою аустеніт, який при прикладенні напруження перетворюється в мартенсит (низькотемпературну фазу). Після зняття напруження мартенсит трансформується в аустеніт і відновлює свою первісну форму. Такі процеси можуть протікати неодноразово при термоцикуванні [4, 5].

Типовим представником матеріалів з пам'яттю форми є нітинол (рис. 1), в якому має місце перехід з кубічної (аустенітної фази B2) в моноклінну фазу (мартенсит B19) при охолодженні або під дією прикладених напружень [6, 7]. Особливо корозійна тривкість нікеліду титану обумовле-

на його здатністю утворювати на поверхні оксид TiO_2 , який слугує захисним бар'єром завдяки явно вираженим гідрофобним властивостям, що запобігає розчиненню нікелю в агресивному середовищі людського організму і забезпечує повну біосумісність на рівні корозійнотривких сталей (316LVM (03X18H14M2)) та сплаву $Ti-6V-4Al$ [8]. Він відноситься до найбільш вивчених матеріалів з пам'яттю форми, застосовується в різних галузях промисловості і є перспективним матеріалом для виготовлення надпружних медичних імплантатів (в біомедицині, завдяки біологічній сумісності та корозійній стійкості в організмі людини), інструментів (рис. 2, а–в), а також в автомобілебудуванні, мікроелектроніці та при виготовленні термомеханічних елементів космічної та авіацій-

Рис. 1. Діаграма стану системи $Ni-Ti$ [7]

Максимова С.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0158-5760>, Стефанів Б.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7159-8762>

© С.В. Максимова, Б.В. Стефанів, 2022

ної техніки (літаків, ракет, космічних конструкцій з покращеними пілотажними характеристиками та зниженим рівнем шуму і вібрацій) (рис. 2, з) [9]. Застосування даного матеріалу при створенні конструкцій з певними експлуатаційними характеристиками потребує дослідження і розвитку різних процесів з'єднання, що має призвести до більш широкого його використання. Наразі процес з'єднання нітинолу в однорідному і різнорідному сполученні вивчений недостатньо.

В даному огляді розглянуто можливості створення нероз'ємних з'єднань з інтерметалідного сплаву – нітинолу з застосуванням різних методів високо-температурного паяння та з використанням проміжних прокладок з чистих металів, які забезпечують контактне плавлення при температурі, що значно нижча за їх автономну температуру плавлення.

Отримання нероз'ємних з'єднань з нітинолу (NiTi). Нітинол – це сплав на основі еквіатомної інтерметалідної сполуки, який містить титан та нікель. Концентрація останнього становить від 48 до 52 ат. %.

Унікальні функціональні властивості нітинолу обумовлені температурою і швидкістю деформування, хімічним складом, параметрами термічної обробки та ін. Навіть незначна зміна концентрації нікелю в межах 2 % (від 50 до 52 ат. %) призводить до зниження температури фазових переходів майже на 27...127 °С, що надає можливість управляти фізико-механічними властивостями в певному температурному інтервалі [4].

Для процесів з'єднання матеріалів широко застосовують різні методи зварювання: дугове, лазерне, променеве, контактне, вибухом, зварювання тертям, дифузійне та ін. [1, 4, 9]. З'єднання сплавів з пам'яттю форми (СПФ) за допомогою зварювання можливе, але має тенденцію до утворення інтерметалідних фаз (Ti_2Ni), які характеризуються значною крихкістю [9, 10]. Окрім того, можливе

погіршення ефекту пам'яті форми, що обумовлено високою температурою, частковим оплавленням основного металу та наявністю литої дендритної структури в зоні шва. Очевидно, що зварювання змінює температуру фазового перетворення, що може зменшити область його застосування. При зварюванні сплавів з пам'яттю форми може знадобитися використання легуючих елементів, які запобігають утворенню інтерметалідних фаз, але на даний час такої інформації дуже мало [5].

Застосування методу ударного конденсаторного зварювання [1] не забезпечило отримання з'єднань з достатньою міцністю. Слід зазначити, що низькі показники міцності спостерігаються у разі відсутності взаємної розчинності різнорідних матеріалів, що зварюються [10]. При застосуванні зварювання плавленням завжди утворюється перехідна лита зона термічного впливу, яка може мати підвищену крихкість порівняно з основним металом. Це суттєво знижує міцність зварних з'єднань, особливо у випадку, коли одним із матеріалів, що з'єднуються, є інтерметалідний сплав, що вже має невисоку пластичність.

Лазерне зварювання, як правило, забезпечує формування вузьких зварних швів, і може бути кращим за дугове завдяки можливості отримання дрібнодисперсної мікроструктури і менших термічних напружень та деформацій, що залишаються після циклу зварювання. Метод лазерного зварювання дозволяє отримати з'єднання нітинолу з титаном з міцністю на розтяг 109 МПа та зі сплавом $Ti-6Al-4V$ з міцністю 28,4 МПа. У зварних з'єднаннях, отриманих електронно-променевим і аргонодуговим зварюванням (TIG), цей показник склав відповідно 70,85 та 108 МПа [10]. Причиною низьких механічних властивостей є утворення крихкої фази в зоні шва Ti_2Ni , в якій зароджуються мікротріщини (рис. 3) [11].

Застосування мідного прошарку під час лазерного зварювання нітинолу з титановим сплавом $Ti-6Al-4V$ призводить до зниження мікротвердості шва, що обумовлено нижчою мікротвердістю багатого титаном інтерметалідної фази Ti_2Cu в

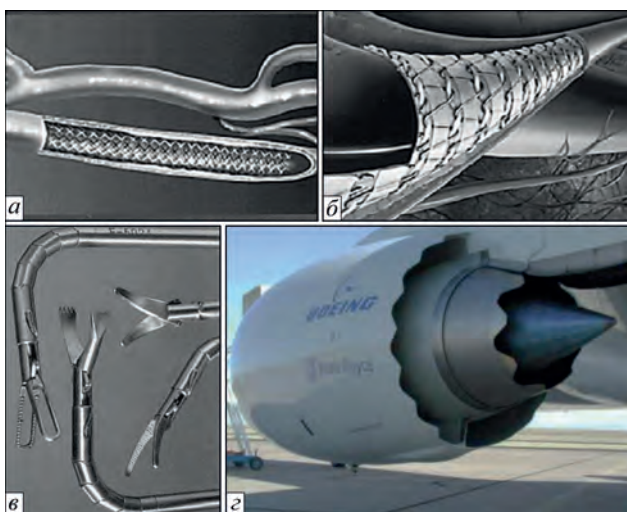


Рис. 2. Медичні стенти (а, б), інструмент (в), зубcate сопло літака (г) [9]

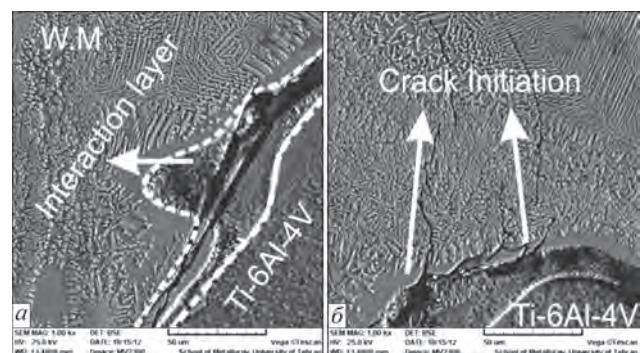


Рис. 3. Реакційний шар біля границі з титановим сплавом $Ti-6Al-4V$ (а) і тріщини (б) при лазерному зварюванні різнорідних матеріалів нітинолу з титановим сплавом [11]

Таблиця 1. Хімічний склад припоїв [12]

Система	Хімічні елементи, мас. %					Інтервал плавлення, °С
	Ag	Cu	Zn	Sn	Ti	
AgCu (евтектика)	71,9	28,1	–	–	–	779
AgCuZnSn I	52	22	18	8	–	590...635
AgCuZnSn II	50...68	10...30	12...20	0...10	–	640...730
AgCuTi I	70,5	26,5	–	–	3	780...805
AgCuTi II ¹	63	35,25	–	–	1,75	780...815
AgCuTi III ²	68,8	26,7	–	–	4,5	830...850
AgTi	96	–	–	–	4	970

¹Cusil ABA; ²Ticusil.

порівнянні з аналогічною характеристикою фази Ti₂Ni. Це дозволяє зменшити кількість крихкої інтерметалідної фази Ti₂Ni, уникнути утворення поперечних тріщин в шві та підвищити міцність з'єднань до 300 МПа [11].

Отримання з'єднань з нітинолу з застосуванням припоїв. Що стосується паяння, існує безліч процесів, зазвичай названих за методами нагрівання: газополуменеве, індукційне, ультразвукове, паяння зануренням та інші.

В процесі паяння основні метали не плавляться, що може сприяти уникненню деяких високо-температурних процесів, які включають високо-температурне окислення, сегрегацію елементів, збільшення розмірів зерен, що може погіршити вихідні властивості основного металу – СПФ. При паянні [10] забезпечуються широкі можливості варіювання фазовим і хімічним складом зони з'єднання. Однак при паянні між основним металом та припоєм відбувається взаємодія і протікають дифузійні процеси. Сплави з пам'яттю форми в цілому і зокрема NiTi досить активні до кисню, вуглецю, азоту і водню, що висуває вимоги до атмосфери паяння. Умови вакуумного паяння можуть бути перспективнішими в порівнянні з іншими методами. Для паяння в вакуумі рекомендують використовувати пластичні припої (табл. 1), які містять активні елементи [12].

В представлених припоях (табл. 1) базою слугує сплав системи Ag–Cu, який легують адгезійно-активним елементом – титаном. В інших дослідженнях повідомлялося про використання Au та сплавів на основі Au [13] або Nb [14] в якості легуючих елементів.

Паяння в вакуумі (розрідження 10⁻³ Па) за допомогою евтектичного Ag–Cu припою (72 мас. % Ag, температура плавлення 779 °С) може дати досить хорошу міцність і пластичність, але вона залежить від довжини напуску [12]. Значне підвищення міцності досягається при збільшенні довжини напуску з 1 до 4 мм. Паяний зразок з величиною напуску в межах 1 і 2 мм виходить з ладу при навантаженні 360 і 600 Н відповідно, тоді як зразок з напуском 4 мм руйнується при 980 Н (близько 820 МПа).

На прикладі отриманої мікроструктури (рис. 4) показано формування типової класичної евтектичної структури паяного шва при застосуванні припоїв системи Ag–Cu, яка утворена двома твердими розчинами: на основі срібла (біла матриця) і на основі міді (темні стрижні).

Міцність на зсув паяного з'єднання перевищує 100 МПа, а розрив відбувається в реакційному шарі, що межує з основним металом і припоєм. Паяний зразок демонструє хорошу пам'ять форми [15].

Реакційний шар на межі розділу між основним металом і металом паяного шва [15] відносять до фази типу XTi₂, де X = Ni + Ag + Cu. Згідно з бінарною діаграмою стану Ni і Cu мають повну взаємну розчинність при температурі паяння, тоді як при низькій температурі (354 °С) спинодальний розпад викликає поділ на фази α1 і α2. Оскільки термодинамічного бар'єру для реакції в спинодальній області немає, розкладання визначається виключно дифузією. В бінарних діаграмах стану металевих систем Ag–Cu і Ag–Ni інтерметаліди не утворюються. Окрім того, спостерігається обмежена розчинність нікелю в сріблі, але з титаном усі елементи (Ag, Cu, Ni) утворюють численні інтерметалідні сполуки (табл. 2). Це може спричинити утворення інтерметалідів на міжфазній границі припій – основний метал [13].

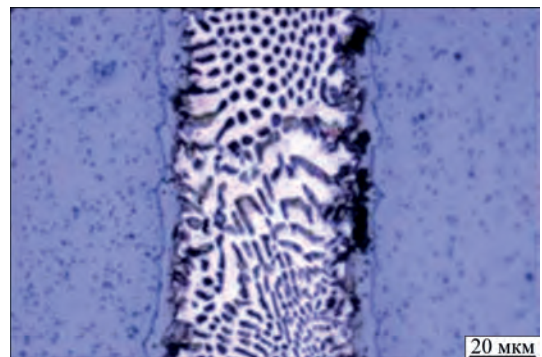


Рис. 4. Мікроструктура паяного з'єднання NiTi/NiTi [15]

Таблиця 2. Інтерметалідні сполуки в системі Ti_xX_y (X = Ag, Cu, Ni) [16]

Елемент	Сполуки					
Ag	AgTi	AgTi ₂				
Cu	Cu ₄ Ti	Cu ₂ Ti	Cu ₃ Ti ₂	Cu ₄ Ti ₃	CuTi	CuTi ₂
Ni	Ni ₃ Ti	NiTi	NiTi ₂			

При застосуванні комерційно доступних припоїв, переважно на основі сплаву системи Ag–Cu [12], особлива увага приділена вивченню процесів паяння нітинолу з застосуванням інфрачервоного, лазерного та мікрохвильового нагріву. При паянні, як і при зварюванні, слід очікувати деякого погіршення вихідних властивостей основного металу за рахунок утворення інтерметалідних фаз. З однієї сторони протікання дифузійних процесів на границі з'єднання сприяє досягненню міцних зв'язків між складовими елементами основного металу і припою з формуванням спільних фаз, а з іншої – також може негативно впливати на міцність з'єднань через їх крихку природу, наприклад, фази XTi_2 (де $X = Cu, Ni, Ag$).

Відомо, що мідь має високу розчинність в нітинолі і до 30 мас. % вмісту нікелю в NiTi може бути заміщено атомами міді і це не знижує ефект пам'яті форми ЕПФ [17]. Тому в якості припоїв застосовували чисту мідь та припої, які леговані міддю (Ti70Cu15Ni15; Cusil: 63 ат. % Ag, 35,25 ат. % Cu і 1,75 ат. % Ti; Ticusil 68,8 Ag, 26,7 ат. % Cu і 4,5 ат. % Ti) [9]. Дослідження мікроструктури показали, що в паяних швах, отриманих з застосуванням фольги з чистої міді, були присутні три мідьвмісні фази; багата міддю фаза, що містить понад 90 ат. % Cu, CuNiTi (Δ) і Ti(Ni,Cu) фази. Повідомляється [9], що присутність фази CuNiTi погіршує ЕПФ сплаву, тоді як присутність Ti(Ni,Cu) не має жодного впливу на ефект пам'яті форми сплаву. Відзначено, що кількість фази CuNiTi зменшується зі збільшенням часу паяння, що позитивно впливає на ефект пам'яті форми паяних з'єднань. В паяних з'єднаннях, що отримані з застосуванням в якості припою сплаву TiCuNi, на міжфазній границі припій – основний метал формується крихкий інтерметалід $Ti_2(Ni,Cu)$, який затрудняє визначення ефекту пам'яті форми. Присутність титану в припої Cusil-AVA сприяє покращанню змочування основного матеріалу, але утворення фази CuNiTi погіршує ефект пам'яті форми отриманого паяного з'єднання. При паянні припоєм Ticusil (з підвищеним вмістом титану) в паяному шві форму-

ється інтерметалідна фаза $TiCu_2$, яка в меншій мірі впливає на ефект пам'яті форми, але разом з тим паяні шви характеризуються значно меншим ефектом пам'яті форми в порівнянні з основним металом (нітинолом) у вихідному стані [9]. Однак паяння залишається найперспективнішим методом з'єднання матеріалів з ефектом пам'яті форми.

Як і під час зварювання, так і при паянні сплавів Ni–Ti може виникнути проблема утворення пасивного оксиду. Уникнути його утворення можна шляхом застосування активних флюсів і низькотемпературних припоїв системи Sn–Ag або Au–Sn (від 200 до 300 °C). У якості альтернативи можна застосовувати перед паянням бар'єрне покриття з нікелю або золота, що може поліпшити якість паяних з'єднань [12].

Висока концентрація титану, який легко утворює стійкі оксидні плівки на поверхні досліджуваного сплаву NiTi в атмосферних умовах, потребує застосування флюсу, ефективними компонентами якого є фториди та сполуки AgCl, LiCl. На підставі отриманих результатів автори [18] вирішили використовувати флюс, що складається з 25AgCl–25KF–50LiCl (мас. %), який покращує змочування срібним припоєм VAg-7 (табл. 3) поверхні NiTi при високотемпературному паянні в повітряній атмосфері.

При отриманні паяних з'єднань автори [18] застосовували «металізацію» нітинолу, яка полягає в нанесенні флюсу і припою (10 мг) на поверхню, нагріву в електропечі до температури 1000 °C і наступному охолодженні. Шлак з поверхні зразків видаляли дротяною щіткою. Після такої підготовки на «металізовані» зразки наносили флюс, встановлювали зразки (30×5×1,2 мм) з величиною напуску 2,5 мм, для фіксації зразків прикладали навантаження 100 г і в такому стані поміщали в електропіч. Температура паяння знаходиться в межах від 700 до 900 °C.

В паяних зразках нітинолу, що отримані з застосуванням припою VAg-7 при температурі 900 °C і A-1 при – 930 °C, на міжфазній границі припій –

Таблиця 3. Припої і температура плавлення [18]

Припій (марка)	Хімічні елементи, мас. %					Солідус (°C)	Ліквідус (°C)
	Ag	Cu	Zn	Sn	Ni		
VAg-7	56,5	20,3	16,3	6,9	–	623	655
A-1	59	23	15	1	2	668	710
A-2	60	30	–	10	–	738	761
A-3	60	28	–	10	2	739	766
A-4	60	30	10	–	–	650	745
A-5	60	28	10	–	2	715	755
A-6	61	24	15	–	–	685	717
A-7	59,5	23,5	15	–	2	688	724
A-8	60,2	23,5	15,3	1	–	655	718

основний метал спостерігається формування реакційного шару (рис. 5, показано стрілкою 1).

Масове співвідношення Ti і Ni (в ат. %) в ньому складає 1:3, тому він ідентифікований як інтерметалід $TiNi_3$. До специфічних особливостей формування паяних з'єднань з нітинолу автори [18] відносять наступне. По-перше, при застосуванні припою ВAg-7 спостерігається значна ліквідація олова, що призводить до збагачення реакційного шару великою кількістю даного елемента (від 25 до 35 мас. %), що значно перевищує його концентрацію в порівнянні з паяними зразками при використанні припою А-1. По-друге, на поверхні розділу реакційний шар – основний метал спостерігаються піки титану та кисню, іншими словами, на даних ділянках присутній оксид титану, що відповідає включенням, які спостерігаються в зоні міжфазної границі (показано стрілкою 2). Застосування припою А-1, що легований оловом до 1 % і нікелем – до 2 % забезпечує максимальну міцність паяним з'єднанням на рівні 300 МПа, в той час як інші припої показали максимальну міцність, яка нижча за 200 МПа [18]. Відмічено, що Sn і Zn знижують температуру плавлення припоїв і покращують змочування основного металу. При введенні Ni в припій спостерігається збільшення кількості розплаву і покращання змочування основного металу при паянні. Тому можна вважати, що внаслідок збільшення кількості рідкого металу відбувається видалення оксиду титану з поверхні розділу і підвищення міцності паяного з'єднання.

Паяння нітинолу з іншими металами. Попереднє вивчення потенціалу використання СПФ в інженерних конструкціях, таких як адаптивне зубчате сопло (АЗС) показує, що поєднання нітинолу зі сплавами на основі титану – це надзвичайно складний процес, який потребує системних досліджень і розробки ефективних методів з'єднання [9]. Переваги вакуумного паяння відомі і полягають в забезпеченні відсутності кисню в атмосфері печі, отриманню чистих якісних бездефектних швів. Однак використання вакуумних печей нецільно для виробництва адаптивного зубчатого сопла, тому необхідно використовувати локальний нагрів. Паяні з'єднання, що отримані в даній ро-

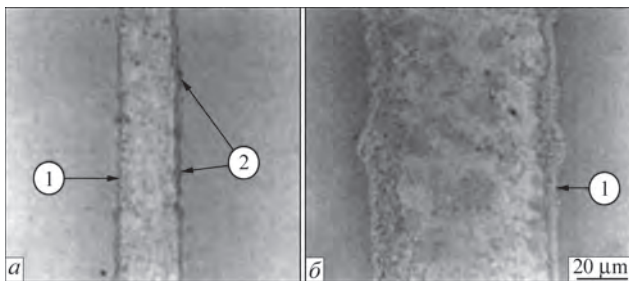


Рис. 5. Мікроструктура паяного з'єднання: а – з присадним металом ВAg-7; б – з присадним металом А-1. Стрілка (1) вказує на інтерметалід $TiNi_3$, стрілка (2) – на оксид титану [18]

боті, не повністю відповідають поставленим вимогам, тому необхідна оптимізація процесу паяння з метою покращення властивостей з'єднання. Показано, що використання проміжних шарів при вакуумному паянні покращує властивості паяних з'єднань. Проте механічні властивості паяних з'єднань значно нижчі, ніж необхідні для адаптивного зубчатого сопла. Подальша оптимізація процесу та дослідження впливу легуючих елементів і систем паяння дозволять удосконалити паяні з'єднання [9]. Помітне поліпшення якості паяних з'єднань досягається при застосуванні припоїв, що містять не більше 25 ат. % нікелю та леговані титаном. З метою вивчення та уточнення ефекту впливу титану в припої необхідно провести подальші дослідження [9].

Приклади отримання паяних з'єднань нітинолу зі сплавом Ti-6Al-4V та корозійностійкою сталлю представлено у роботах [9, 19, 20]. Використання срібного припою ВAg-8 дозволило отримати нероз'ємне з'єднання з максимальною міцністю на зсув, що дорівнює 219 МПа [19]. Досліджено вакуумне паяння нітинолу зі сплавом Ti-6Al-4V з застосуванням припоїв систем Ti-Cu-Ni, Ti-Cu-Ni60 і сплаву Ti-Ni67. Максимальна міцність на зсув паяних з'єднань одержана із застосуванням припою TiCuNi60 і склала близько 30 МПа [9]. Таким чином, від правильного вибору хімічного складу припою значно залежить якість нероз'ємного з'єднання нітинолу з титаном і його сплавами. Слід зазначити, що формування інтерметалідних фаз відбувається незалежно від типу і методу з'єднання.

Дослідження змочування, мікроструктури і міцності паяних різномірних з'єднань нітинолу Ti50Ni50 зі сплавом Ti-15-3 (тип β -Ti сплаву, який легко деформується і містить в мас. %: 3Al, 3Cr, 3Sn, 15V, Ti) при використанні припоїв ВAg-8 (72Ag-28Cu (мас. %) і Ticusil® (68,8Ag-26,7Cu-4,5Ti) (мас. %) показали [21], що змочування евтектичним припоєм 72Ag-28Cu основного металу Ti50Ni50 значно поліпшується при додаванні в сплав 4,5 мас. % Ti. Тільки активний припій Ticusil® легко змочує підкладки обох основних металів при паянні інфрачервоним випромінюванням. Структура паяного з'єднання Ti-15-3/ВAg-8/Ti50Ni50, що отримане при $T = 800$ °C з витримкою 300 с, складається з інтерметалідів Cu_2Ti , які кристалізуються на тлі твердого розчину на основі срібла. А при підвищенні температури паяння до 850 °C ($\tau = 300$ с) формується тільки матриця, що збагачена Ag. Утворення реакційного шару $Cu(Ti,V)$ на контактній межі з титановим сплавом Ti-15-3 і фази $(Cu_xNi_{1-x})_2Ti$ на контактній межі з нітинолом автори пояснюють активним змочуванням обох підкладок і дифузійними процесами

[21]. Найкращі результати міцності паяних з'єднань з використанням припоїв BAg-8 and Ticusil® складають відповідно 197 и 230 МПа. До недоліків даних з'єднань належить утворення тріщин на міжфазній границі припій–реакційний шар Cu(Ti,V) та вздовж центральної зони інтерметалідної сполуки Ti₂Ni.

При паянні різнорідних з'єднань: нітинолу з суперсплавом на основі нікелю марки Hastelloy C-276 (що містить в мас. %: 55 Ni; 14,5...16,5 Cr; 15...17 Mo; 4...7 Fe; 3..4,5 W) теж спостерігається формування фази (Cu, Ni)₂Ti. При паянні нітинолу з аустенітною корозійностійкою сталлю на міжфазній границі припій – основний метал утворюється фаза з високим вмістом Fe і Cr [12]. Оскільки формування реакційного шару є процесом, керованим дифузєю, що обумовлена градієнтом концентрацій, температурою і часом, то дані параметри в сукупності з вибраним припоєм дуже важливі при паянні.

Під час лазерного паяння NiTi з корозійностійкою сталлю із використанням припою AgCuZnSn II, що зазначений в табл. 1, низьке тепловкладення сприяло низьким значенням межі міцності на розрив 190...210 МПа [22]. Міцність була збільшена до 320...360 МПа при використанні більшого тепловкладення. Беручи до уваги, що межа міцності на розтяг основного металу Ni–Ti у вихідному стані перевищувала 1100 МПа, то значна втрата міцності з'єднань викликана процесом паяння. Аналогічні результати були отримані з застосуванням припою AgCuZnSn I (див. табл. 1) [12]. Як стверджують автори, має місце взаємна дифузія хімічних елементів Ag, Cu, Zn і Sn, які дифундують з присадного металу як в основний метал – NiTi, так і в нержавіючу сталь, в той час як Ti і Ni з основного металу – нітинолу, а Fe, Cr і Ni зі сталі дифундують в присадний метал.

При паянні інфрачервоним випромінюванням з'єднань нітинолу з титановим сплавом Ti–6Al–4V, що містить мас. %: 5,76 Al, 4,03 V, 0,28 Fe, 0,06 C, з використанням мідно-срібно-го припою BAg-8 (у вигляді фольги товщиною 50 мкм) спостерігається хороше змочування титанового сплаву Ti–6Al–4V і дещо гірше змочування нітинолу [19]. Згідно зі специфікаціями Американського товариства зварювання припій BAg-8 містить 71...73 % срібла, останнє мідь і характеризується евтектичною структурою ($T_{\text{пл}} = 780$ °C) [23, 24]. Дослідження показали, що після паяння інфрачервоним випромінюванням при температурі, що нижча за 850 °C, в шві формується доевтектична структура на базі двох твердих розчинів: на основі срібла і на основі міді. Срібло не реагує з обома основними металами і не утворює інтерметалідних сполук, але мідь реагує з ти-

таном з утворенням інтерметалідних фаз TiCu₄, Ti₃Cu₄, TiCu і Ti₂Cu на міжфазній границі припій – титановий сплав (Ti–6Al–4V) і фази CuNiTi – на границі припій – нітинол. Титан частково розчиняється в титановому сплаві Ti–6Al–4V, що покращує змочування обох основних металів. При підвищенні температури паяння до 900 °C (протягом більше 60 с) відбувається різка зміна мікроструктури, яка обумовлена утворенням великої кількості фази Ti₂Ni. Середня міцність зразків, що паяні інфрачервоним випромінюванням при температурі 800 °C, становить близько 200 МПа. Хоча наявність інтерметалідної фази CuNiTi сприятливо позначається на змочуванні розплавленим припоєм підкладки основного металу – Ti50Ni50, вона негативно впливає на міцність паяного з'єднання Ti50Ni50/BAg-8/Ti–6Al–4V [19]. Максимальні значення на рівні 343 МПа міцності на зсув отримані при паянні інфрачервоним випромінюванням при температурі 950 °C (витримка 60 с) [24].

Отримання з'єднань з застосуванням проміжних прошарків та без припою. Протягом багатьох років проводяться дослідження в області паяння та зварювання нітинолу і дотепер ці роботи актуальні і потребують розробки доступного недорогого методу з'єднання, який забезпечить формування з'єднань без крихких фаз при створенні конкретних функціональних елементів різних конструкцій.

Вирішити проблему отримання міцних і надійних конструкцій можна шляхом нанесення проміжних підшарів з чистих металів на паяний матеріал. Вибір оптимальних складів проміжних прошарків, які дозволяють уникнути виникнення крихких інтерметалідних фаз між титаном і нітинолом, є важливим завданням сьогодення [10]. Використання відповідного пластичного проміжного шару може бути хорошим вибором для запобігання надмірної дифузії і компенсації теплових деформацій, що обумовлені невідповідністю коефіцієнтів теплового розширення. Проведені дослідженнями визначено, що при контакті ніобію зі звичайним кованим нітинолом при підвищеній температурі протікає взаємна дифузія, що призводить до утворення рідкої фази, яка активно змочує як чистий ніобій, так і NiTi [5, 25–31].

На основі проведених досліджень розроблено новий реактивний процес паяння нікеліду титану шляхом застосування чистого ніобію, який забезпечує міцний металургійний зв'язок між основним металом (квазібінарна евтектика Ni₃₈Ti₃₆Nb₂₄) і відкриває можливості для створення прототипів надпружних комірчаних стільникових форм зі звичайного нікеліду титану. Даний метод дозволяє реалізувати складні просторові фермові конструкції, стільникові панелі і

вбудовані термоактивізовані багатофункціональні структури на базі сплаву Ni–Ti [14].

Псевдопружність сплавів NiTi з пам'яттю форми є унікальною властивістю матеріалу, яка може бути охарактеризована повним відновленням попередньо відбитої форми компонента шляхом зміни умов теплового або механічного навантаження після деформації. На відміну від пружної деформації звичайних матеріалів, таких як сталь, можливості нітинолу в 20 разів вищі за швидкість пружної деформації, що обумовлена підвищеною температурою, або напруженням і сприяє бездифузійному перетворенню кристалічної ґратки аустеніту в мартенсит і навпаки. Такі сплави часто використовують як компоненти імплантів або стентів і тому є надзвичайно високі вимоги до їх надійності та біосумісності з організмом людини [5]. З точки зору отримання з'єднань, вакуумне паяння є особливо прийнятним методом для виготовлення з'єднань з компонентів, які зберігають максимальну псевдопружність. У рамках такого дослідження [5] показано, що процес вакуумного паяння при температурі 1180 °C ($\tau = 6$ хв) з використанням чистого ніобію добре поєднується з термічною обробкою і виконується за один цикл нагріву в печі. В центральній зоні паяного

шва утворюється евтектика NiTiNb, що містить до 23 % ніобію (рис. 6, табл. 4, зона 3).

Склад евтектики корелює з іншими дослідженнями, де визначено, що концентрація ніобію знаходиться в межах 20...26 % [5, 25]. Між основним матеріалом і евтектикою спостерігаються доевтектичні дендрити на основі титану, які містять 7 % ніобію (рис. 4, табл. 4, зона 1), що відповідає розчинності ніобію в NiTi при температурі паяння 1180 °C [5]. Окрім того, було доведено, що доля частки пластичної доевтектичної NiTiNb-фази значно зростала зі збільшенням часу витримки (рис. 7) і паяний шов має набагато більшу ширину (100...150 мкм) в порівнянні з шириною ніобієвої фольги в вихідному стані (50 мкм).

Максимальну міцність (1022 МПа) на розтяг паяного зразка нітинолу було досягнуто при температурі паяння 1180 °C з витримкою 6 хв. Руйнування відбувалося по евтектичній фазі та в зоні доевтектичних дендритів (рис. 7, з, д). Значний інтерес представляє дослідження впливу часу витримки та термічної обробки на структуру NiTi і псевдопружність паяних з'єднань. Автори зазначають, що перспективними в якості припоїв є Nb, NbZr1, Cu та AuCu65, що забезпечують часткову псевдопружну поведінку в паяних з'єднаннях NiTi/NiTi [5].

Дроти з нітинолу (діаметром 300 мкм) можна паяти з застосуванням в якості припою порошоків NiTi та Nb [29], які в певній пропорції змішують з полівініловим спиртом та водою (для отримання суспензії) і наносять на контактні поверхні двох паралельних дротів. За рахунок евтектичної реакції (відповідно до квазібінарної діаграми NiTi–Nb17) між NiTi та Nb при температурі 1170 °C утворюється рідка фаза, яка змочує дроти основного металу, заповнюючи зазор між ними. Перегрів на 10° (до 1180 °C) і витримка на протязі 4 хв сприяють хорошему змочуванню і формуванню щільного паяного шва, що містить евтектичну складову (рис. 8).

Структура шва містить округлі зерна фази, що збагачена Nb (N'), стрижневу (R) і пластинчасту (L) евтектику (рис. 8, б). Окрім того, присутні огранені частинки фази, що збагачені титаном (F). Повідомляється, що евтектика стрижневого типу утворюється, коли об'ємна частка фази

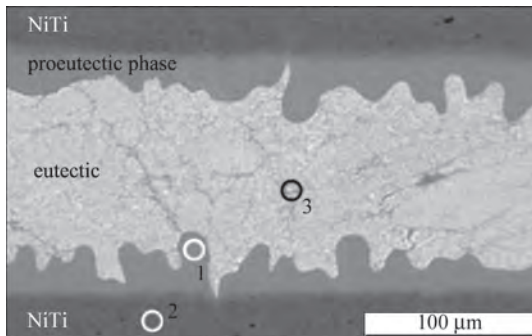


Рис. 6. Структура шва з ділянками, в яких визначали локальний склад елементів в паяному з'єднанні NiTi, що отримано з застосуванням чистого ніобію (50 мкм) в якості припою ($T_p = 1180$ °C, $\tau = 6$ хв [5])

Таблиця 4. Хімічна неоднорідність паяного з'єднання NiTi з чистим ніобієм [5]

Зона дослідження	Елемент (мас. %)		
	Ni	Ti	Nb
1 (доевтектичні дендрити)	45,1	47,9	7
2 (NiTi)	49,5	50,5	–
3 (евтектика)	37,3	39,4	23,3

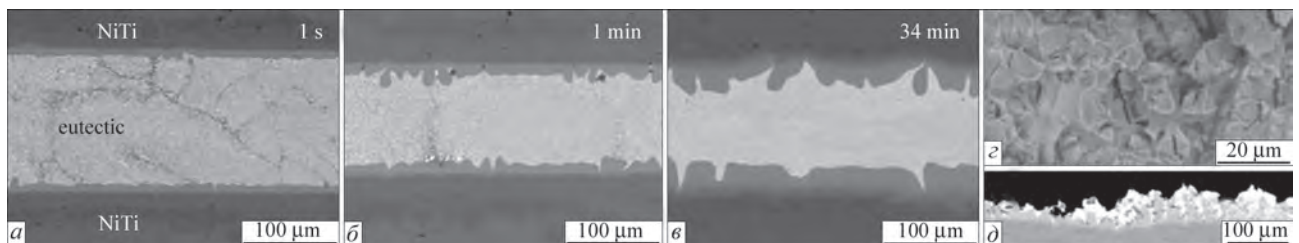


Рис. 7. Мікроструктура паяного з'єднання NiTi, отриманого в умовах вакууму при температурі паяння 1180 °C і різній витримці (а–в) та поверхня руйнування (з) і поперечний переріз зразка в зоні руйнування (д) [5]

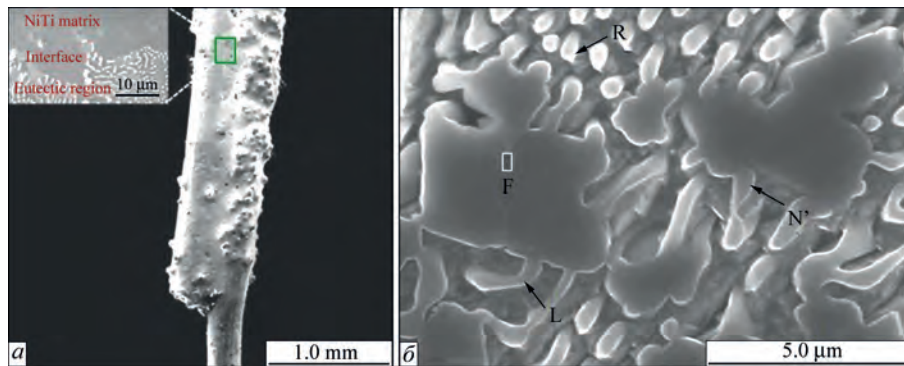


Рис. 8. Мікрофотографії SEM: *a* – з'єднаних паралельних дротів NiTi; *b* – евтектичної області в полірованій паяній області. R і L – евтектична мікроструктура стрижневого та пластинчастого типу відповідно; N' – округлена фаза, багата Nb; F – огранована частинка, багата Ti [29]

Nb в евтектиці NiTi–Nb нижче критичного об'єму (близько 30 %) для евтектики пластинчастого типу [29]. Авторами роботи [29] встановлено, що фазове перетворення B2 в B19' сповільнюється після термічної обробки при 520 °C протягом 30 хв як для дроту NiTi, так і для евтектичної області паяного шва. Це підтверджує, що для фазового перетворення B19' був присутній більший бар'єр трансформації. Перетворення фази R переважно відбувається на межі розділу між NiTi та евтектичною областю (металу паяного шва) під час кристалізації. Окрема фаза на основі Nb значною мірою сприяє формуванню поля пружної деформації. Отже, в цій області індукується висока частка R-фазового перетворення.

Автори роботи [30] закладають металургійну основу для надійного методу з'єднання NiTi сплавів із пам'яттю форми та наделастичних сплавів. Вона заснована на використанні чистого ніобію як депресанту, який викликає контактне плавлення з NiTi при прийнятних температурах. Стикові зразки паяли чистим ніобієм при 1180 °C протягом 6 хв, охолоджували в печі і відпалювали при 350 °C протягом 90 хв перед випробуванням. Руйнування паяних зразків відбувалося при тиску трохи менше 800 МПа, що викликане дією напруження. Крива напруження-деформація для з'єднаних стикових зразків надпружних NiTi пластин (3 мм) показує, що міцність припою становить близько 800 МПа [30]. Даний факт може мати далекосяжні наслідки для використання NiTi в складних аерокосмічних структурах і дозволить розширити використання NiTi з різними матеріалами, включаючи кераміку. Показано, що квазібінарна евтектична природа рівноваги системи NiTi–Nb становить основу надійної техніки паяння при з'єднанні секцій NiTi з застосуванням чистого ніобію.

Сплави на базі системи NiTiNb добре відомі як сплави з широким гістерезисом і з пам'яттю форми, та мають важливе застосування в якості з'єднувальних матеріалів. Ґрунтуючись на існуванні

квазібінарної евтектичної області NiTi–Nb в цій потрібній системі, розроблено новий метод паяння для створення металургійних зв'язків між функціональними ділянками нітинолу [31]. Коли NiTi і чистий Nb контактують при температурі вище 1170 °C, то відбувається спонтанне плавлення, яке призводить до утворення рідкої фази, яка є надзвичайно активною і не тільки змочує поверхні NiTi, але й, очевидно, розчиняє оксидні відкладення, усуваючи потребу у флюсах, забезпечуючи при цьому ефективний капілярний потік у зазори з'єднань. Процес плавлення регулюється дифузією та обмежується коефіцієнтом дифузії Nb в рідкій фазі. Припій в рідкому стані при охолодженні кристалізується з утворенням мікроструктури, що містить переважно впорядкований NiTi і невпорядкований твердий розчин ніобію (ОЦК ґратка). Механічні випробування показали, що паяні з'єднання міцні, пластичні та біосумісні з організмом людини. При належному старінні після паяння функціональні характеристики основного сплаву NiTi можуть бути відновлені. Мікролегування присадного металу ніобію цирконієм або вольфрамом показало великий потенціал для зміцнення паяних швів. Для застосувань, де біосумісність не є проблемою, ніобій можна замінити чистим ванадієм як наповнювачем припою, що володіє достатньою міцністю на розрив і потенційно може перевищувати аналоги з ніобієм [31].

Особливе значення мають різномірні з'єднання, що призначені для медичного використання [32]. Успішне з'єднання різномірних металевих трубок дозволить вибірково використовувати унікальні властивості біосумісних матеріалів, таких як нержавіюча сталь і матеріали з пам'яттю форми (NiTi) для локального забезпечення певних властивостей медичних пристроїв – імплантів. Використання нового процесу – автогенного лазерного паяння, в якому застосовується механізм накопичення тепла з метою отримання з'єднань між різномірними трубчатими зразками (без припою) з нітинолу і нержавіючої сталі (діаметром

1 мм) забезпечує належну міцність, склад і мікроструктуру. Досліджується експериментальним шляхом та чисельним моделюванням вплив параметрів лазера на термічний профіль і механізм з'єднання. Міцність з'єднань, отримана за допомогою цього процесу, досягає 500 МПа [32], що наближається до напружень фазового перетворення основного матеріалу NiTi, а також до міцності на розрив нержавіючої сталі з відпуском. Показано, що цей процес перспективний для застосування, але вимагає проведення додаткових досліджень стосовно конкретних трубчатих деталей.

Висновки

Аналіз літературних джерел свідчить про актуальність і важливість досліджень, що пов'язані з отриманням нероз'ємних з'єднань з нітинолу – перспективного матеріалу з пам'яттю форми, який необхідно з'єднувати при виготовленні конструкцій в різних галузях промисловості, в тому числі, в авіакосмічній, медичній та ін.

Висвітлено особливості різних методів з'єднання даного матеріалу, розкрито температурно-часові параметри процесу високотемпературного паяння інтерметалідного сплаву NiTi між собою та в поєднанні з іншими матеріалами. Показано, що при паянні нітинолу в навколишній атмосфері добре зарекомендували себе припої на базі системи Ag–Cu–Zn–Sn–Ni і флюс AgCl–KF–LiCl, що забезпечило максимальну міцність з'єднань ~ 300 МПа.

При паянні в вакуумі (10^{-3} Па) припоєм системи Ag–Cu міцність знаходиться в межах 360...600 МПа, що обумовлено величиною напуску. Разом з тим слід зазначити, що для покращання змочування основного металу евтектичний припій на основі системи Ag–Cu легують титаном.

При отриманні нероз'ємних різномірних з'єднань нітинолу з титановими сплавами в паяному шві формуються крихіткі фази: Ti_2Ni , $(Cu_xNi_{1-x})_2Ti$, Cu_2Ti , $Cu(Ti,V)$, які сприяють утворенню тріщин на міжфазній границі припій – реакційний шар та вздовж центральної зони інтерметалідної сполуки Ti_2Ni , що погіршує якість з'єднань. Уникнути їх утворення в зоні з'єднання можна шляхом використання припою певного складу, або проміжних прошарків, які при вакуумному паянні покращують властивості паяних з'єднань нітинолу. Особливо слід зазначити, що вакуумне паяння NiTi з використанням чистого ніобію призводить до високої якості та міцності з'єднань (близько 800 МПа). Окрім того, при паянні нітинолу з застосуванням припоїв перспективними є: Nb, NbZr1, Cu та AuCu65, які сприяють забезпеченню часткової псевдопружної поведінки паяного з'єднання NiTi/NiTi.

Разом з тим слід зазначити, що процес отримання нероз'ємних з'єднань шляхом паяння потребує проведення подальших системних досліджень з застосуванням сучасних розрахункових і експериментальних методів, які дозволять зберегти основні властивості сплавів з пам'яттю форми та забезпечать належні експлуатаційні характеристики паяним виробам.

Список літератури/References

1. Патон Б.Е., Калекко Д.М., Шевченко В.П. и др. (2006) Свариваемость сплавов системы Ni–Ti с эффектом памяти формы. *Автоматическая сварка*, **5**, 1–10.
Paton, B.E., Kaleko, D.M., Shevchenko, V.P. et al. (2006) Weldability of shape-memory alloys of Ni–Ti system. *The Paton Welding J.*, **5**, 1–10.
2. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A.R., Gibson, M.A. (2014) A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, **56**, 1078–1113.
3. Красовський В.П. (2009) Дослідження капілярних характеристик та плавка сплаву нікель–титан (NiTiNOL) з ефектом пам'яті форми. *Адгезія розплавів і паяння матеріалів*, **42**, 95–102.
Krasovsky, V.P. (2009) Study of capillary characteristics and melting of nickel-titanium alloy (NiTiNOL) with shape-memory effect. *Adgeziya Rozplaviv i Payanniya Materialiv*, **42**, 95–102 [in Ukrainian].
4. Акимов О.В., Нури С.М. (2015) Сплавы с эффектом памяти формы. История появления и развития, физика процесса их уникальных свойств. *Вісник НТУ «ХПИ»*, **14** (1123) Серія «Нові рішення в сучасних технологіях», сс. 42–49.
Akimov, O.V., Nuri, S.M. (2015) Alloys with shape-memory effect. History of emergence and development, physics of process of their unique properties. *Visnyk NTU KhPI*, **14** (1123), Series: New Solutions in Modern Technologies, 42–49 [in Russian].
5. Tillmann, W., Eilers, A., Henning, T. (2021) Vacuum brazing and heat treatment of NiTi shape memory alloys. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1147:012025. Doi: 10.1088/1757-899X/1147/1/012025
6. Разоренов С.В., Гаркушин Г.В., Канель Г.И. и др. (2011) Поведение никель-титановых сплавов с эффектом памяти формы в условиях ударно-волнового нагружения. *Физика твердого тела*, **53**, **4**, 768–773.
7. Massalski, T.B. (1990) Binary Alloy Phase Diagrams, American Society for metals. (*Ohio: Metals Park: ASM International: CD*).
8. Бледнова Ж.М., Степаненко М.А. (2012) Роль сплавов с эффектом памяти формы в современном машиностроении. Краснодар, РФ.
Blednova, Zh.M., Stepanenko, M.A. (2012) *Role of alloys with shape-memory effect in modern mechanical engineering*. Krasnodar, RF [in Russian].
9. Chau, E.T.F. (2007) *A Comparative study of joining methods for a SMART aerospace application*. Eng. doctorate thesis. Cranfield University, UK.
10. Сенкевич К.С. (2017) Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинола. Обзор. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, **4**, 71–78.
Senkevich, K.S. (2017) Prospects of producing and application of hybrid structures and composites of titanium alloys and nitinol: Review. *Izv. Vuzov. Poroshk. Metallurgiya i Funktsionalnye Pokrytiya*, **4**, 71–78 [in Russian].

11. Zoeram, A.S., Mousavi, A. (2014) Laser welding of Ti–6Al–4V to nitinol. *Mater. Desig.*, 61, 185–190.
12. Akselsen, O.M. (2010) *Joining of shape memory alloys. Shape Memory Alloys*. SINTEF Materials and Chemistry, Ed. by Cismasin, C. InTech, Norway, 183–211.
13. Shiue, R.H., Wu, S.K. (2006) Infrared brazing of Ti50Ni50 shape memory alloy using gold-based braze alloys. *Gold Bull.*, 39, 200–204.
14. Grummon, D.S., Shaw, J.A., Foltz, J. (2006) Fabrication of cellular shape memory alloy materials by reactive eutectic brazing using niobium. *Mater. Sci. Eng.*, A 438-440, 1113–1118.
15. Zhao, X.K., Tang, J.W., Lan, L. et al. (2009) Vacuum brazing of NiTi alloy by AgCu eutectic filler. *Mater. Sci. Technol.*, 25, 1495–1497. <https://doi.org/10.1179/174328409X405625>
16. ASM Handbook: *Alloy Phase Diagrams*, 3, 1992, ASM International, Metals Park, Ohio, USA.
17. Tang, W., Sandstrom, R., Miyazaki, S. (2000) Phase Equilibria in the Pseudobinary Ti_{0.5}Ni_{0.5}-Ti_{0.5}Cu_{0.5} System. *J. of Phase Equilibria, Japan*, 21(3), 227–234.
18. Watanabe, T, Sonobe, H. (1992) Brazing of Ni–Ti Type Shape Memory Alloy. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Japan*, 10, 1, 95–101.
19. Shiue, R.K., Wu, S.-K. (2005) Infrared brazing Ti50Ni50 and Ti–6Al–4V using the BAg-8 Braze alloy. *Mater. Trans.*, 46 (9), 2057–2066.
20. Li, M.G., Sun, D.Q., Qiu, X.M. et al. (2006) Effects of laser brazing parameters on microstructure and properties of TiNi shape memory alloy and stainless steel joint. *Mater. Sci. Eng. A*, 424 (1-2), 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.054>
21. Lin, C., Shiue, R.K., Wu, S.-K., Yang, T.-E. (2019) Infrared Brazed Joints of Ti50Ni50 Shape Memory Alloy and Ti-15-3 Alloy Using Two Ag-Based Fillers. *Materials*, 12, 1603–1614. Doi: 10.3390/ma12101603
22. Qiu, X.M., Li, M.G., Sun, D.Q., Liu, W.H. (2006) Study on brazing of TiNi shape memory alloy with stainless steels. *J. Mater. Proc. Technol.*, 176, 8–12.
23. Humpston, G., Jacobson, D.M. (2004) *Principles of Soldering*. ASM International® Materials Park, Ohio, USA.
24. Shiue, R.K., Wu, S.K., Chen, S.Y. (2003) Infrared brazing of TiAl intermetallic using BAg-8 braze alloy. *Acta Materialia*, 51, 1991–2004.
25. Bewerse, C, Brinson, L.C., Dunand, D.C. (2015) Microstructure and mechanical properties of ascast quasibinary NiTi–Nb eutectic alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 627, 360–368.
26. Piao, M, Miyazaki, S, Otsuka, K., Nishida, N. (1992) Effects of Nb addition on the microstructure of Ti–Ni alloys. *Mater. Trans.*, 33, 337–345.
27. Wang, Y., Cai, X.Q., Yang, Z.W. et al. (2017) Effects of Nb content in Ti–Ni–Nb brazing alloys on the microstructure and mechanical properties of Ti–22Al–25Nb alloy brazed joints. *J. Mater. Sci. Technol.*, 33, 682–689.
28. Liu, S., Han, S., Wang, L. et al. (2019) Effects of Nb on the Microstructure and Compressive Properties of an As-Cast Ni₄₄Ti₄₄Nb₁₂ Eutectic Alloy, *Materials*, 12, 4118.
29. Wang, L., Wang, C., Zhang, L.C. et al. (2016) *Phase transformation and deformation behavior of NiTi–Nb eutectic joined NiTi wires*. Scientific Reports. 6:23905. DOI: 10.1038/srep23905
30. Grummon, D.S., Low, K.-B. Foltz, J., Shaw, J. (2007) New Method for Brazing Nitinol Based on the Quasibinary TiNi–Nb System. In: *Proc. of 48th Conf. on AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials (Honolulu, Hawaii, 23–26 April 2007)*.
31. Low, K.B. (2009) *Reactive eutectic brazing of nitinol*. Ph.D. Thesis, Michigan State University, USA.
32. Satoh, G., Brandal, G., Naveed, S., Yao, Y.L. (2017) Laser Autogenous Brazing of Biocompatible, Dissimilar Metals in Tubular Geometries *J. Manuf. Sci. Eng.*, 139 (4), 041016, 1–16.

PRODUCING NITINOL BRAZED JOINTS (Review)

S.V. Maksymova, B.V. Stefaniv

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Shape-memory alloys are becoming ever wider applied in different industries, in particular in aerospace, medical, automotive sectors and in consumer electronics manufacturing. Application of these materials as hybrid structure elements is a promising direction when creating products with a unique set of properties: high mechanical values, superplasticity, damping ability, higher wear resistance and thermomechanical memory. Production of nitinol permanent joints by welding leads to formation brittle phases of Ti₂Ni type, which degrade the product quality. This review discusses the possibility of producing high-strength permanent joints of nitinol with nitinol and with other alloys by brazing. The main advantage, compared to other methods, is the fact that base metals do not melt, and some structural transformations can be avoided. At nitinol brazing in ambient air, brazing filler metals of Ag–Cu–Zn–Sn–Ni system haven proven themselves well, using 25AgCl–25KF–50LiCl flux. We should specially mention application of silver brazing filler metals and interlayers from pure metals, for instance, niobium, providing a strong metallurgical bond with the base metal. At brazing temperature of 1180 °C an alloy based on quasibinary NiTi–Nb eutectic system is formed, ensuring the reliability of brazed elements when creating prototypes of superplastic honeycomb shapes from titanium nickelide. 32 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: titanium nickelide (nitinol), shape memory alloys (SMA), brazing filler metals, brazing, welding, wetting, intermetallic brittle compounds, strength, structure

Надійшла до редакції 27.10.2022



1 жовтня 1960 р. з конвеєра заводу «Комунар» в Запоріжжі зійшли перші українські мікролітражні автомобілі моделі ЗАЗ-965 «Запорожець». До кінця року було випущено близько 1,5 тис. «Запорожців». Цей автомобіль швидко став популярним, тому що порівняно мало коштував та був економічним. Експлуатаційна витрата пального становила 7,3 л на 100 км. Повноцінна 4-місна машина була компактною та маневреною: довжина її становила 3,33 м, а радіус повороту за колією зовнішнього колеса – 5 м. Незалежна підвіска всіх коліс, рівне, без тунелю для «кардана», дно, 20-сантиметровий кліренс під задньою віссю забезпечували непогану прохідність.