

РОЗРОБКА ПРИПОЮ, ТЕХНОЛОГІЇ ПАЯННЯ ТА ВИПРАВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ ВІДЛИВОК ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ СУДНОВИХ ГАЗОВИХ ТУРБІН

В.В. Квасницький¹, М.В. Матвієнко², Г.П. Мяльниця³, Ю.Г. Квасницька⁴, Є.А. Бутурля⁵

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 73000, м. Херсон, вул. Ушакова, 44

³ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект». 54000, м. Миколаїв, Богоявленський просп. 42А

⁴Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України. 03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34

⁵Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 54000, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9

Метою роботи було розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ, що використовуються при виробництві суднових газових турбін нового покоління. Обов'язковою умовою було забезпечення високотемпературної міцності спаяних з'єднань не нижче за 80 % від міцності основного металу. При розробці припою використана двоступенна методика, де на першому (розрахунковому) етапі визначено необхідні концентрації легуючих елементів в основі припою, невідповідність параметрів будови γ - і γ' -фаз, критичні температури, кількість електронних вакансій, фізико-механічні властивості сплавів. На другому (експериментальному) етапі визначено раціональний вміст кількості елементів депресантів. В якості депресанту обрано бор. Встановлено, що при використанні припою, що містить 1,0...1,2 мас. % бору, структурна будова основного металу і шва є ідентичними. Після паяння і термічної обробки боридних евтектик у спаяних з'єднаннях не виявлено. Встановлено, що в визначених межах бор не зменшує стійкість спаяних з'єднань до високотемпературної сольової корозії. Досліджено поверхневі властивості припою і його взаємодію зі сплавами СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. Розроблений припій SBM-4 показав високі технологічні властивості й дозволяє підвищити температуру робочого газу у газових турбінах. Розроблена технологія паяння сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ забезпечила межу міцності σ_b на рівні основного металу. Довготривала міцність спаяних з'єднань при температурі 900 °С дорівнювала 314...321 МПа на базі 100 год, що становить 0,89...0,91 довготривалої міцності полікристалічних сплавів. Розроблено технологію виправлення дефектів лопаток припоєм SBM-4. Бібліогр. 12, рис. 4.

Ключові слова: припій, жароміцні нікелеві сплави, технологія паяння, виправлення дефектів лиття, елементи депресанти, бор, газові турбіни, лопатка

Суднові та авіаційні газові турбіни працюють на різному паливі, тому хімічний склад жароміцних сплавів для суднових і авіаційних газових турбін (ГТ) відрізняються, а робочі температури авіаційних турбін досягають 1220 °С [1]. Загальносвітові тенденції розвитку машинобудування свідчать про поширення застосування зварювання та споріднених процесів для виготовлення конструкцій різноманітного призначення [2]. Основним способом з'єднання жароміцних нікелевих сплавів є паяння [3]. Зварювання плавленням робочих лопаток ГТ не дає позитивних результатів через утворення гарячих тріщин як при зварюванні, так і при термічній обробці, призводить до знеміцнення та руйнування спрямованозакристалізованої і монокристалічної структур [4].

Лопатки суднових ГТ виготовляють методом точного лиття у вакуумі кожен окремо. Це дозволяє за наявності поверхневих дефектів їх виправити паянням. За допомогою паяння закрива-

ють також знакові отвори охолоджуваних лопаток для закріплення внутрішніх стрижнів. Враховуючи те, що сутність паяння полягає в зменшенні температури плавлення припою шляхом використання депресантів, важливою проблемою паяння є підвищення рівня міцності спаяних з'єднань до рівня, близького до міцності основного металу. Необхідно також забезпечити стійкість спаяних з'єднань проти високотемпературної сольової корозії (ВСК) в умовах роботи морських газових турбін. Найбільш теплонавантаженими в ГТ є соплові і робочі лопатки. Враховуючи складні умови роботи суднових ГТ, спроектовані турбіни нового покоління, розроблені нові жароміцні нікелеві сплави (ЖНС) СМ93-ВІ і СМ96-ВІ [5], які дозволяють підняти робочу температуру газу на 40...60 °С. Для паяння нових ЖНС необхідне створення нових припоїв з більш високими температурами плавлення та паяння, що забезпечують формування з'єднань з підвищеними жаростійкі-

Квасницький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7756-5179>, Матвієнко М.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1020-0415>,

Мяльниця Г.П., – <https://orcid.org/0000-0003-2144-4519>, Квасницька Ю.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>,

Бутурля Є.А., – <https://orcid.org/0000-0003-2604-5664>

© В.В. Квасницький, М.В. Матвієнко, Г.П. Мяльниця, Ю.Г. Квасницька, Є.А. Бутурля, 2021

стю та довготривалою міцністю. Розв'язання цих задач є вельми актуальним для розвитку суднового газотурбобудування. Актуальність розробок суттєво зростає при паянні матеріалів нового покоління, що забезпечують вищі робочі температури та ресурс, зокрема, сплавів CM93-BI і CM96-BI для суднових ГТ.

Аналіз наукових публікацій щодо припоїв та технологій паяння ЖНС свідчить, що практично всі вони присвячені розробці припоїв для ЖНС авіаційних турбін, наприклад, ЖС32 [4], ЖС36 [6, 7], ЖС6У [8]. В роботі [8] використовували припій ВПр36, а для зменшення температури паяння додавали припій НС12 на основі системи Ni-12Si.

Для паяння перелічених сплавів застосовували різні припої, наприклад, ВПр24, ВПр27, ВПр36, ВПр37, ВПр44 (Росія) [9], ВН-2, ВН-3 (КНР) [10]. Припої ВПр36, ВПр37, ВПр44 рекомендовані документом ПО 13-2011 ВІАМ для застосування в дослідному виробництві авіаційної промисловості з метою паяння жароміцних сплавів, зокрема, і на основі інтерметаліду Ni_3Al .

В роботі [9] для паяння сплаву ВКНА-4У на основі Ni_3Al зі сплавом ЕП975 використовували складнолеговані припої ВПр24, ВПр27, ВПр47, ВПр48, ВПр36 для з'єднання диска з лопатками. Наведені в роботі результати свідчать, що всі припої окрім припою ВПр36 утворювали евтектичні прошарки, які суттєво зменшують міцність спаяних з'єднань.

В роботі [10] для паяння сплаву ІС10 при температурі 1250...1270 °С використовували припій з бором в якості депресанта. В роботах [4, 9] для паяння сплавів ЖС36 і ЖС32 досліджено припої ВПр37 та ВПр44 з температурою паяння вище 1260 °С, які є неприйнятними для сплавів CM93-BI та CM96-BI.

Останнім часом в роботі [11] розроблено припої, в яких в якості депресанту використовують Zr. За результатами паяння обрано два припої з концентраціями 1,0...2,0 мас. % Zr системи Ni-Cr-Ti-Nb-Al-(Me)-Zr для паяння інтерметалідних сплавів при температурі близько 1250 °С. Розробляються також припої з використанням паладію, які поки що знаходяться на стадії вивчення. В розглянутих роботах методика розробки припоїв не відображена. Аналіз літератури також показав, що публікацій щодо розробки припоїв для суднових газових турбін не виявлено.

Метою проекту є розробка припою та технології паяння жароміцних нікелевих сплавів CM93-BI і CM96-BI для виготовлення суднових ГТ нового покоління з високотемпературною міцністю спаяних з'єднань не нижче за 80 % від основного металу. Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- запропонувати методику розробки припою з використанням комп'ютерних програм, що визначають розподіл легуючих елементів по фазах, стабільність структури та зміцнення ЖНС;

- обрати раціональне легування основи припою і ефективні депресанти;

- визначити температуру паяння та інші важливі характеристики припою;

- дослідити поверхневі властивості припою та його взаємодію зі сплавами CM93-BI і CM96-BI;

- визначити структуру, хімічний склад і властивості спаяних з'єднань;

- розробити технологію паяння сплавів CM93-BI і CM96-BI та виправлення поверхневих дефектів відливки з ЖНС.

Для визначення складу припою запропоновано використовувати методику, що складається з двох етапів [12]. На першому етапі визначають хімічний склад основи припою з урахуванням особливостей умов роботи лопаток суднових ГТ і досягнень металознавства ЖНС. На цьому етапі використовують комп'ютерні програми, які є в розробників та виробників ЖНС. До складу основи припою запропоновано додатково вводити хімічні елементи, які є більш ефективними щодо її зміцнення.

В подальшому шляхом розрахунків із застосуванням комп'ютерних програм визначалися раціональні межі вмісту легуючих елементів в основі припою з урахуванням їх взаємного впливу на кількість та будову фаз, що зміцнюють, розподіл елементів по фазах, невідповідність параметрів кристалічної будови γ - та γ' -фаз, кількість електронних вакансій, критичні температури, фізико-механічні властивості сплавів. Одним з головних критеріїв вибору раціональних меж легування є мінімізація схильності сплавів до утворення крихких топологічно щільноупакованих (ТЩУ) фаз.

За основу припою обрано сплав CM93-BI, який легований Re у кількості 2,4...2,8 мас. % та Ta – 3,3...3,6 мас. %, оскільки відомо, що реній ефективно зміцнює ЖНС, а тантал підвищує термічну стабільність γ' -фази.

За результатами розрахунків встановлено надлишкове легування сплавів елементами, що збільшують схильність до утворення ТЩУ фаз, зокрема, Cr, Mo, W, Re. Оскільки найбільшу кількість електронних вакансій має саме W, то в основі припою його вміст зменшений до 2,0...3,0 мас. %. З метою підвищення стійкості сплаву до високотемпературної корозії концентрація Cr була збільшена до 14,5 мас. %. У сплав введено до 6,2 мас. % Ti для зменшення температур ліквідуса і солідуса та утворення зміцнюючої γ' -фази. Інші елементи мають близькі до вихідного сплаву CM93-BI концентрації. Середній вміст елементів основи припою складає (мас. %): 13,0 Cr; 7,0 Co; 4,0 Al; 4,5 Ta;

3,75 Re; 2,5 W; 1,5 Mo; 5,45 Ti; 0,25 Hf; 0,575 Zr; 0,4 Nb; 0,07 C; Ni – решта.

В якості депресанта безальтернативно обрано бор. Визначити кількість бору можна лише експериментально, виплавляючи сплави з різною концентрацією бору. Перший припій виплавили з концентрацією бору 0,75 мас. %, але він погано розтікався навіть при температурі 1230 °C.

Для зменшення кількості експериментальних плавок виплавили сплав з п'яти елементів, який позначили 4Д з хімічним складом 14 Cr; 9,5 Co; 2,5 Al; 2,4 В, решта – нікель. Сплав 4Д додавали до першої плавки припою SBM-4 в кількості 10, 20, 30 %, що дозволило поступово змінювати концентрацію бору. При введенні 10...30 % сплаву 4Д концентрація бору збільшується від 0,915 до 1,245 %.

Також використовувався метод планування експерименту для зменшення кількості експериментальних досліджень та побудову регресійної моделі. Коефіцієнти моделі перевіряли через критерій Стюдента (t -критерій), необхідний для визначення значимості коефіцієнтів рівняння регресії. Для цього була висунута гіпотеза, що параметр або статистична характеристика коефіцієнту рівняння незначно відрізняються від нуля. Разом з цим була висунута альтернативна гіпотеза, що параметр або статистична характеристика значно відрізняються від нуля. Якщо основна гіпотеза невірна, то за істину приймається альтернативна.

Адекватність математичної моделі була перевірена через F -тест, або за критерієм Фішера. Згідно критерія Фішера була висунута нуль-гіпотеза, виконання якої визначає, що розрахункове математичне очікування дорівнює відомому (експериментальному) очікуванню. Для розрахунку F -критерія використовують дисперсії відтворюваності та адекватності.

За результатами досліджень концентрацію бору в припої SBM-4 прийняли рівною 1,0...1,2 мас. %. За середніми значеннями концентрації бору та вмісту легуючих елементів основи припою виплавлений припій SBM-4 для промислового використання. Вміст хімічних елементів в припої SBM-4 складає, мас. %: 12,5...14,5 Cr; 6,5...7,5 Co; 3,0...5,0 Al; 3,0...6,0 Ta; 3,0...4,5 Re; 2,0...3,0 W; 1,0...2,0 Mo; 4,7...6,2 Ti; 0,2...0,3 Hf; 0,45...0,7 Zr; 0,3...0,5 Nb; 1,0...1,2 В; 0,04...0,10 C; Ni – решта.

При використанні припою, що містить 1,0...1,2 мас. % бору, структурна будова основного металу і шва є ідентичними. За результатами експериментальних досліджень взаємодії припою з основним металом встановлено, що при температурі паяння 1210...1235 °C припій володіє заданими технологічними властивостями.

Після паяння та термічної обробки боридних евтектик у з'єднаннях не виявлено.

Легування Та дозволяє підвищити стійкість сплавів до окиснення та високотемпературної корозії. При дослідженні жаровини було виявлено, що в ній поряд із захисними оксидами NiO, CoO і Cr_2O_3 присутній також оксид Ta_2O_5 , який не взаємодіє з сульфатом натрію та утворює щільну захисну плівку, яка зменшує швидкість високотемпературної корозії.

Відомо, що сплави CM93-BI та CM96-BI мають високу стійкість проти ВСК, тому було важливо визначити вплив бору в припої SBM-4 на стійкість проти неї. Для цього були виплавлені сплави CM93-BI та CM96-BI з концентраціями бору 1,0, 1,2, 1,5, 2,0 та 2,5 мас. %. Випробування проводили при температурі 900 °C протягом 20 год в розплаві солей 25 % NaCl + 75 % Na_2SO_4 . Установлено, що при концентрації бору 1,2 % стійкість сплавів проти ВСК не зменшилась. Після виплавлення припою SBM-4 виготовлені циліндричні зразки та проведені дослідження щодо їх стійкості проти ВСК.

Дослідження структури та хімічного складу спаяних з'єднань проводили на зразках, які паяли в одній садці зі зразками для механічних випробувань або на зразках після механічних випробувань. Для проведення механічних випробувань зразки паяли при температурі 1210...1215 °C з витримкою до 15 хв. та наступним охолодженням до 1070 °C і витримкою 60 хв.

Сплави CM93-BI та CM96-BI застосовують для виготовлення лопаток з полікристалічною та спрямованою структурами. Оскільки виготовлення декількох зразків зі спрямованою структурою вимагає спеціальної підготовки, то в роботі використовували полікристалічні зразки. Межа міцності $\sigma_{\text{в}}$ спаяних з'єднань знаходилась на рівні основного металу. Довготривала міцність для з'єднань полікристалічних сплавів CM93-BI і CM96-BI складає 0,91 і 0,89 відповідно.

Дефекти лопаток можуть виявлятися на різних етапах їх виготовлення та експлуатації. Найбільш передбачуваними є дефекти відливок лопаток. Незважаючи на постійне удосконалення вогнетривких сумішей для виготовлення керамічних ливарних форм, стрижнів, тиглів, фільтрів та технології лиття, вихід придатних лопаток не досягає 100 %.

Більша частина дефектів лиття носять поверхневий характер. Найчастіше зустрічаються дефекти у вигляді шлакових включень, «корольків» та інших забруднень з розміром до 3,0 мм, значно менше несучільностей, недоливів і тріщин. Технологічними інструкціями (ТІ) НПКГ «Зоря»-«Машпроект» всі дефекти поділяються на такі, для яких виправлення не допускаються і поверхневі дефекти виправлення яких проводиться залежно від зони розміщення на лопатці, розмірів дефектів

та відстані між ними. На лопатках виділені зони та критерії, за якими дозволяється виправлення дефектів. Наприклад, на входних і вихідних крайках лопаток виправлення дефектів не допускається. Не виправляються поверхні силових бортів лопаток, радіуси переходів пера лопатки в хвостовик тощо. Інші дефекти обмежуються по глибині, кількості, розміру, категорії конструкцій. По мірі розвитку паяння в технологічні документи вносяться доповнення (2019 р.) і узгоджують нові інструкції.

Залежно від розміру дефекту його виправлення проводиться без наповнювача або з наповнювачем. Малі дефекти (визначається згідно ТІ) виправляються припоєм SBM-4 без наповнювача, дефекти типу раковин розробляються як показано на рис. 1 для лопаток з полікристалічною структурою зі сплаву CM93-BI.

Виправлення дефектів лиття починається з їх виявлення після очищення і слюсарної обробки (дефектація). Перед виправленням дефектів лопатки повинні пройти весь ступінчастий цикл термічної обробки, включаючи гомогенізацію при температурі 1180 °С відповідно до Технологічного процесу. Розміри дефектів, що підлягають виправленню після розробки повинні відповідати вимогам нормативних документів. Місця, що підлягають виправленню, повинні розроблюватися до повного видалення дефекту під кутом $90^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$ відповідно до рис. 1. Поверхня лопатки навколо дефекту повинна бути очищена від оксидів на відстані не менше за 5 мм.

На рис. 2 показано ескіз робочої неохолоджуваної лопатки з монокристалічною структурою зі сплаву CM96-BI та зони розміщення дефектів,

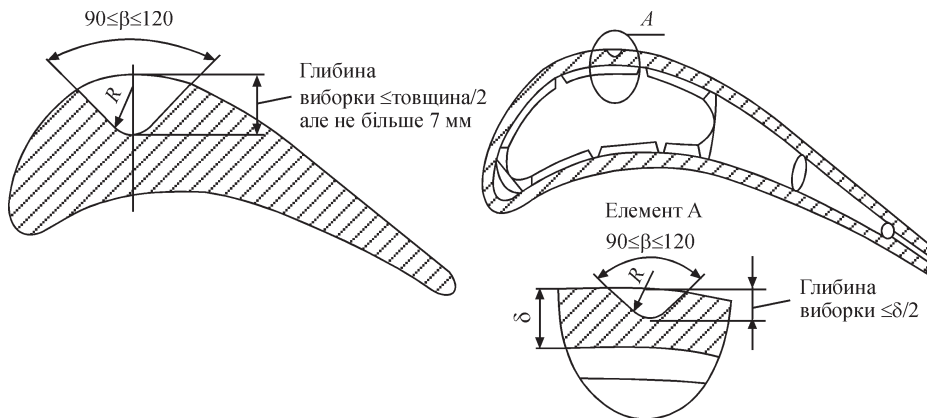


Рис. 1. Розробка поверхневого дефекту типу раковини лопатки з полікристалічною структурою зі сплаву CM93-BI

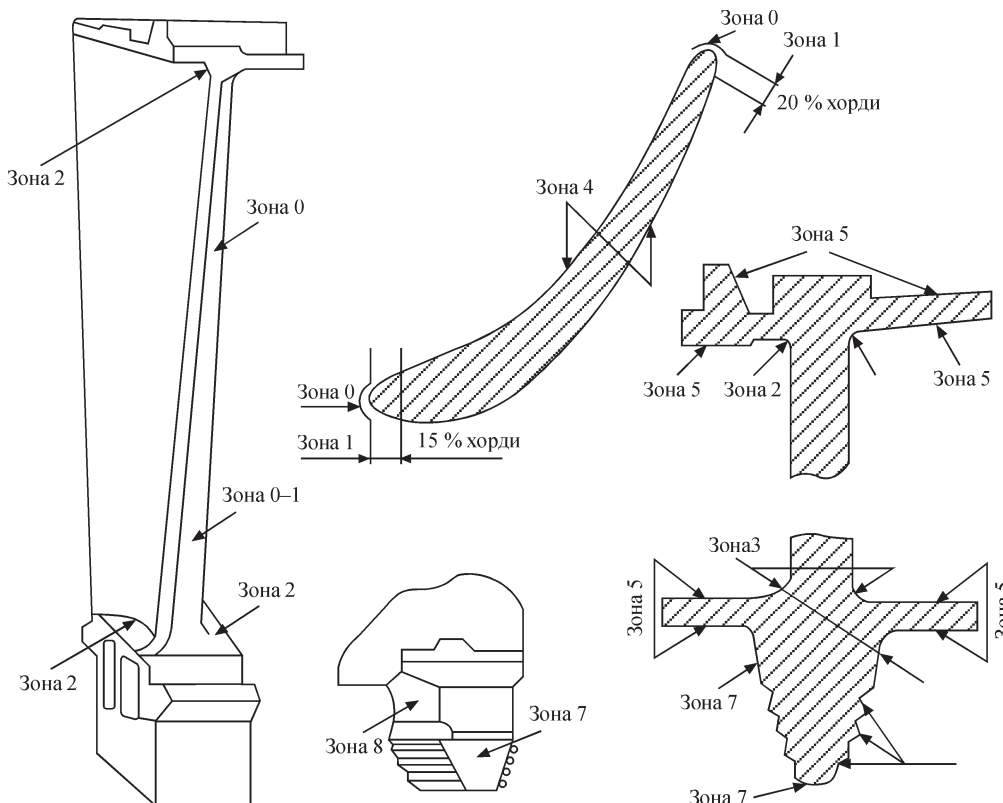


Рис. 2. Схема робочої неохолоджуваної лопатки з монокристалічною структурою зі сплаву CM96-BI

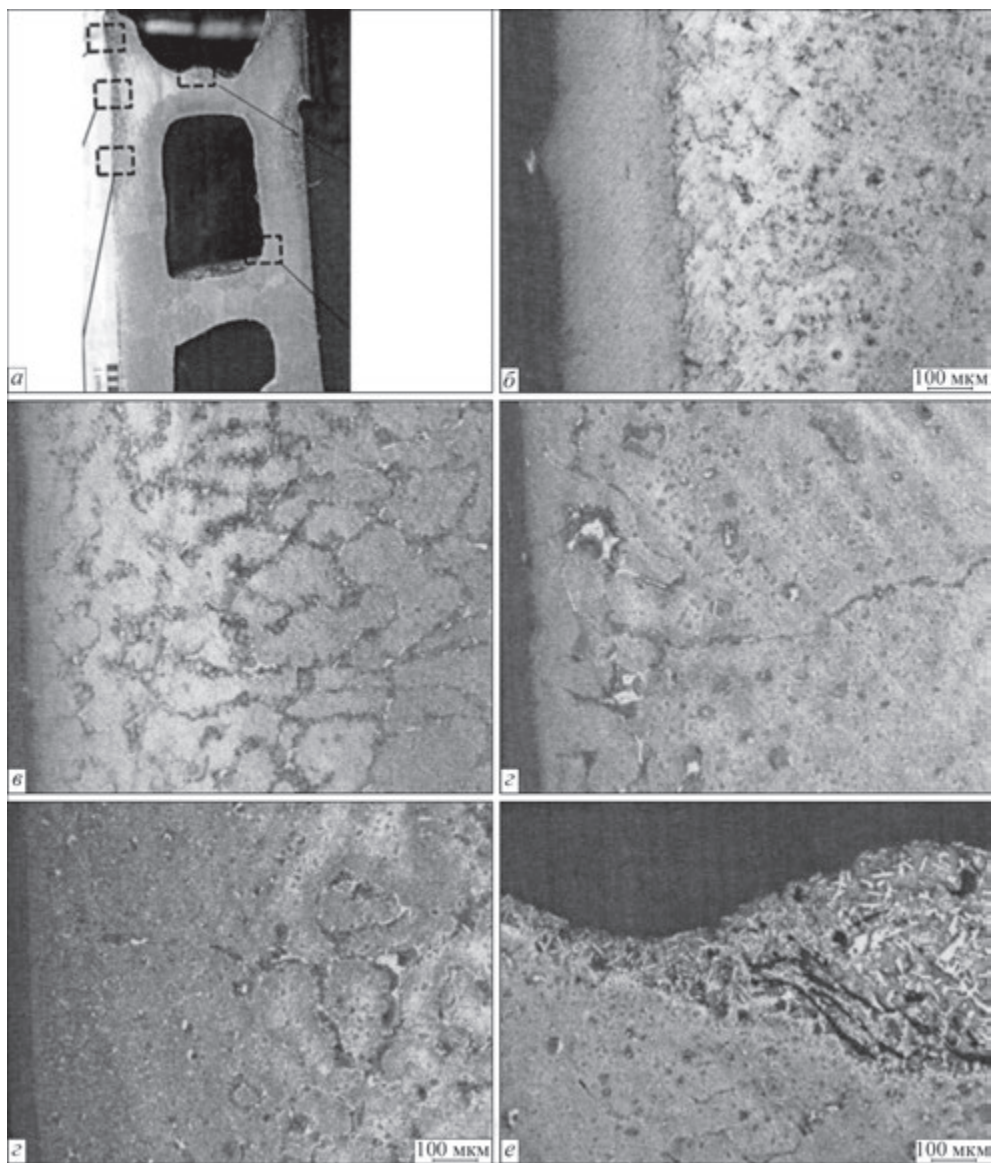


Рис. 3. Макрошліф лопатки (а), мікроструктура з виправленими поверхневими дефектами (б, в, г), основного металу (д) та запаяного знакового отвору (е)

в яких інструкціями підприємств регламентуються розміри припустимих до виправлення дефектів робочих лопаток ГТ. Розміщення і розміри дефектів, які є допустимими для виправлення на робочих лопатках регламентуються інструкціями підприємств.

На рис. 3 показано макрошліф лопатки зі сплаву СМ93-ВІ та мікроструктуру металу з виправленими поверхневими дефектами та запаяним знаковим отвором. Макрошліф в зоні виправлення поверхневого дефекту на «кориті» лопатки з нанесеним захисним покриттям показано на рис. 4.

Перед нанесенням порошку для виправлення поверхню дефекту необхідно знежирити спиртом або протерти бязевою тканиною, змоченою ацетоном.

В якості наповнювача використовується порошок сплаву СМ88У-ВІ, який випускається централізовано «Укрспецсталлю» або високотемператур-

ний припій SBM-3, розроблений в НУК і НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Наповнювач та припій SBM-4 являють собою суміш у співвідношенні 1:1. Порошкова суміш закріплюється на поверхні лопатки 5%-м розчином смоли БМК-5 в ацетоні. Кількість композиційного порошку повинна бути більшою ніж об'єм розробленого дефекту на 40...50 %. Виправлення дефектів проводиться за тими самими параметрами режимів, що і паяння.

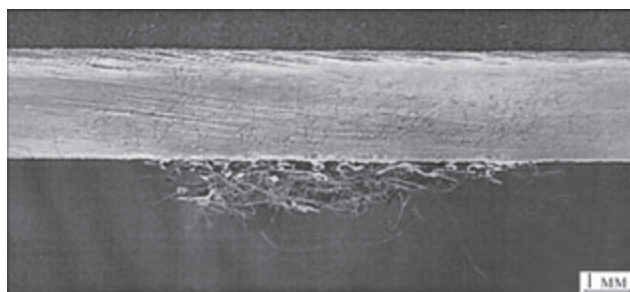


Рис. 4. Макроструктура металу лопатки в зоні виправлення поверхневих дефектів з нанесеним захисним шаром покриття

Припій SBM-4 добре заповнює зазори та не впливає на структуру основного металу. Тріщини або мікротріщини під час виправлення дефектів через використання припою також не спостерігаються.

Слід відзначити, що для сучасного покоління судових турбін для виправлення поверхневих дефектів використовують припої ВПр11-40Н з температурою плавлення 1020 °С і НС12 з температурою плавлення близько 1150 °С, що призводить до підплавлення з наступним руйнуванням захисного покриття. Сплави СМ93-ВІ та СМ96-ВІ дозволяють підвищити температуру паяння до 1230 °С, використовуючи припій SBM-4, та підвищити ресурс та робочу температуру газу в турбіні.

Висновки

1. Використана двоетапна методика розробки припою, згідно якої на першому (розрахунковому) етапі визначають раціональні межі концентрації легуючих елементів в основі припою, невідповідність параметрів будови γ - та γ' -фаз, критичні температури, кількість електронних вакансій. Одним з найголовніших критеріїв раціонального вмісту легуючих елементів є мінімізація схильності до утворення ТЩУ-фаз, зокрема, крихкої σ -фази. На другому – експериментальному етапі визначається раціональний вміст елементів депресантів.

2. Припій SBM-4 при промислово-дослідних випробуваннях показав високі технологічні властивості та дозволяє підвищити температуру робочого газу в турбіні.

3. Температура паяння і плавлення припою SBM-4 виключає його взаємодію з захисним покриттям системи Co–Cr–Al–Y та Y_2O_3 при його нанесенні та при термічній обробці.

4. На припій SBM-4 розроблено Тимчасові технічні умови УКФА 360.107.002-ВТУ і Технологічну інструкцію на виправлення поверхневих дефектів методом паяння у вакуумі УКФА 387.341.002-ТІ.

5. Паяння полікристалічних лопаток зі сплаву СМ93-ВІ виконується при температурі 1200...1215 °С, а зі сплаву СМ96-ВІ з монокристалічною або спрямовано-закристалізованою структурами при температурі 1220...1230 °С протягом 15 ± 5 хв. Після паяння лопатки охолоджуються до температури 1070 °С і витримуються 60 хв., далі продовжується охолодження у вакуумі до температури 200 °С.

6. Для виправлення дефектів в якості наповнювача може бути використаний порошок сплаву СМ88У-ВІ, який випускається централізовано «Укрспецсталлю» або високотемпературний припій SBM-3, розроблений в НУК і НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Наповнювач та припій

SBM-4 змішуються у співвідношенні 1:1. Для закріплення суміші використовується 5%-й розчин смоли БМК-5 в ацетоні. Кількість композиційного порошку повинна бути більшою за об'єм розробленого дефекту на 40...50 %. Виправлення дефектів проводиться за тими ж параметрами режимів, що і паяння.

Список літератури

1. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, **5**, 24–30.
2. Кривов Г.О., Зорыкин К.О. (2012) *Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів*. КБЦ.
3. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів: підручник*. Хорунов В.Ф. і Квасницький В.Ф. (ред.) Миколаїв, НУК.
4. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2012) Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС32. *Сварочное производство*, **5**, 24–30.
5. Мьяльниця Г.П., Максютя І.І., Квасницька Ю.Г., Михнян О.В. (2013) Вибір легуючого комплексу нового корозійно-стійкого сплаву для соплових лопаток ГТД. *Металознавство та обробка металів*, **2**, 29–34.
6. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2010) Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36. *Технология машиностроения*, **5**, 21–25.
7. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. (2010). Технология получения неразъемных соединений из сплава ЖС36. *Сварочное производство*, **7**, 27–31.
8. Малащенко И.С., Мазурак В.Е., Кушнарєва Т.Н. и др. (2014). Пайка в вакууме литого никелевого сплава ЖС6У композиционными припоями на основе ВПр-36. Ч. 1. *Современная электрометаллургия*, **4**, 26–42.
9. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Тимофеева О.Б. (2013). Особенности технологии диффузионной пайки жаропрочного сплава ЭП975 и литейного монокристаллического интерметаллидного сплава ВК-НА-4У применительно к конструкции «Блиск». *Сварочное производство*, **7**, 19–25.
10. Yue, X., Liu, F., Chen, H. et al. (2018). Effect of Bonding Temperature on Microstructure Evolution during TLP Bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10. *MATEC Web of Conferences*, 206, 11. 03004.
11. Максимова С.В. (2014) Припой без бора и кремния для пайки жаропрочного никелевого сплава. *Автоматическая сварка*, **8**, 15–21.
12. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Kvasnytskyi, V. et al. (2020) Designing brazing filler metal for heat-resistant alloys based on Ni₃Al intermetallic. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **6**, **12** (108), 6–19.

References

1. Kablov, E.N. (2012) Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **5**, 24-30 [in Russian].
2. Kryvov G.O., Zorykin K.O. (2012) *Production of welded structures: Manual for students of higher educational instit.*, Kyiv. KVITs [in Ukrainian].
3. Yermolaiev, H.V., Kvasnytskyi V.V., Kvasnytskyi, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials: Manual*. Ed. by V.F. Khorunov, V.F. Kvasnytskyi. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
4. Lukin, V.I., Rylnikov, V.S., Afanasiev-Hodykin, A.N. (2012) Features of brazing of single-crystal castings from ZhS32 alloy. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 24-30 [in Russian].
5. Mialnytsia, H.P., Maksyuta, I.I., Kvasnytska, Yu.H., Mykhnyan, O.V. (2013) Selection of an alloying complex for a new corrosion-resistant alloy of GTE blades. *Metaloznnavstvo ta Obrobka Metaliv*, **2**, 29-34 [in Ukrainian].

6. Lukin, V.I., Ryl'nikov, V.S., Afanasiev-Hodykin, A.N. (2010) Peculiarities of producing of the brazed joints of the alloy ZhS36. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 5, 21-25 [in Russian].
7. Afanasiev-Hodykin, A. N., Lukin, V. I., Ryl'nikov, V. S. (2010) Technology for producing permanent joints from ZhS36 alloy. *Svarochn. Proizvodstvo*, 7, 27–31 [in Russian].
8. Malashenko, I.S., Mazurak, V.E., Kushnareva, T.N. et al. (2014) Vacuum brazing of cast nickel alloy ZhS6U with composite brazing fillers based on VPr-36 (Pt 1). *Sovrem. Elektrometallurgiya*, 4, 26-42 [in Russian].
9. Lukin, V.I., Ryl'nikov, B.C., Afanasiev-Hodykin, A.N., Timofeeva, O.B. (2013) Features of diffusion brazing technology of EP975 heat-resistant alloy and VKNA-4U casting monocrystalline intermetallic alloy as applied to the “Blisk” design. *Svarochn. Proizvodstvo*, 7, 19-25 [in Russian].
10. Yue, X., Liu, F., Chen, H., Wan, D., Qin, H. (2018) *Effect of bonding temperature on microstructure evolution during TLP bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10*. MATEC Web of Conferences, 206, 11. 03004.
11. Maksymova, S.V. (2014) Brazing filler metal without boron and silicon for brazing heat-resistant nickel alloy. *The Paton Welding J.*, 8, 15-21 [in Russian].
12. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Kvasnytskyi, V. et al. (2020) Designing brazing filler metal for heat-resistant alloys based on Ni₃Al intermetallide. *Eastern-Europ. J. of Enterprise Technologies*, 6, 12(108), 6-19.

DEVELOPMENT OF BRAZING ALLOY, BRAZING TECHNOLOGIES AND CORRECTION OF CASTINGS SURFACE DEFECTS OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS FOR SHIP GAS TURBINES

V.V. Kvasnytskyi¹, M.V. Matviienko², H.P. Mialnitsa³, I.H. Kvasnytska⁴, Ye.A. Buturlia⁵

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: kvas69@ukr.net

²Kherson branch Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 44 Ushakov Str., 73003 Kherson, Ukraine

³Gas Turbine Research and Production Complex Zorya-Mashproekt, 42-a Bogoyavlenskiy Ave., 54018, Mykolaiv, Ukraine

⁴Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, 34/1 Vernadskogo, 03142, Kyiv, Ukraine.

⁵Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Geroev Ukrainy Ave., 54000, Mykolaiv, Ukraine

The aim of the work was to develop brazing alloy and brazing technology of heat-resistant nickel alloys CM93-BI and CM96-BI, used in the production of new generation ship gas turbines. A prerequisite was to provide high-temperature strength of the brazed joints not lower than 80% of the strength of the base metal. During the development of the brazing alloy, a two-stage procedure was used, where at the first (calculation) stage the required concentrations of alloying elements in the base of brazing alloy, non-compliance of γ - and γ' -phases structure parameters, critical temperatures, number of electronic vacancies, physical and mechanical properties of alloys were determined. At the second (experimental) stage, the rational content of the number of depressant elements was determined. As a depressant, boron was chosen. It was established that when using a brazing alloy containing 1.0...1.2 wt. % of boron, the structural structure of the base metal and the weld are identical. After brazing and heat treatment, boride eutectics in the brazed joints were not detected. It was established that within the determined limits boron does not reduce the resistance of welded joints to high-temperature salt corrosion. The surface properties of the brazing alloy and its interaction with the alloys CM93-BI and CM96-BI were studied. The developed SBM-4 brazing alloy showed high technological properties and allows raising the temperature of working gas in gas turbines. The developed technology of brazing CM93-BI and CM96-BI alloys provided the tensile strength σ_t at the level of the base metal. The long-term strength of the welded joints at a temperature of 900 °C was equal to 314... 321 MPa on the basis of 100 h, which amounts to 0.89...0.91 of long-term strength of polycrystalline alloys. The technology of correction of blade defects by SBM-4 brazing alloy was developed. 12 Ref., 4 Fig.

Key words: brazing alloy, heat-resistant nickel alloys, brazing technology, correction of casting defects, depressant elements, boron, gas turbines, blade

Надійшла до редакції 02.02.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031

Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693

(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України