

АНОТАЦІЯ

Бутурля Є.А. Розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів лопаток суднових газових турбін нового покоління – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 — Матеріалознавство. — Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2021.

Робота присвячена науково-прикладній задачі – розробці припою для жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) нового покоління. Для суднового газотурбобудування завжди стояла проблема підвищення робочої температури та ресурсу роботи турбін, яка ускладнюється умовами роботи суднових газотурбінних двигунів (ГТД). Суднові ГТД працюють на важкому паливі із домішками сірки та в умовах високотемпературної сольової корозії (ВСК), швидкість якої в сотні разів більше, ніж швидкість корозії в авіаційних турбінах. Для суднових турбін нового покоління ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» і Фізико-технологічним інститутом металів і сплавів НАН України розроблено сплави СМ93-ВІ і СМ96-ВІ, що дозволяють підняти робочу температуру на 40-60 °С. Основним та універсальним способом з'єднання ливарних ЖНС є паяння, при якому виникає проблема підвищення жаростійкості і довготривалої високотемпературної міцності спаяних з'єднань. Тому, для розвитку суднового газотурбобудування актуальна розробка припою, який забезпечить необхідні фізико-хімічні характеристики спаяного з'єднання для нових сплавів.

Метою дисертаційного дослідження є розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ для виробництва суднових газових турбін нового покоління з підвищенням високотемпературної міцності спаяних з'єднань не нижче 80 % міцності основного металу.

Наукова новизна полягає в тому, що:

1. Вперше обґрунтовано двоетапний метод розробки припою, суть якого полягає в тому, що на першому етапі, з використанням комп'ютерних програм, розрахована основа припою з включенням найбільш ефективних легуючих елементів, які забезпечують твердорозчинне і дисперсійне зміцнення, та границі легування припою тугоплавкими металами для запобігання утворення ТЩУ фаз, зокрема σ -фази, а на другому етапі експериментально визначається необхідна концентрація депресантів.

2. Вперше встановлено, що багатокомпонентні припої з Re і Ta системи Ni-Cr-Co-Al-Ta-Re-W-Mo-Ti-Nb-V-Hf-Zr-C забезпечують крайові кути змочування сплавів CM93-VI і CM96-VI до 6° , питому площу розтікання 1,4-1,5 мм²/мг при температурі 1200-1230 °С паяння і виправлення поверхневих дефектів відливок.

3. Удосконалено систему легування припою, яка забезпечує довготривалу міцність спаяних з'єднань сплавів CM93-VI і CM96-VI при 900 °С на рівні 0,9 від міцності основного металу.

4. Дістало подальший розвиток уявлення про напружений стан спаяних з'єднань з прошарком припою з його відносною товщиною (s/d від 0,0025...0,01), що має відмінні від основного металу фізико-механічні властивості, яка полягає в тому, що на більшій частині вузла в основному металі напруження практично відсутні при термічному навантаженні та лінійно розподілені при силовому навантаженні. Біля зовнішньої поверхні з'єднання та в самому прошарку утворюється об'ємний напружено-деформований стан, який призводить до зміцнення або знеміцнення основного металу та прошарку.

Практичне значення роботи містить:

Запропонований і реалізований двоетапний метод розробки припою із використанням комп'ютерних програм для розробки припою. Із використанням нового методу розроблено припій SBM-4 та технологію паяння і виправлення поверхневих дефектів лиття промислових відливок для

жаромічних нікелевих сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. Припій має температуру паяння 1200...1230 °С, довготривалу міцність для спаяних з'єднань при 900 °С на рівні 0,9 від рівня основного металу і стійкість проти високотемпературної сольової корозії на рівні сплаву СМ88У-ВІ та пройшов етапи впровадження, що підтверджується відповідними актами. Розроблений припій може використовуватися для інших ЖНС та був застосований для відновлення паянням у вакуумі пошкоджених високотемпературних елементів обладнання з жаромічного сплаву ЧС88-ВІ для отримання відцентровим плазмовим розпиленням сферичних порошків.

У першому розділі виконано аналіз даних літературних джерел та розглянута різниця умов роботи авіаційних і суднових ГТД. Авіаційні сплави у своєму складі мають 4-6 % хрому, що дозволяє їм працювати при більш високих робочих температурах, ніж суднові. Зниження робочої температури суднових турбін обумовлено концентрацією хрому в сплавах на рівні 18,0-22,0 %. Таке значення хрому необхідно для захисту від високотемпературної сольової корозії, яка виникає в процесі експлуатації. Високотемпературну сольову корозію провокує комбінація шкідливих факторів, а саме повітря для згоряння палива має пари морської води та «важке» паливо, що у своєму складі містить сірку. Хром забезпечує стійкість проти ВСК, але знижує високотемпературну працездатність сплавів. Тому хімічний склад суднових і авіаційних турбін суттєво відрізняється. Ливарні ЖНС мають проблеми при зварюванні плавленням. Основним способом з'єднання ЖНС є паяння, але цей процес виконується при температурах нижче, ніж температура плавлення основного металу, тому виникає проблема співвідношення міцності спаяного з'єднання (прошарку) до основного металу, яке на сьогоднішній час складає близько 0,8.

Проведений аналіз джерел щодо припоїв не показав висвітлення методів розробки припоїв та ролі проміжного прошарку в спаяному з'єднанні, який впливає на напружено-деформований стан і працездатність з'єднання.

У зв'язку з підвищенням робочої температури для суднових турбін понад 900 °С в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України спільно з ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» розроблено сплави СМ93-ВІ і СМ96-ВІ.

У **другому розділі** наведені хімічний склад та границя міцності досліджуваних матеріалів, обладнання та методи, що використані в роботі.

В дисертаційному дослідженні використано обладнання для паяння зразків, яке знаходиться на кафедрі зварювального виробництва НУК ім. адмірала Макарова: піч СНВЭ 1.3.1-16И1, вакуумна установка УДСВ-ДТ, Надвисоковакуумний універсальний технологічний комплекс ВВУ-1Д. Для виплавлення промислового припою та термічної обробки застосовано обладнання, яке знаходиться на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»: вакуумний індукційний модуль VIM-125, СЭВ-11,54, вакуумна піч «Schmett».

Механічні випробування виконані за стандартною методикою із використанням МП-1200 і АИМА-5. Дослідження макро- і мікроструктури, хімічний аналіз зразків виконувалось за допомогою Неофот-21 та РЭММА-102-02. Диференціальний термічний аналіз виконано на установці ВДТА-8М.

Використано метод планування експерименту та статистична обробка даних, за допомогою якої створена математична модель.

У програмному комплексі «ANSYS» методом скінчених елементів змодельований вузол циліндр-циліндр із визначенням напружено-деформованого стану спаяного з'єднання з проміжним прошарком.

У **третьому розділі** виконана розробка припою для паяння сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. Була проведена спроба знизити температуру паяння припою SBM-3, але підвищення концентрації кремнію негативно сказалося на структурі спаяного шва. Тому виконана розробка нового припою, який отримав назву SBM-4. Припій розроблено за двоетапним методом, в якому на першому етапі обрана основа припою, на другому - експериментально визначено концентрацію депресантів. Було застосована програма PHASOMP,

за допомогою якої розраховані розподіл елементів між γ - і γ' -фазами, температури ліквідуса, солідуса і кількості електронних вакансій. В якості основи припою обрано сплав СМ93-ВІ до складу якого було внесено корективи. Вольфрам частково замінено ренієм, який має меншу культивість електронних вакансій, додатково введено гафній для покращення ливарних властивостей, введено цирконій для покращення проникності припою у мукрозазори. 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.

На другому етапі експериментальним шляхом визначена концентрація бору при якій спостерігається ефективно розтікання припою. До першого варіанту SBM-4 (вміст бору 0,75 % мас.) додавали сплав 4Д із наступним хімічним складом 14,0Cr-9,5Co-2,5Al-2,4B, що дозволило змінювати концентрацію бору від 0,915 до 1,245 %. Математична модель, яка прогнозує площу розтікання із врахуванням температури паяння та кількості сплаву 4Д, показала майже повне співпадіння експериментальних і розрахункових значень. Установлено, що при концентрації бору 1,0-1,2 % припій добре змочує поверхню ЖНС.

В четвертому розділі наведено дослідження промислового припою SBM-4, хімічний склад якого складає (% мас.): (12,5-14,5)Cr;(6,5-7,5)Co; (3,0-5,0)Al; (5,0-6,0)Ta; (3,0-4,5)Re; (2,0-3,0)W; (1,0-2,0)Mo; (4,7-6,2)Ti; (0,3-0,5)Nb; (1,0-1,2)B; (0,2-0,3)Hf; (0,45-0,7)Zr; (0,07-0,10)C; Ni – решта. Припій виплавлено на підприємстві ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Дослідження показали високі поверхневі властивості припою та добре заповнення зазорів кланових зразків зі сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. Поверхнева енергія припою за методом лежачої краплі складає 1,38 і 1,9 Дж/м² при температурах 1240 і 1220 °С відповідно. Дослідження довготривалої міцності спаяних з'єднань сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ виконували на полікристалічних зразках. При температурі 900 °С на базі 100 год довготривала міцність дорівнює 285 МПа, що складає 0,91 і 0,89 від міцності основного металу для сплавів СМ93-ВІ і

СМ96-ВІ відповідно. Після паяння і механічної обробки боридна евтектика в зоні стику відсутня. Швидкість ВСК припою SBM-4 становить 0,4-1,32 мг/см²·год, таке значення відповідає технічним вимогам. Проникність припою SBM-4 дозволяє використовувати його для ремонту дефектів лиття лопаток газових турбін..

В п'ятому розділі методом скінченних елементів проведено моделювання напружено-деформованого стану (НДС) спаяного з'єднання типу циліндр-циліндр з жароміцних сплавів у пружному стані і в умовах миттєвої пластичності.

Показано, що в спаяному вузлі із різними співвідношеннями модуля пружності, температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) і границь плинності жароміцного сплаву і прошарку (припою) на більшій частині стику в основному металі напруження практично відсутні при термічному навантаженні та лінійно розподілені при силовому. Тільки в невеликій зоні біля зовнішньої поверхні і в прошарку формується об'ємний НДС, який призводить до знеміцнення (зниження рівня границі плинності і підвищення пластичності) чи до зміцнення (підвищення границі плинності і зниження пластичності) основного металу та прошарку в зоні стику в порівнянні з лінійним напруженим станом.

Моделювання НДС показало, що рівень міцності спаяного з'єднання наближається до рівня міцності основного металу при наближенні по всій довжині стику коефіцієнта жорсткості напруженого стану до одиниці. Це відбувається при забезпеченні хімічної і структурної однорідності металу спаяного з'єднання.

Шостий розділ присвячено практичному використанню розробленого пропою SBM-4. Показана структура виправленого дефекта.

В розділі розроблена послідовність операцій, яку необхідно дотримуватись при підготовці лопаток до паяння та за якими режимами виконувати паяння для сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. При складанні лопаток в пакет, на відстані не менше 5 мм від стику, виконується зачищення лопаток до

металевого блиску. Припій заміщується до пастоподібного стану із використанням 5 %-го розчину акрилової смоли БМК-5 на ацетоні, після чого фіксується на деталі. Об'єм припою складає приблизно 1,4 від об'єму, який заповнюється. Паяння виконується у вакуумній печі, яка забезпечує вакуум не гірше ніж 10^{-2} Па. Температура паяння припоєм SBM-4 для сплаву CM93-VI складає 1200-1215 °С, для сплаву CM96-VI 1220-1230 °С, час витримки для обох сплавів дорівнює 15 ± 5 хв. Після паяння лопатки повинні охолоджуватися у вакуумі до 1070 °С із витримкою 60 хв., після чого продовжується охолодження у вакуумі до температури 200 °С.

Перед виправленням дефектів лопатки повинні пройти весь ступінчатий цикл термічної обробки, включаючи гомогенізацію при температурі 1180 °С відповідно до Технологічного процесу. Дефекти, що підлягають виправленню можуть виправлятися з наповнювачем або без нього. Місце дефекту розроблюється під кутом $90^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$, після чого виконується очистка на відстані не менше 5 мм та знежирюється. Наповнювачем може виступати порошок CM88У-VI, який виготовляється «Укрспецсталлю», або розроблений в НУК ім. адмірала Макарова і НВКГ «Зоря»-«Машпроект» припій SBM-3. Припій і наповнювач змішуються у пропорції 1:1. Кількість суміші припою і наповнювача повинна бути більше від об'єму дефекту на 40-50 %. Як і при паянні, порошкова суміш закріплюється із застосуванням 5%-го розчину акрилової смоли БМК-5 на ацетоні. Температурні режими при виправленні дефектів аналогічні режимам паяння.

Ключові слова: жароміцний сплав, структура, хімічний сплав, швидкість ВСК, паяння, припій, спаяне з'єднання, лопатка турбіни, виправлення поверхневих дефектів, високотемпературна сольова корозія, коефіцієнт жорсткості напруженого стану, прошарок, моделювання напружено-деформованого стану, короткочасна міцність, довготривала міцність, крайові кути.

Публікації основних наукових результатів дисертації

1. Квасницький В.В., Матвиенко М.В., Бутурля Е.А. Вплив властивостей прошарку припою на напружено-деформований стан спаяних вузлів з жароміцних сплавів / Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2020. - №4 (482). – с. 119-128

2. Viktor V. Kvasnytskyi , Maksym V. Matviienko, Heorhii P. Mialnitsa, Yevhen A. Buturlia. Investigation of brazing filler for brazing high-temperature nickel alloys of marine gas turbines // Shipbuilding & Marine Infrastructure. – 2020. – № 2 (14). – P. 65–72.

3. Квасницький В.В., Мьяльница Г.Ф., Матвиенко М.В., Бутурля Е.А., Dong Chunlin. Исследование взаимодействия сплава на основе Ni_3Al с прослойками различных систем легирования для TLP-соединения // Автоматическая сварка, 2019, № 8. – С. 22 – 29. (на момент опублікування входить до фахових видань України)

4. Квасницький В.В., Матвиенко М.В., Бутурля Е.А., Квасницький В.Ф., Ермолаев Г.В. Влияние толщины прослойки на НДС сварных и паяных соединений жаропрочных сплавов в упругой стадии. / Міжвуз. тематичн. збір. наукових праць «Наука та виробництво», Випуск 20, № 1. Маріуполь: ПДТУ. 2019. – С. 23 – 33. (на момент опублікування входить до фахових видань України)

5. Квасницький В.В., Матвиенко М.В., Бутурля Е.А., Квасницький В.Ф., Ермолаев Г.В. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке и пайке цилиндрических узлов с мягкой прослойкой в условиях силового термического нагружения в пределах упругости // Вісник Одеського Національного морського університету. Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ. – 2019. Випуск 1 (58). – С. 126 – 138. (на момент опублікування входить до фахових видань України)

6. Влияние характера нагружения на напряженное состояние соединений с мягкой прослойкой / В.В. Квасницький, М.В. Матвиенко, Е.А. Бутурля, В.Ф. Квасницький, Г.В. Ермолаев // Наука і виробництво: міжвуз.

тематичн. збір. наукових праць. – Маріуполь: 2019. Вип. 21. – С. 39 – 47. (на момент опублікування входить до фахових видань України)

7. Kvasnytskyi, V. Designing brazing filler metal for heat-resistant alloys based on Ni_3Al intermetallide / Viktor Kvasnytskyi, Volodymyr Korzhyk, Viacheslav Kvasnytskyi, Heorhii Mialnitsa, Chunlin Dong, Tetiana Pryadko, Maksym Matviienko, Yevhen Buturlia // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 6, №12 (108). - P. 6-19. (НБД Scopus)

Публікації, в яких апробовано матеріали дисертації

8. Квасницький В.В., Мьяльница Г.Ф., Матвиенко М.В., Бутурля Е.А. Изучение взаимодействия сплава на основе Ni_3Al с прослойками различных систем для TLP-соединения // Матеріали Міжнародної конференції «Інноваційні технології та інженіринг у зварюванні і споріднених процесах – Poly Weld. 2019» 23-24 травня 2019р. Україна. Київ – К: «КПІ імені Ігора Сікорського». 2019. – с.47-48

9. Квасницький Віктор, Мьяльница Георгій, Матвиенко Максим, Бутурля Євген. Особливості легування припоїв для жароміцних нікелевих сплавів нового покоління // 14-й Міжнародний симпозіум інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 23 травня – 24 травня 2019 р.): Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2019 – с. 8-9.

10. Квасницький В.В., Мьяльница Г.Ф., Матвиенко М.В., Бутурля Е.А. Припои для жаропрочных сплавов газовых турбин нового поколения // Проблеми зварювання та споріднених технологій / Всеукраїнська конференція з міжнародною участю, що присвячена 60-річчю кафедри зварювального виробництва НУК (Миколаїв-Коблево 17-19 вересня 2019 р.) : Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю. – Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2019. 75-77 с.

ABSTRACT

Buturlia Ye.A. Development of brazing filler and brazing technology of heat-resistant nickel alloys of new generation marine gas turbine blades - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 132 - Materials science. - Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2021.

The work is devoted to a scientific and applied problem - the development of brazing filler metal for heat-resistant nickel alloys of the new generation (HNA). For marine gas turbine construction there has always been a problem of increasing the operating temperature and service life of turbines, which is complicated by the operating conditions of marine gas turbine engines (GTE). Marine GTE operate on heavy fuel with sulfur impurities and in conditions of high-temperature salt corrosion (HSC), the speed of which is hundreds of times higher than the corrosion rate in aircraft turbines. Alloys CM93-VI and CM96-VI were developed for the new generation turbines of Gas Turbine Research and Production Complex Zorya-Mashproekt and the Physics-technological institute of metals and alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, which allow to increase the operating temperature of the gas by 40... 60 ° C. The base and universal way of joining foundry HNA is brazing, which has the problem of increasing the heat resistance and longevity of high-temperature strength of brazed joints. Therefore, for the development of marine gas turbine construction, it is important to develop a brazing filler that will provide the necessary physical and chemical characteristics of the welded joint for new alloys.

The aim of the dissertation research is to develop brazing filler and brazing technology of heat-resistant nickel alloys CM93-VI and CM96-VI for the production of new generation vascular gas turbines with increasing gas operating temperature and high temperature strength of brazed joints not less than 80% strength of the base metal.

The scientific novelty may be that:

1. For the first time a two-stage method of brazing filler metal development is substantiated, the essence of which is that at the first stage, using computer programs, the brazing filler metal base is calculated with the inclusion of the most effective alloying elements providing solid-soluble and dispersion hardening. to prevent the formation of TDP phases, in particular the σ -phase, and in the second stage the required concentration of depressants is experimentally determined.

2. It was first established that multicomponent brazing filler metal from Re and Ta systems Ni-Cr-Co-Al-Ta-Re-W-Mo-Ti-Nb-B-Hf-Zr-C provide edge wetting angles of alloys CM93-VI and CM96-VI up to 6° , specific spreading area 1.4-1.5 mm²/mg at the temperature of brazing and correction of surface defects of castings 1200-1230 ° C.

3. The brazing filler metal alloying system has been improved, which provides long-term strength of CM93-VI and CM96-VI alloys at 900 °C at the level of 0.9 of the strength of the base metal.

4. Received a further development of the idea of the stress state of brazed joints with a interlayer of brazing filler metal with its relative thickness (s/d from 0,0025 ... 0,01), which has different from the base metal physical and mechanical properties, which consists in because on most of the node in the main metal stresses are virtually absent under thermal load and linearly distributed under force load. In the outer surface of the joint and in the interlayer itself, a three-dimensional stress-strain state is formed, which leads to the strengthening or weakening of the base metal and the interlayer.

The practical significance of the work includes:

A two-stage theoretical and experimental method of brazing filler metal development using computer programs is proposed and implemented. Using the new method, SBM-4 brazing filler metal and brazing and correction technology for surface defects of industrial castings for heat-resistant nickel alloys CM93-VI and CM96-VI were developed. The brazing filler metal passed the Gas Turbine Research and Production Complex Zorya-Mashproekt, which showed the brazing temperature

of 1215...1230 °C, long-term strength for brazed joints at 900 ° C at the level of 0.9 of the base metal level and resistance against high-temperature salt corrosion at the level of the alloy CM88U-VI. The brazing filler metal can be used for other HNA and was used to restore by brazing in vacuum damaged high-temperature elements of the equipment of heat-resistant alloy ChS88-VI to obtain centrifugal plasma spraying of spherical powders.

In the **first section** the analysis of data of literature sources is executed and the difference of conditions of work of aviation and ship GTD is considered. Aviation alloys contain 4-6% chromium, which allows them to operate at higher operating temperatures than ship. The decrease in the operating temperature of marine turbines is due to the concentration of chromium in the alloys at the level of 18.0-22.0%. This value of chromium is necessary to protect against high-temperature salt corrosion (HTSC) that occurs during operation. High-temperature salt corrosion is provoked by a combination of harmful factors, namely the air for fuel combustion has sea water vapor and "heavy" fuel, which contains sulfur. Chromium provides resistance against HTSC, but reduces the high-temperature performance of alloys. Therefore, the chemical composition of ship and aircraft turbines differs significantly. Foundry HNA has problems with fusion welding. The main way to connect the HNA is brazing, but this process is performed at temperatures lower than the melting point of the base metal, so there is a problem of the ratio of the strength of the brazed joint (layer) to the base metal, which is currently about 0.8.

The analysis of the sources for brazing filler metals did not show the coverage of methods of brazing filler metals development and the role of the intermediate layer in the welded joint, which affects the stress-strain state and performance of the connection.

In connection with the increase of operating temperature for ship turbines over 900° C in the Physics-technological institute of metals and alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine together with Gas Turbine Research and Production Complex Zorya-Mashproekt CM93-VI and CM96-VI.

The second section presents the chemical composition and yield strength of the investigated materials, equipment and methods used in the research.

The dissertation research uses equipment for brazing samples, which is located at the Department of Welding Admiral Makarov NUS: SNVE 1.3.1-16I1 furnace, UDSV-DT vacuum unit, Ultra-high-vacuum universal technological complex VVU-1D. For smelting of industrial brazing filler metal and heat treatment, the equipment located at GTRPC Zorya-Mashproekt was used: vacuum induction module VIM-125, SEV-11,54, vacuum furnace "Schmett".

Mechanical tests were performed according to standard methods using MP-1200 and AIMA-5. Studies of macro- and microstructure, chemical analysis of samples were performed using Neofot-21 and REMMA-102-02. Differential thermal analysis was performed on the VDTA-8M unit.

The method of experiment planning and statistical data processing were used, with the help of which a mathematical model was created.

In the software complex "ANSYS" by the finite element method the node cylinder-cylinder is modeled with determination of the stress-strain state of the welded joint with the intermediate layer.

In the **third section**, the development of brazing filler metal for brazing alloys CM93-VI and CM96-VI. An attempt was made to reduce the brazing temperature of SBM-3 brazing filler metal, but the increase in silicon concentration had a negative effect on the structure of the brazed seam. Therefore, the development of a new brazing filler metal, called SBM-4. The brazing filler metal was developed by a two-stage method, in which the brazing filler metal base was selected at the first stage, and the concentration of depressants was experimentally determined at the second stage. The PHACOMP program was used to calculate the distribution of elements between γ - and γ' -phases, liquidus temperature, solidus and the number of electronic vacancies. Alloy CM93-VI was chosen as the basis of the brazing filler metal, which was adjusted. Tungsten has been partially replaced by rhenium, which has a lower density of electronic vacancies, hafnium has been additionally introduced to improve the casting properties, and zirconium has been introduced to

improve the permeability of the brazing filler metal to the microgaps. The average content of the elements of the base of the brazing filler metal is (% wt.): 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 - the rest.

In the second stage, the boron concentration at which effective brazing filler metal spreading is observed is determined experimentally. To the first variant SBM-4 (boron content 0.75% wt.) Was added alloy 4D with the following chemical composition 14.0Cr-9.5Co-2.5Al-2.4B, which allowed to change the concentration of boron from 0.915 to 1.245%. The mathematical model, which predicts the spreading area taking into account the brazing temperature and the amount of 4D alloy, showed almost complete coincidence of experimental and calculated values. It was found that at a boron concentration of 1.0-1.2%, the brazing filler metal wets the surface of the gastrointestinal tract well.

The **fourth section** presents a study of industrial brazing filler metal SBM-4, the chemical composition of which is (% wt.): (12.5-14.5) Cr; (6.5-7.5) Co; (3.0-5.0) Al; (5.0-6.0) Ta; (3.0-4.5) Re; (2.0-3.0) W; (1.0-2.0) Mo; (4.7-6.2) Ti; (0.3-0.5) Nb; (1.0-1.2) B; (0.2-0.3) Hf; (0.45-0.7) Zr; (0.07-0.10) C; Ni - the rest. The brazing filler metal was smelted at the enterprise of GTRPC Zorya-Mashproekt. Studies have shown high surface properties of the brazing filler metal and good filling of the gaps of clan samples from alloys CM93-VI and CM96-VI. The surface energy of the brazing filler metal by the method of a lying drop is 1.38 and 1.9 J/m² at temperatures of 1240 and 1220 °C, respectively. Studies of long-term strength of brazed joints of alloys CM93-VI and CM96-VI were performed on polycrystalline samples. At a temperature of 900 °C on the basis of 100 h long-term strength is 285 MPa, which is 0.91 and 0.89 of the strength of the base metal for alloys CM93-VI and CM96-VI, respectively. After brazing and machining boride eutectic in the joint area is absent. The HTSC speed of SBM-4 brazing filler metal is 0.4-1.32 mg/cm²·h, this value meets the technical requirements. The permeability of the SBM-4 brazing filler metal allows it to be used to repair defects in the casting of gas turbine blades.

In the **fifth section**, the finite element method is used to model the stress-strain state (SSS) of a cylinder-cylinder welded joint made of heat-resistant alloys in the elastic state and in the conditions of instantaneous plasticity.

It is shown that in a welded joint with different ratios of modulus of elasticity, temperature coefficients of linear expansion (TCLR) and yield strength of heat-resistant alloy and layer (brazing filler metal) at most of the joint in the main metal stresses are practically absent under thermal load and linearly distributed under force. Only in a small area near the outer surface and in the layer is formed bulk SSS, which leads to weakening (lowering the yield strength and increasing ductility) or to strengthening (increasing yield strength and reduced ductility) of the parent metal and the layer in the joint area compared to linear stress state.

The SSS simulation showed that the level of strength of the welded joint approaches the level of strength of the base metal when approaching the stiffness coefficient of the stress state along the entire length of the joint. This occurs by ensuring the chemical and structural homogeneity of the metal of the welded joint.

The **sixth section** is devoted to the practical use of the developed brazing filler metal SBM-4. The structure of the corrected defect is shown.

The section develops the sequence of operations that must be followed when preparing the blades for brazing and the modes of brazing for alloys CM93-VI and CM96-VI. When assembling the blades in a package, at a distance of at least 5 mm from the joint, the blades are cleaned to a metallic luster. The brazing filler metal is kneaded to a pasty state using a 5% solution of acrylic resin BMK-5 in acetone, and then fixed on the part. The volume of brazing filler metal is approximately 1.4 times the volume to be filled. Brazing filler metal is performed in a vacuum furnace, which provides a vacuum of not less than 10^{-2} Pa. The brazing temperature of SBM-4 brazing filler metal for alloy CM93-VI is 1200-1215 °C, for alloy CM96-VI 1220-1230 °C, holding time for both alloys is 15 ± 5 minutes. After brazing, the blades must be cooled in vacuum to 1070 °C for 60 minutes, after which cooling is continued in vacuum to a temperature of 200 °C.

Before correcting the defects, the blades must go through the entire step cycle of heat treatment, including homogenization at a temperature of 1180 °C in accordance with the technological process. Defects to be corrected can be corrected with or without filler. The defect site is developed at an angle of $90^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$, after which cleaning is performed at a distance of at least 5 mm and degreased. The filler can be powder SM88U-VI, which is manufactured by «Ukrspetsstal» or developed at Admiral Makarov NUS and GTRPC Zorya-Mashproekt brazing filler metal SBM-3. The brazing filler metal and filler are mixed in a ratio of 1:1. The amount of mixture of brazing filler metal and filler should be greater than the volume of the defect by 40-50%. As with brazing, the powder mixture is fixed using a 5% solution of acrylic resin BMK-5 in acetone. Temperature modes for defect correction are similar to brazing modes.

Keywords: heat-resistant alloy, structure, chemical alloy, HTSC speed, brazing, brazing filler metal, brazed joint, turbine blade, surface defect correction, high-temperature salt corrosion, stress stiffness coefficient, interlayer, modeling of stress-strain state, short-term strength, long-term strength, edge angles.