

УДК 621.791.3

**Квасницький В. В., Матвиєнко М. В., Квасницька Ю. Г., Бугасенко Б. В.,
Бутурля Є. А., Макаренко Н. О.****ОСОБЛИВОСТІ ПРИПОЇВ ДЛЯ ПАЯННЯ ЖАРОМІЦНИХ
НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ МОРСЬКИХ ГАЗОВИХ ТУРБІН**

Жароміцні нікелеві сплави є основним конструкційним матеріалом в сучасному газотурбобудуванні. Підвищення температури робочого тіла, ресурсу і ефективності енергетичних установок вимагає розробки нових жароміцних сплавів, здатних протистояти усьому комплексу факторів впливу, існуючих у реальних умовах їх роботи. Авіаційні турбіни працюють на чистому авіаційному керосині з низьким вмістом шкідливих домішок, зокрема сірки і традиційно мають більш високі температури газу, порівняно з морськими. Паливо морських турбін містить сірку, натрій тощо, а в продуктах згоряння палива містяться солі, що потрапляють з парами морської води. Тому лопатки морських газових турбін піддаються інтенсивній корозії, швидкість якої може бути в сотні разів більшою швидкості корозії на повітрі або в атмосфері кисню [1]. Цей вид корозії називають високотемпературною сольовою корозією (ВСК). ВСК пов'язують з конденсацією солей лужних металів, з яких найбільш агресивним є сульфат натрію. Жароміцні нікелеві сплави є складнолегованими. За призначенням легуючі елементи поділяються на декілька класів. Жаростійкість сплавів забезпечує хром, що утворює щільну термодинамічно стійку оксидну плівку, але при згорянні палива, що містить сірку і натрій, внаслідок взаємодії натрію з SO_2 і SO_3 , утворюється сіль Na_2SO_4 , який руйнує захисну оксидну плівку Cr_2O_3 . Хлор, що утворюється при взаємодії солі NaCl з оксидами сірки сприяє ВСК. Для забезпечення високої стійкості сплавів морських турбін проти ВСК необхідно збільшувати в сплавах концентрацію хрому, але при цьому знижується їх тривала високотемпературна міцність. Оскільки швидкість корозії сплавів авіаційних турбін, що працюють на чистому паливі, значно менша ніж морських, то це дозволяє знизити в них концентрацію хрому підвищити їх жароміцність, температуру газу і ефективність, використовуючи також однакові інші способи зміцнення (твердорозчинне та дисперсійне). В цьому велика різниця між жароміцними нікелевими сплавами (матеріалами) авіаційних і морських турбін. Не дивлячись на складні умови роботи морських газових турбін (ГТД) за вимогами конструкторської документації на сучасні енергетичні і судові ГТД необхідно забезпечити їх надійну роботу при температурі газу на вході в турбіну до 1150...1200 °С, що дозволить підвищити їх потужність та ефективність порівняно з ГТД розробленими раніше. Для цього уже створено нові системи легування сплавів [2, 3]. Оскільки паяння є основним способом їх з'єднання та виправлення поверхневих дефектів відливок, то актуальність розробки нових припоїв не викликає сумніву. Спільними особливостями сплавів авіаційних і морських ГТД є проблема їх зварювання плавленням і широке застосування паяння, зокрема способів дифузійного паяння, паяння композиційними припоями, а при можливості паяння з тиском, які в закордонній літературі більш відомі під назвою TLP-bonding (transliquidfaze).

Найбільш теплонавантаженими деталями з жароміцних нікелевих сплавів є спрямляючі і робочі лопатки авіаційних ГТД. Тому їх хімічний склад, технологія виготовлення, термічна обробка постійно удосконалюються [4]. Стратегічний напрямок розвитку матеріалів і технологій до 2030 р. описано в роботі [5], але як зазначалося вище, сплави авіаційних турбін не можна застосовувати для морських, оскільки авіаційні сплави в морських умовах

піддаються катастрофічній ВСК. Тому для деталей морських турбін розроблено сплави з високою стійкістю проти ВСК [2, 3]. При цьому було використано легування сплавів танталом і ренієм [2, 3, 6, 7], що застосовується в сплавах авіаційних турбін [4, 5]. Використання таких систем для розробки припоїв в літературі не відомо.

Дослідження паяння жароміцних нікелевих сплавів морських турбін орієнтовані на перспективні матеріали турбін нового покоління з підвищеними параметрами робочого тіла. В нових жароміцних нікелевих сплавах морських турбін традиційно використовують високу концентрацію хрому для забезпечення стійкості проти ВСК, а для підвищення жароміцності ідуть шляхом регулювання структури, оптимізації хімічного складу, легування танталом і ренієм тощо [2, 3, 6, 7]. Враховуючи результати детальних досліджень нових сплавів при розробці припоїв було вибрано той же легуючий комплекс.

При виборі депресантів враховували температури солідус і ліквідус сплавів, температури паяння, технологічні властивості припоїв та їх вплив на стійкість проти ВСК і механічні властивості з'єднань.

Відомо [8, 9], що припої, залежно від депресантів (елементів, що знижують температуру плавлення сплаву), поділяють на три групи:

1) припої на основі нікелю з кремнієм і бором, які зазвичай сумісно для зниження концентрації кожного з них;

2) припої на основі легованого нікелю з елементами IV і V груп, що вводяться як депресанти;

3) припої на основі нікелю з паладієм для зниження температури плавлення і паяння.

Припої третьої групи не використовували оскільки в літературі їх стійкість проти ВСК не досліджувалась, та враховуючи високу коштовність паладію. В досліджуваних припоях використовували депресанти з першої та другої груп [8].

Метою роботи є створення припоїв для паяння жароміцних нікелевих сплавів з використанням при виготовленні морських ГТД нового покоління з підвищенням температури газу на 40...60 °С.

На першому етапі роботи досліджували методом високотемпературного диференційного термічного аналізу (ВДТА) температури ліквідусу і солідусу основного металу СМ93 і М96. Враховуючи успішну роботу з цирконієм і гафнієм в попередніх дослідженнях [10, 11], в якості депресантів було вибрано цирконій, гафній і бор, який застосовується в припоях ВПр36, ВПр37 і ВПр44 [12–14]. За результатами ВДТА і дослідження взаємодії припоїв з основним металом в якості депресанту вибрано бор. Він дозволяє, змінюючи його концентрацію в припої, регулювати температуру плавлення і паяння. Результати ВДТА основного металу і припою, який містить 1 % мас. бору показано на рис. 1.

Виплавлені припої досліджували експериментально на змочування, заповнення зазорів і розчинення основного металу. Для порівняння в експериментах використовували також припій ВПр36. Для оцінки затікання припоїв в зазори використовували зразки з клиноподібним зазором, в яких зазор змінювався від нуля до 0,6 або до 0,3 мм. Такі зразки показано на рис. 2.

Слід відзначити, що основним фактором впливу на крайові кути змочування є температура. Вище 1220 °С для розробленого припою SBM-3 і 1240 °С для припою ВПр36 крайові кути різко зменшуються незалежно від способу підготовки поверхні (механічний чи хімічний спосіб). Обидва припої практично однаково змочують поверхні відливка і після її механічного очищення. При нагріванні відливка до температури вище 1200 °С протягом 6 хв. у вакуумі $6 \cdot 10^{-3}$ Па при натіканні $3 \cdot 10^{-5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ поверхня стає світлою. В таких умовах навіть після попереднього окиснення зразка його поверхня очищується.

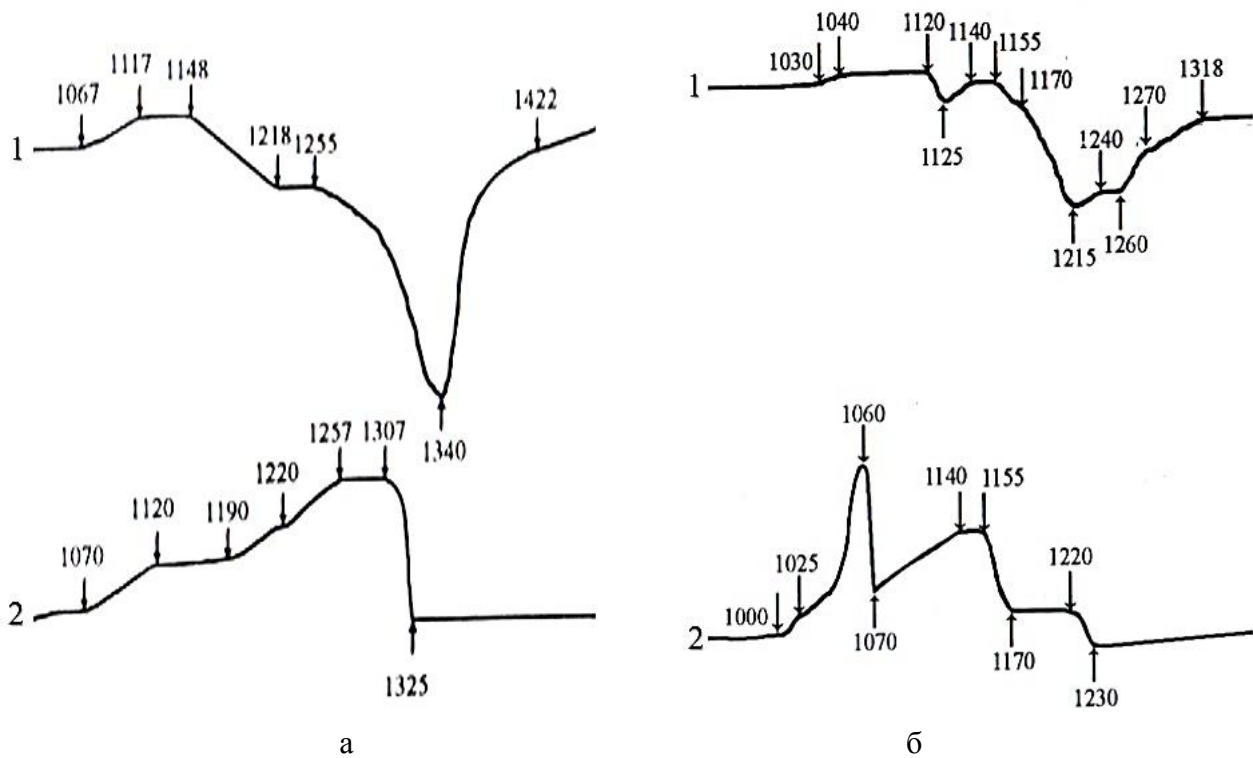


Рис. 1. Термограми сплаву МЗ (а) і припою, який містить 1,0 % мас. В (б):
1 – нагрівання; 2 – охолодження

Такі дослідження проводили при температурах 1200, 1220, 1230, 1240, 1250 і 1265 °С залежно від призначення припою. Вибирали температуру паяння, при якій крайові кути змочування не перевищували 10° і затікали в зазори від нуля до 0,2...0,3 мм.

Мікроструктуру спаяного з'єднання на основі інтерметаліду Ni_3Al показано на рис. 3.

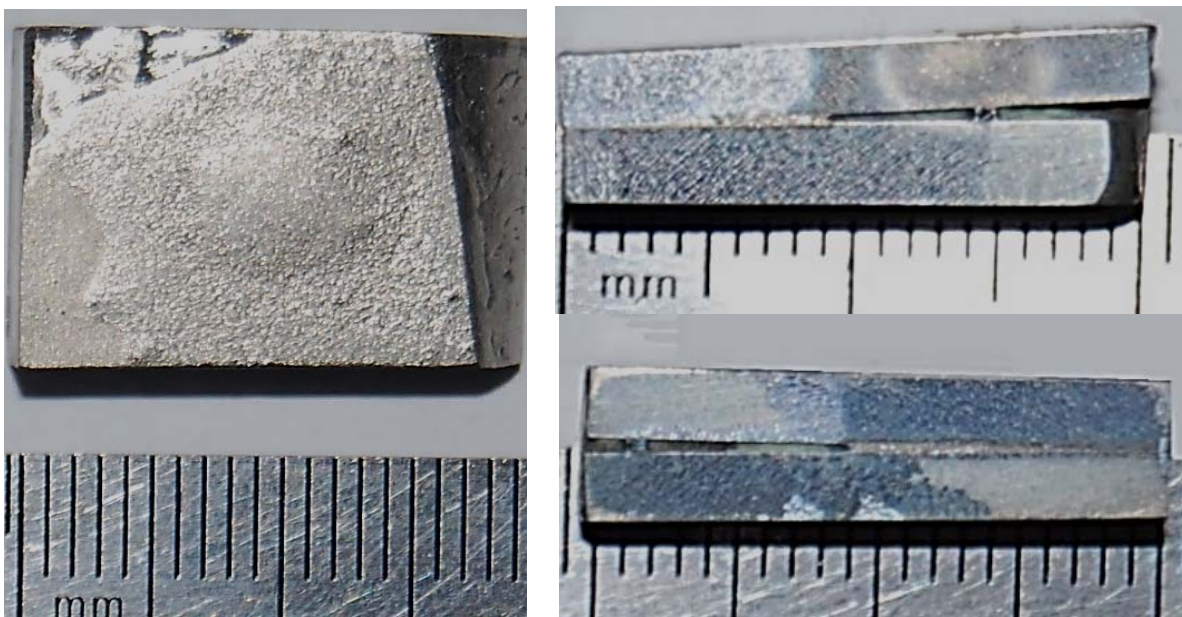


Рис. 2. Вигляд поверхні жароміцного сплаву на основі Ni_3Al після розтікання (а) і затікання припою в зазор (б)

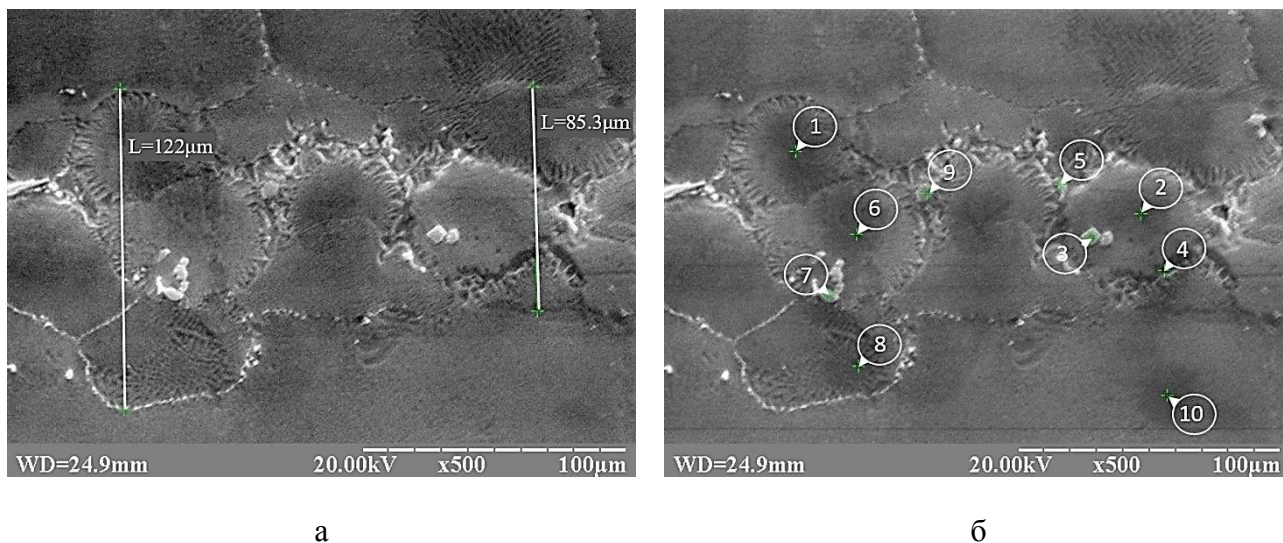


Рис. 3. Мікроструктура спаяного з'єднання з позначенням зміни ширини зони взаємодії припою з основним металом (а) та позначенням точок локального рентгеноспектрального мікроаналізу (б)

З рис. 3 видно, що зона взаємодії припою зі сплавом має ширину 85... 122 мкм, а метал шва має структуру основного металу, є однорідним, що підтвердили і результати локального рентгеноспектрального мікроаналізу.

Паралельно проводили дослідження стійкості припоїв проти ВСК тигельним методом та розрахунку стійкості сплавів проти сігматизації, критичних точок, складу і вмісту γ - і γ' -фаз, карбідів, боридів тощо.

Експериментальні дослідження стійкості проти ВСК проводилися одночасно для нових сплавів і припоїв у розплаві солей 75 % Na_2SO_4 + 25% NaCl . Тиглі з циліндричними зразками і солями завантажували в піч і витримували протягом певного часу при температурі 900 °С. Після випробувань зразки очищали від солі і окалини, визначали втрату їх маси, швидкість корозії ($\text{мг}/\text{см}^2\cdot\text{год}$) та глибину корозійного руйнування. Загальний вигляд зразків після випробувань показано на рис. 4.



Рис. 4. Загальний вигляд зразків після випробувань на стійкість проти ВСК

Обробка результатів випробувань показала, що швидкість ВСК при 900 °С знаходиться в межах 3,0...6,0 $\text{мг}/\text{см}^2\cdot\text{год}$, що задовольняє вимоги.

За результатами досліджень розроблено припій SBM-3 для паяння жароміцних сплавів морських турбін, в тому числі зі спрямованою кристалізацією та монокристалічних. Тривала міцність спаяних з'єднань припоєм SBM-3 при температурі 900 °С на базі 100 годин дорівнює 280 МПа, що складає 81,9 % від міцності основного металу. Такий показник не поступається світовому рівню.

ВІСНОВКИ

Жароміцні сплави морських газових турбін, на відміну від авіаційних, працюють в агресивному середовищі, яке призводить до високотемпературної корозії, визначає значну різницю в системі легування сплавів.

Для забезпечення стійкості сплавів проти ВСК сплави морських газових турбін мають високу концентрацію хрому, який знижує їх тривалу високотемпературну міцність. Для зниження концентрації хрому при високій стійкості ВСК і підвищення тривалої міцності сплави морських турбін легують танталом і кремнієм.

Дослідження показали, що аналогічний принцип легування є ефективним при розробці припоїв для паяння жароміцних сплавів морських турбін, що підтверджують результати дослідно-промислової перевірки припою SBM-3, розробленого в НУК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Симс Ч. Т. Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагель. – М.: Металлургия, 1995. Т. 1. – 384 с.
2. М'яльниця Г. П. Вибір легуючого комплексу нового корозійностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД / Г. П. М'яльниця, І. І. Максютя, Ю. Г. Квасницька, О. В. Михнян // *Металознавство та обробка металів*. – 2013. – № 2. – С. 29–34.
3. Обеспечение фазово-структурной стабильности высокохромистых жаропрочных сплавов для лопаток ГТУ / Г. Ф. Мьяльница, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Е. В. Михнян, А. В. Нейма // *Металл и литье Украины*. – 2012, № 11. – С. 16–20.
4. Каблов Е. Н. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, О. А. Базылева // *Вестник МГУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*, 2011. – с. 13-19.
5. Каблов Е. Н. Стратегическое направление развития материалов и технологий их переработка на период до 2030 года / Е. Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии* – 2012. – № 8. – С. 7–17.
6. Технологические особенности высокохромистого никелевого сплава, комплексно-легированного рением и танталом / И. И. Максютя, О. В. Клясс, Ю. Г. Квасницкая и др. // *Современная электрометаллургия*. – 2014. – № 1. – С. 41–48.
7. Получение ориентированной структуры в отливках их жаропрочного никелевого сплава, легированного рением / Г. Ф. Мьяльница, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Е. В. Михнян, А. В. Нейма // *Процессы литья*. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
8. Пання матеріалів / Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, С. В. Максимова, В. Ф. Хорунов, В. В. Чигарьов; за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2015. – 340 с.
9. Квасницький В. Ф. Влияние элементов-депрессантов на свойства никелевых припоев и жаропрочных сплавов / В. Ф. Квасницький, А. М. Костин, В. В. Квасницький // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. – 2002. – № 35. – С. 129–139.
10. Khorunov V. F. Investigation of Ni-Cr-Zr and Ni-Cr-Hf Alloys // V. F. Khorunov, V. G. Ivanchenko, V. V. Kvasnitski // *DVS-Berichte: Band 192*. – Dusseldorf: DVS-VERL., 1998. – P. 59–61.
11. Kvasnitski V. V. Die Untersuchung des Systems Ni-(Ni leg)-Hf-Zr für das Lotten Warmfester Nickellegierungen / V. V. Kvasnitski, V. L. Timchenko, V. F. Khorunov // *DVS-Berichte: Band 192*. – Dusseldorf: DVS-VERL., 1998. – P. 257 – 259.
12. Лукин В. И. Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС 36 / В. И. Лукин, В. С. Рыльников, А. Н. Афанасьев-Ходыкин // *Технология машиностроения*. – 2010. – № 5. – С. 21–25.
13. Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС 32 / В. И. Лукин, В. С. Рыльников, А. Н. Афанасьев-Ходыкин, Н. Г. Орехов // *Сварочное производство*. – 2012. – № 5. – С. 24–30.
14. Пайка в вакууме литого никелевого сплава ЖСБУ композиционными припоями на основе ВПр 36. Часть 1 / И. С. Малащенко, В. Е. Мазурак, Т. Н. Кушнарєва и др. // *Современная электрометаллургия*. – 2014. – № 4. – С. 49–58.

Стаття надійшла до редакції 11.01.2019 р.