**УДК 621.791.3**

# ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПАЯННІ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ГАЗОВИХ ТУРБІН

**Квасницкий В.Ф.[1], Мяльниця Г.Ф.[2], Квасницька Ю.Г.[3]**
1 - Національный технічний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна
2 - ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», м. Миколаїв, Україна
3 - Фізико-технологічний інститут сталі і сплавів, м. Київ, Україна

***Анотація:*** *Роботу присвячено паянню жароміцних нікелевих сплавів морських газових турбін нового покоління. Ці сплави суттєво відрізняються від авіаційних умовами експлуатації і необхідністю забезпечення стійкості проти високотемпературної сольової корозії (ВСК), швидкість якої може бути в сотні разів більшою швидкості корозії на повітрі або атмосфері кисню. Високу стійкість проти ВСК повинні мати також припої. Методом ВДТА досліджено критичні температури виплавлених припоїв, з яких відібрали сплави для дослідження процесів змочування, розтікання припою та заповнення зазорів. Паралельно проведено розрахунки стійкості сплавів проти сігматизації, критичних точок,, складу і вмісту γ і γ'-фаз, карбідів, боридів тощо. Дослідження ВСК проводили одночасно для нових сплавів і припоїв у розплаві солей 75 % $Na_2SO_4$ + 25% NaCl при температурі 900 ˚С. протягом 24 годин. Для забезпечення жаростійкості припоїв використовували хром і тантал. Проведені роботи показали задовільні результати, які дозволили визначити напрямки подальших досліджень.*

***Ключові слова:*** *жароміцні сплави, паяння, змочування, структура, високотемпературна корозія, технологічні властивості припоїв.*

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 газі, 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 $SO_3$, утворюються 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 хрома, 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 дозоляє 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. Спільними особливостями цих сплавів є проблема їх зварювання і широке застосування паяння, зокрема способів дифузійного паяння, паяння композиційними припоями, а при можливості паяння з тиском, але при розробці припоїв для морських турбін необхідно забезпечити стійкість проти ВСК, а також, як і для авіаційних, високі технологічні

властивості (змочування, розтікання, заповнення зазорів) та можливість підвищення робочих температур і міцності з'єднань до рівня основного металу.

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 [2–4]. Враховуючи результати детальних досліджень нових сплавів при розробці припоїв було вибрано той же легуючих комплекс. А при виборі депресантів враховували температури солідус і ліквідус сплавів, температури паяння, технологічні властивості припоїв та їх вплив на стійкість проти ВСК і механічні і властивості з'єднань.

Відомо [5], що припої, залежно від депресантів (елементів, що знижують температуру плавлення сплаву), поділяють на три групи:

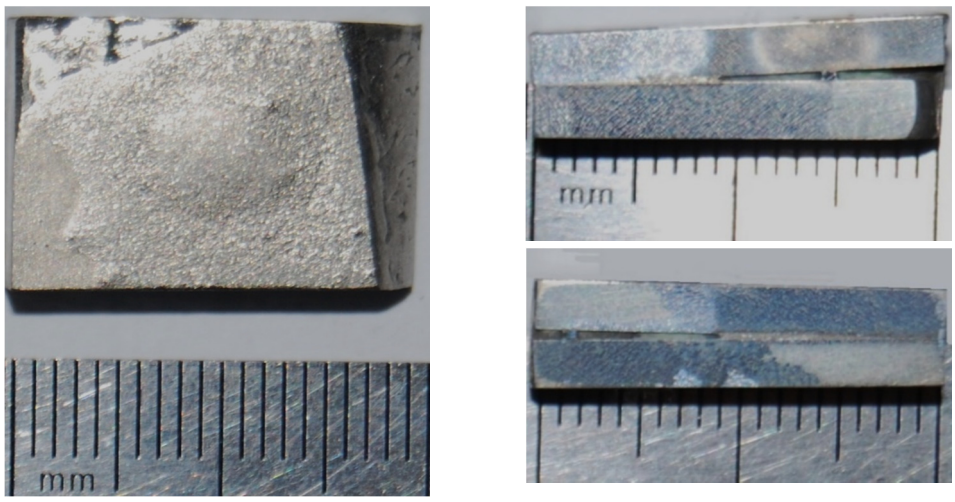
1) припої на основі нікелю з кремнієм і бором, які зазвичай сумісно для зниження концентрації кожного з них;

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 не досліджувалась, та враховуючи високу коштовність паладію. В досліджуваних припоях використовували депресанти з першої та другої груп [6].

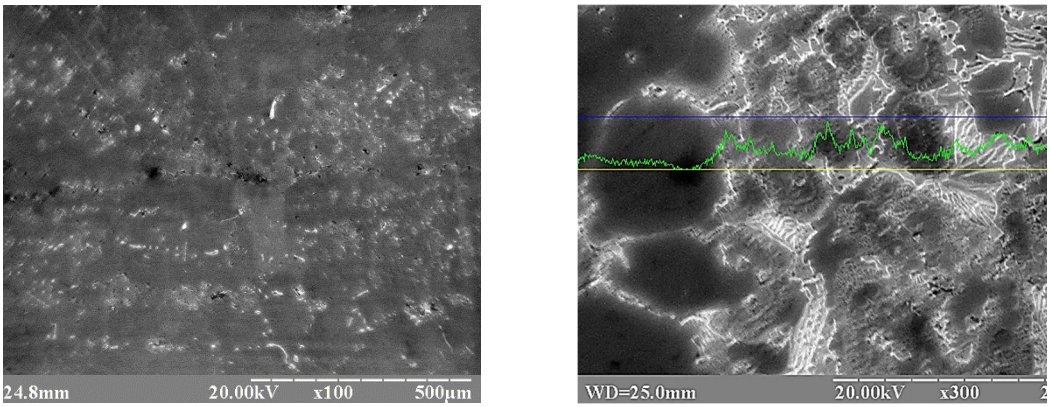
На першому етапі методом ВДТА дослуживали критичні температури виплавлених сплавів, з яких відібрали сплави для дослідження процесів змочування, розтікання припою та заповнення зазорів. Для цього використовували зразки клиноподібні зі зміною величини зазору від нуля до 0,6 мм, з постійним зазором 0,07 мм та пластинчасті (рис.1).




***а*** ***б***

**Рис.1. Розтікання припою по поверхні жароміцного нікелевого сплаву (*а*) та заповнення припоєм зазору (*б*)**

Як видно з рис.1, припій добре змочує поверхню сплава з крайовим кутом в декілька градусів і заповнює зазори. Мікроструктуру спаяного шва показано на рис.2.

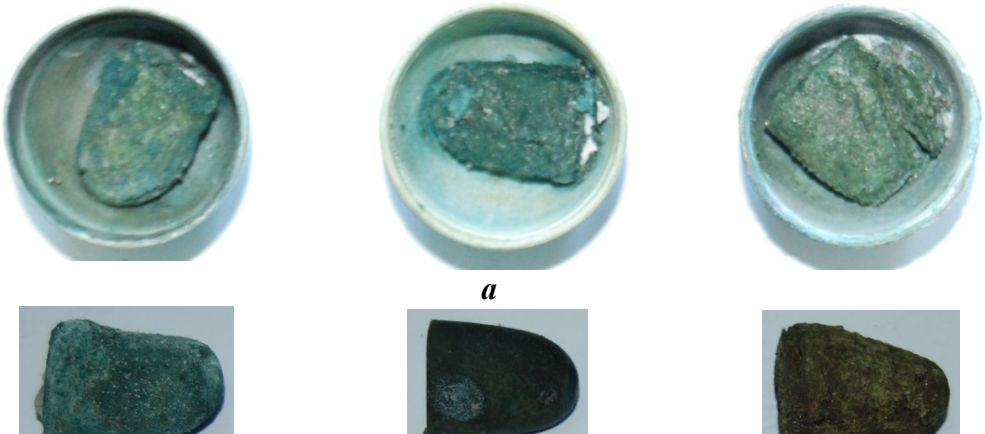



*а* *б*

**Рис.2. Мікроструктура спаяного з'єднання жароміцного нікелевого сплаву (без термічної обробки) при зазорах 0,02..0,03 мм (*а*) та 0,25 мм в зоні сплавлення з основним металом (*б*)**

Паралельно проводили дослідження стійкості припоїв проти ВСК тигельним методом та розрахунку стійкості сплавів проти сігматизації, критичних точок, складу і вмісту ɣ-і ɣ′ 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 (мг/см$^2$ ·год) та глибину корозійного руйнування. Загальний вигляд зразків після випробувань показано на рис. 3, а, після очищення – на рис.3, б.



*а*

*б*

**Рис.3. Загальний вигляд зразків припоїв після випробувань на стійкість проти ВСК протягом 24 год (а) та після очищення (б)**

Тривалість випробувань повинна бути більшою від інкубаційного періоду, який в розплаві 75 % $Na_2SO_4$+ 25% NaCl не перевищує 10 год. Швидкість корозії залежить головним чином від концентрації в сплаві хрому. Для забезпечення високої стійкості припоїв проти ВСК припої легували танталом, який не взаємодіє з сульфатом натрію і цим сприяє утворенню щільної оксидної плівки та зниженню швидкості ВСК [7]. Тантал також зміцнює твердий розчин на основі нікелю, приймає участь в утворенні дисперсної карбідної і ɣ'-фази, а також знижує температуру плавлення припою.

Виконані дослідження показали задовільні результати, які дозволили визначити перспективні напрямки подальших робіт.

**Список 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. Максюта, Ю.Г. Квасницька, О.В. Михнян // Металознавство та обробка металів. – 2013, № 2. – С. 29 – 34.
3. *Мяльница, Г.П. Обеспечение* фазово-структурной стабильности высокохромистых жаропрочных сплавов для лопаток ГТУ / Г.Ф. Мяльница, И.И. Максюта, Ю.Г. Квасницкая, Е.В. Михнян, А.В. Нейма // металл и литье Украины. – 2012, № 11.– С. 16 – 20.
4. *Мяльница, Г.Ф. Получение* ориентированной структуры в отливках их жаропрочного никелевого сплава, легированного рением / Г.Ф. Мяльница, И.И. Максюта, Ю.Г, Квасницкая, Е.В. Михнян, А.В. Нейма // Процессы литья.– 2012, № 6.– С. 54 – 63.
5. *Пання* матеріалів / Г.В. Єрмолаєв, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, С.В. Максимова, В.Ф. Хорунов, В.В, Чигарьов, за загальн. ред. В.Ф. Хорунова і В.Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2015.– 340 с.
6. *Квасницкий, В.Ф. Влияние* элементов-депрессантов на свойства никелевых припоев и жаропрочных сплавов / В.Ф. Квасницкий, А.М. Костин, В.В. Квасницкий // Адгезия расплавов и пайка материалов .– 2002, № 35. С. 129 – 139.
7. *Жаропрочность* литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Б.Е. Патон, Г.Б. Строганов, С.Т. Кишкин и др. – К.: Наукова думка. – 1987. – 256 с.