

ВІДГУК

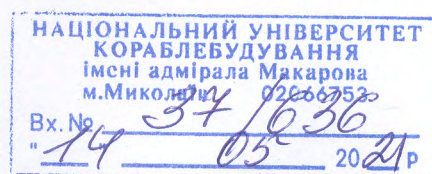
офіційного опонента доктора технічних наук, старшого наукового співробітника **Максимової Світлани Василівни** на дисертаційну роботу **Бутурлі Євгена Андрійовича** «Розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів лопаток суднових газових турбін нового покоління», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»

1. Актуальність обраної теми дисертації

Підвищення ефективності експлуатації газотурбінних двигунів потребує застосування нових жароміцних сплавів, які можуть забезпечити підвищення температури робочого тіла – газів на вході в турбіну. Особливу увагу привертають газотурбінні установки морського призначення, які експлуатуються в умовах морської води і туману, що сприяє активному протіканню високотемпературної сольової корозії, швидкість якої може бути в сотні разів більшою від швидкості корозії на повітрі або в атмосфері кисню.

Наразі розроблено нові жароміцні нікелеві сплави (ЖНС СМ93-ВІ і СМ96-ВІ) морського призначення, які дозволяють підвищити робочу температуру газу на 40...60 °С та стійкість до сольової корозії в умовах експлуатації. Розширення області їх застосування і отримання окремих паяних вузлів потребує розробки нових високотемпературних припоїв, які забезпечать паяним конструкціям необхідну жаростійкість і довготривалу високотемпературну міцність. Тому представлена робота є актуальною і спрямована на вирішення важливої задачі, а саме - створення високотемпературного припою і технології паяння ЖНС, що застосовуються при виробництві суднових газових турбін нового покоління з підвищеною робочою температурою газу і високотемпературною міцністю паяних з'єднань на рівні 80 % міцності основного металу.

Про актуальність даної роботи також свідчить її зв'язок з темами фундаментальних та прикладних досліджень, що виконані в НУК ім. адмірала Макарова в рамках Держбюджетної теми «Механіка та фізико-хімічні процеси при дифузійному зварюванні, паянні, зміцненні жароміцних нікелевих сплавів та різнорідних матеріалів» (2017-2019 рр.), договорів між НУК ім. адмірала Макарова і «Зовнішньоекономічним представництвом Китайсько-Українського інституту зварювання імені Є.О. Патона» «Дослідження взаємодії сплаву на основі Ni₃Al з матеріалами прошарків різних систем легування для TLP-дифузійного зварювання та впливу властивостей матеріалів на напружено-деформований стан (НДС) з'єднань жароміцного сплаву при дифузійному зварюванні з активацією поверхонь розплавом з використанням комп'ютерного моделювання» (2017-2018 рр.), між НУК і Державним Підприємством «Науковий-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект» договір на виконання



науково-дослідних робіт (2017-2020 рр.). При реалізації зазначених науково-технічних програм автор дисертації був співвиконавцем.

2. Наукова новизна отриманих результатів

В якості наукових результатів можна зазначити наступне:

- обґрунтовано двоетапний метод розробки припою. На першому етапі з використанням комп'ютерних програм забезпечується твердорозчинне і дисперсійне зміцнення базового припою та встановлюються межі легування тугоплавкими металами з метою запобігання утворенню ТЩУ фаз, зокрема σ -фази. На другому етапі експериментальним шляхом визначається необхідна концентрація депресантів;
- встановлено позитивний вплив Re і Ta на формування крайових кутів при змочуванні сплавів CM93-VI і CM96-VI припоями системи Ni-Cr-Co-Al-Ta-Re-W-Mo-Ti-Nb-V-Hf-Zr-C та площу їх розтікання;
- удосконалено систему легування припою, що забезпечує довготривалу міцність паяним з'єднанням сплавів CM93-VI і CM96-VI при 900 °C на рівні 0,9 від міцності основного металу;
- розвинуто уявлення про напружений стан паяних з'єднань з прошарком припою (з його відносною товщиною s/d від 0,0025...0,01), який відрізняється від основного металу за фізико-механічними властивостями, яке полягає в тому, що на більшій частині паяного 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.

3. Практична цінність роботи

За результатами досліджень, виконаних дисертантом, створено високотемпературний припій SBM-4 та розроблено технологію паяння і виправлення поверхневих дефектів лиття промислових відливок з жароміцних нікелевих сплавів CM93-VI і CM96-VI. Розроблений припій пройшов дослідно-промислово перевірку при виготовленні деталей ГТД на підприємстві НВКГ «Зоря»-«Машпроект», що підтверджується відповідними актами. Він може використовуватися також при паянні інших ЖНС завдяки прийнятним технологічним властивостям.

4. Обґрунтованість наукових положень у дисертації та їх достовірність

Ступінь обґрунтованості наукових положень, що сформульовані у дисертаційній роботі, висновків та практичних рекомендацій зроблено на високому рівні, задачі і мету поставлено чітко. Вірогідність наукових положень та практичних рекомендацій підтверджено сучасними

методиками та значним обсягом експериментальних даних, які автор використовував у своїх дослідженнях.

Висунуті в дисертаційній роботі основні наукові положення та результати досліджень пройшли апробацію на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Основний зміст дисертації та найважливіші висновки викладені у статтях, що опубліковані у фахових виданнях, які входять до переліку МОН України для публікації праць здобувачів наукового ступеня.

5. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, 6-ти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та 4 додатків. Загальний обсяг роботи - 188 сторінок, список використаних джерел складається із 123 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, формулювання мети і задач досліджень. Висвітлено наукову новизну та практичну значимість отриманих в роботі результатів досліджень, відображено особистий внесок автора, а також наведено відомості щодо апробації роботи.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел та розглянуті умови експлуатації авіаційних і суднових ГТД, показано вплив легуючих елементів на технологічні властивості жароміцних нікелевих сплавів. Висвітлено методи розробки припоїв та значення проміжного прошарку в паяному з'єднанні при розрахунках напружено-деформованого стану та роботоздатності паяних з'єднань.

У другому розділі описано методика досліджень, технологічні властивості жароміцних нікелевих сплавів та високотемпературних припоїв, технічні характеристики обладнання, що використовували в роботі.

У третьому розділі приведено розрахункові дослідження, що застосовано при виборі хімічного складу припою та експериментальні дані з визначення концентрації легуючих елементів-депресантів, які забезпечують прийнятний інтервал плавлення.

У четвертому розділі наведено результати досліджень технологічних властивостей розробленого припою SBM-4. Показано, що при температурі 900 °С на базі 100 год. довготривала міцність знаходиться на рівні 285 МПа, що складає 0,91 і 0,89 від міцності основного металу для сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ відповідно. Експериментально встановлено, що швидкість ВСК створеного припою SBM-4 відповідає технічним вимогам.

В п'ятому розділі методом скінченних елементів проведено моделювання напружено-деформованого стану (НДС) паяного з'єднання типу циліндр-циліндр з жароміцних сплавів у пружному стані і в умовах миттєвої пластичності. Автором показано, що в паяному вузлі із різними співвідношеннями модуля пружності, температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) і границь плинності жароміцного сплаву і прошарку (припою) в основному металі (на більшій частині стику) 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 паяного з'єднання наближається до рівня міцності основного металу при наближенні по всій довжині стику коефіцієнта жорсткості напруженого стану до одиниці (за умови хімічної і структурної однорідності металу паяного з'єднання).

У шостому розділі наведено узагальнені результати досліджень, надано розроблений технологічний процес паяння лопаток судових газових турбін зі сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. Показано мікроструктури відремонтованих дефектів лиття при застосуванні розробленого припою SBM-4.

У загальних висновках, що сформульовані в дисертаційній роботі, в повній мірі відображено результати проведених автором досліджень.

6. Апробація положень та результатів дисертації та повнота їх викладення в опублікованих роботах

Основні результати дисертації опубліковані в 10 наукових працях, що включають 7 статей у наукових фахових виданнях, з яких одне входить до науко-метричної бази Scopus, зроблено 3 доповіді на міжнародних науково-практичних конференціях. Отримано один патент України на корисну модель.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

1. При висвітленні результатів досліджень з розтікання припоїв (стор. 71) вказано, що зміна площі розтікання залежить від температури «паяння». Більш коректний вислів має бути «від температури нагріву».
2. На рис. 4.11 (стор. 108) фактично зображено зовнішній вигляд зразків при дослідженні ВСК, а не «Дослідження...».
3. На стор. 117 показано, що «в роботі над дисертацією використовували полікристалічні зразки із тривалою міцністю при 900 °С на базі 100 годин для металу з рівноважною і спрямованою структурами 20-30 МПа». При подальшому викладенні матеріалу наведено інші величини довготривалої міцності, що в 10 разів перевищують згадані.
4. В 5 розділі дисертації при дослідженні впливу різниці фізико-механічних властивостей основного металу і металу прошарку при термічному і термічно-силовому навантаженні в умовах миттєвої пластичності на напружено-деформований стан спаяного вузла, проведено моделювання

тільки при зниженні температури і не розкрито процеси, що відбуваються при підвищенні температури.

5. Окрім того, в тексті зустрічаються неточності, які краще було би замінити: -термін «закінчена робота» на «завершена робота» (стор. 26);
-«зміст алюмінію» на «вміст алюмінію» стор. 31;
-«працездатні сплави» на «роботоздатні» на стор. 52.

Загальний висновок

Наведені зауваження не стосуються кваліфікаційних ознак роботи і не знижують її загального наукового рівня.

Дисертаційна робота «Розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів лопаток суднових газових турбін нового покоління» відповідає вимогам з актуальності, об'єму, методичного рівня досліджень, ступеня обґрунтованості наукових положень і висновків, наукової новизни і практичної цінності, рівня отриманих результатів та висновків, повноти їх викладання у наукових працях, які зазначені в Наказі МОН України № 40 від 12 січня 2017 р. "Про затвердження вимог до оформлення дисертації", Постанові Кабінету Міністрів України № 261 від 23.03.2016 р. «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії», Постанові Кабінету Міністрів України № 167 від 06.03.2019 р. «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» з урахуванням змін, внесених Постановою Кабінету Міністрів України № 979 від 21.10.2020 р.

Автор, **Бутурля Євген Андрійович**, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 - «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент

завідувач відділу «Фізико-хімічні процеси паяння»

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України

д.т.н., с.н.с., заслужений діяч науки і техніки України

С.В. Максимова

Підпис завідувача відділу «Фізико-хімічні процеси паяння» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, д.т.н., с.н.с., заслуженого діяча науки і техніки України засвідчую:

Учений секретар

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,

к.т.н.



І.М. Клочков