

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора **Сизоненко Ольги Миколаївни** на дисертаційну роботу **Бутурля 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»

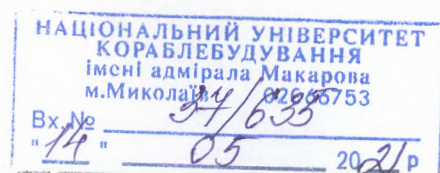
Актуальність теми дисертаційної роботи

Задача підвищення робочої температури і ефективності суднових газових турбін завжди була актуальною. На відміну від авіаційних, суднові турбіни працюють в умовах високотемпературної сольової корозії (ВСК), стійкість проти якої в жароміцних нікелевих сплавах (ЖНС) забезпечується високою концентрацією хрому (18-24 %), але хром знижує високотемпературну працездатність ЖНС. В авіаційних сплавах концентрація хрому знижується до 4 – 6 %, оскільки умови ВСК при їх експлуатації відсутні. Робочі температури авіаційних сплавів на 200 – 250 °С вищі від суднових. ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», спільно з Фізико-технологічним інститутом металів і сплавів НАН України (ФТІМС) розробили сплави СМ93-ВІ і СМ96-ВІ, які дозволяють підвищити робочу температуру на 40 – 60 °С, що вимагає розробки нових припоїв і технологій. Тому **актуальність** роботи не викликає сумнівів. Дисертаційна робота зв'язана з науковими програмами, планами і темами Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова: Держбюджетна тема 2083 (ДР0117U000343), контрактна 45/2108 (ДР0117U005048), в яких дисертант був виконавцем.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, достовірність отриманих результатів

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертації базуються на узгодженні наукових висновків автора з даними експериментів і результатами дослідно-промислової перевірки.

Наукові положення і висновки, сформульовані в дисертаційній роботі відзначаються новизною і обґрунтованістю. Їх достовірність не викликає сумнівів і підтверджується використанням планування експерименту, стандартних та сучасних методів досліджень фізико-механічних, корозійних



властивостей, ліцензійних методів моделювання і комп'ютерних програм та успішним впровадженням і дослідно-промисловою перевіркою на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» і ФТІМС НАН України – розробниками сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ для суднових газових турбін нового покоління.

Наукова новизна отриманих результатів.

Результати, наукові положення і розробки автора дисертації можна віднести до інноваційних, реалізація яких забезпечує підвищення ефективності і ресурсу суднових турбін та їх виробництва.

У процесі виконання досліджень відповідно до задач роботи сформульовано наукову новизну дисертації.

1. Вперше обґрунтовано двоетапний метод розробки припою, суть якого полягає в тому, що на першому етапі, з використанням комп'ютерних програм, розраховується основа припою з включенням найбільш ефективних легуючих елементів, які забезпечують твердорозчинне і дисперсійне зміцнення, та границі легування припою тугоплавкими металами для запобігання утворення ТЦУ 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 СМ93-ВІ і СМ96-ВІ 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 СМ93-ВІ і СМ96-ВІ при 900 °С на рівні 0,9 від міцності основного металу.

4. Дістало подальший розвиток уявлення про напружений стан спаяних з'єднаннях з прошарком припою з його відносною товщиною (s/d від 0,0025 до 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 отриманих результатів.

Запропонований і реалізований двоетапний метод розробки припою SBM-4 із використанням комп'ютерних програм є продуктивним для створення інших припоїв із забезпеченням довготривалої міцності спаяних з'єднань на рівні, близькому до рівня міцності основного металу. Розроблено новий припій SBM-4 (патент на корисну модель № 145690 В23К 35/24. Опубл. 28.12.2020. Бюл. № 24), який забезпечує довготривалу міцність при 900 °С на базі 100 год не менше 285 МПа, що складає 0,9 від міцності основного металу. Припій пройшов дослідно-промислово перевірку на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України – розробниках сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ та в ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР».

Повнота викладу основних результатів дисертацій у фахових виданнях.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 7 наукових праць, серед яких одна стаття в науковому фаховому виданні категорії «А», що входить до науково-метричної бази Scopus, 2 статті опубліковані у виданнях, які відносяться до фахових видань України категорії «Б», інші 4 статті опубліковані у виданнях, що відносяться до фахових видань України на момент публікації та отримано один патент України на корисну модель. Матеріали дисертації доповідались на Міжнародних конференціях «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2019» 24 травня 2019 р., м. Київ; 14-й Міжнародний симпозіум інженерів-механіків у Львові 23-24 травня 2019 р. і Всеукраїнській конференції з міжнародною участю 17-19 вересня 2019 р., м. Миколаїв.

Оцінка змісту дисертації, її завершення в цілому

Дисертаційна робота Є.А. Бутурля містить анотацію, перелік умовних позначень, вступ, шість розділів, загальні висновки, список використаних джерел з 123 найменувань і 4 додатки, які включають договір на виконання науково-дослідних робіт, акти впровадження і дослідно-промислової перевірки результатів дисертаційної роботи, патент на корисну модель припою SBM-4 та список публікацій здобувача за темою дисертації. Загальний обсяг роботи складає 203 с., обсяг основного тексту становить 152 с. і включає 62 рис. і 26 табл.

Дисертацію написано українською мовою з використанням загальноприйнятої науково-технічної термінології, побудовано логічно, матеріали розділів викладено відповідно до мети, поставлених задач, сутності об'єкту і предмету досліджень.

Дисертація оформлена відповідно до чинних вимог. В анотації стисло окреслено основні результати дослідження, зазначено наукову новизну та практичне значення роботи. Анотація написана українською та англійською мовами і відповідає результатам, положенням і висновкам, які викладено в тексті дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації та показано її зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Сформульовані мета та задачі роботи, окреслено об'єкт, предмет і методи досліджень, відображена наукова новизна, практична цінність, апробація та публікації отриманих результатів з зазначенням особистого внеску здобувача. Дисертація є завершеною роботою, має наукову новизну і практичну цінність.

У першому розділі виконано аналіз літератури, розглянуто особливості роботи суднових газових турбін. На відміну від авіаційних, судові турбіни працюють на паливі, яке містить до 2,2 % сірки. Джерелом шкідливих домішок є «важке» паливо і повітря, що подається для згоряння палива, в якому є пари морської води, що призводить до ВСК. Стійкість проти ВСК в ЖНС суднових турбін забезпечується високим вмістом хрому (18,0-22,0 %), але знижує високотемпературну працездатність сплавів. Авіаційні турбіни працюють на чистому паливі при відсутності умов для ВСК, що дозволяє знизити в ЖНС вміст хрому до 4,0 – 6,0 %. Робочі температури авіаційних сплавів на 200 – 250 °С вищі, ніж суднових турбін, тобто сплави суттєво різні. Спільним для ливарних сплавів авіаційних і суднових турбін є однакові проблеми зварювання плавленням. Тому для з'єднання цих сплавів використовують паяння, основною проблемою якого є забезпечення високотемпературної довготривалої міцності на рівні, близькому до рівня міцності основного металу. Аналіз літератури в розд. 1 показав, що на світовому рівні їх відношення досягає 0,8 в кращих випадках.

В огляді літератури наведено хімічний склад існуючих сплавів суднових турбін та розроблених спільно ФТІМС і ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ для турбін нового покоління.

Проведено також детальний аналіз способів паяння і сучасних припоїв, в яких для зниження температури плавлення використовуються бор, кремній, цирконій, гафній, паладій тощо. Найбільш широко в світі в якості депресанта використовують бор, в тому числі в припоях для нових сплавів на основі Ni_3Al . Припої для таких сплавів мають високі температури паяння (1250 – 1280 °C), які не припустимі для сплавів суднових турбін. Відзначається, що в жодній з декількох десятків робіт, що проаналізовані, не приділяється уваги методу розробки припоїв, недостатньо досліджено також роль проміжного прошарку в зоні стику спаяного з'єднання на його напружено-деформований стан (НДС) і працездатність.

Мета дисертації – розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів CM93-VI і CM96-VI для виробництва суднових турбін нового покоління з підвищенням високотемпературної міцності не нижче 80 % міцності основного металу.

На основі аналітичного аналізу літературних джерел сформульовано основні задачі роботи:

– запропонувати метод розробки припою з використанням комп'ютерних програм, що визначають розподіл легуючих елементів по фазам, стабільність структури та зміцнення ЖНС;

– вибрати раціональне легування основи припою і визначити ефективну концентрацію депресантів та температуру паяння з іншими важливими параметрами припою;

– дослідити поверхневі властивості припою та взаємодію зі сплавами CM93-VI і CM96-VI, визначити структуру, хімічний склад і властивості спаяних з'єднань;

– дослідити формування напружено-деформованого стану з'єднань з прошарком припою;

– розробити технологію паяння і виправлення поверхневих дефектів лиття для сплавів CM93-VI і CM96-VI.

У другому розділі описано досліджувані матеріали, обладнання і апаратуру, експериментальні методи дослідження мікроструктури і хімічного складу, методи фізико-механічних і корозійних випробувань припою і спаяних з'єднань.

Для паяння зразків використовували вакуумну піч СНВЭ 1.3.1-16И1, вакуумну установку УДСВ-ДТ (установку для дифузійного зварювання у вакуумі деталей турбін), Надвисоковакуумний універсальний технологічний комплекс ВВУ-1Д, що має статус Національного надбання України (Постанова КМ України № 665 р. від 27.12.2006 р.). Для виплавлення припою промислового призначення (15 кг) використовували вакуумний індукційний модуль VIM-125, СЭВ-11,5, термічної обробки – вакуумну піч «Schmett» (НВКГ «Зоря»-«Машпроект»)

Для досліджень структури використовували мікроскоп Неофот-21, растровий електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЭММА-102-02. Диференціальний термічний аналіз виконували на ВДТА-8М, швидкість ВСК визначали тигельним методом, механічні випробування проводили відповідно ГОСТ 10145-81 на установках МП-1200 і АИМА-5.

Планування досліджень проводили з використанням поліномів другого порядку за методом Бокса і Вілсона. Для перевірки значущості коефіцієнтів використовували критерій Стюдента, адекватність математичної моделі – за критерієм Фішера.

Для моделювання напружено-деформованого стану спаяних з'єднань з проміжним прошарком використовували метод скінчених елементів з програмним комплексом «ANSYS» (скінчений елемент Plane 183 з градієнтною розбивкою).

У третьому розділі висвітлюється розробка припою для паяння сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. Спочатку була спроба знизити температуру плавлення припою SBM-3, розробленого в НУК для паяння ЖНС на основі інтерметаліду Ni_3Al , який показав довготривалу міцність, близьку до міцності основного металу, але введення кремнію не дало позитивних результатів. Тому розроблено новий припій для суднових турбін під назвою SBM-4. Це багатоконпонентний припій, який призначено для паяння ЖНС СМ93-ВІ, СМ96-ВІ та виправлення ливарних поверхневих дефектів.

Розробка припою поділяється на два етапи: на першому визначається оптимальний склад основи припою, на другому – концентрації депресантів. На першому етапі за програмою PHASOMP, яка використовується при розробці ЖНС, визначено розподіл легуючих елементів між γ - і γ' -фазами, а також вміст тугоплавких металів і кількість електронних вакансій, що визначають

можливість утворення цими металами топологічно щільноупакованих фаз, зокрема σ -фази, і схильність сплавів до окрихчування. Найбільшу кількість електронних вакансій в сплаві вносять вольфрам і молібден ($4,66 \cdot N_W + 4,66 \cdot N_{Mo}$). Реній має коефіцієнт 3,66. Для попередження окрихчування в основі припою концентрацію вольфраму знижено до безпечного рівня. Частина концентрації W замінено ренієм, який сьогодні широко застосовується разом з танталом. Сплави CM93-VI і CM96-VI також леговані Re і Ta. Ефективність зміцнення твердого розчину ренієм значно вища, ніж вольфрамом, а тантал забезпечує дисперсійне зміцнення та сприяє підвищенню стійкості проти ВСК.

Досліджено також структуру, хімічний склад сплавів CM93-VI і CM96-VI, розподіл елементів по фазам, проведено диференціальний термічний аналіз, розрахунки кількості електронних вакансій, температури ліквідуса і солідуса, параметрів кристалічної ґратки γ і γ' – фаз, різниці між ними (mis-fit), що визначає можливість підвищення високотемпературної довготривалої міцності. Результати наведено в таблицях і на рисунках.

До хімічного складу сплавів CM93-VI і CM96-VI входять однакові елементи, але з різними концентраціями деяких з них, наприклад, концентрації ренію і вольфраму вищі в сплаві CM96-VI, титану і вуглецю в сплаві CM93-VI, концентрації інших елементів близькі. Основа припою SBM-4 вибрана близькою до сплаву CM93-VI, що містить менше W, але з підвищеними концентраціями ренію, для заміни вольфраму і хрому (для забезпечення стійкості проти окрихчування і проти ВСК відповідно). Оскільки припій призначено як для паяння, так і для виправлення дефектів лиття в нього ввели цирконій, який має надзвичайно високу проникність в мікрозазори і мікротріщини, а для покращення ливарних властивостей додатково було введено гафній. 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 вибрано бор, враховуючи його широке застосування в більшості розроблених припоїв з високими технологічними властивостями і добре дослідженого. Перший варіант припою SBM-4 виплавлено з концентрацією бору 0,75 % мас. Установлено, що для покращення розтікання припою необхідно підвищити концентрацію бору. Для зменшення кількості плавки і кращого засвоєння бору використовували сплав, який позначили 4Д з хімічним складом 14,0Cr-9,5Co-2,5Al-2,4B. Його додавали до першої плавки

припою SBM-4 в кількості 10, 20, 30 %, що дозволило змінювати концентрацію бору від 0,915 до 1,245 %.

Для визначення технологічних властивостей припою досліджені процеси розтікання припою при різних температурах залежно від кількості добавки сплаву 4Д. Для планування експерименту розтікання припою використано ортогональний план другого порядку. Статистична обробка експериментальних даних дозволила створити адекватну математичну модель, що визначає площу розтікання припою SBM-4 залежно від температури і кількості бору. Експериментальні і розрахункові дані дуже близькі.

У четвертому розділі досліджено термограми припою SBM-4 з різною концентрацією бору і визначено оптимальний вміст бору від 1,0 до 1,2 % мас. З цією концентрацією на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» виплавлено 15 кг промислового припою. Припій SBM-4 містить (% 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)V; (0,2-0,3)Hf; (0,45-0,7)Zr; (0,07-0,10)C; Ni – решта. Припій захищено патентом на корисну модель. Досліджено структуру, концентрації хімічних елементів, процеси змочування і розтікання припою по ЖНС. Результати свідчать про високі технологічні властивості припою. Визначено поверхневу енергію припою.

При дослідженні стійкості припою проти ВСК дисертант провів термодинамічні розрахунки, які підтверджують гіпотезу механізму впливу танталу на стійкість припою проти ВСК.

Виплавлений припій промислового призначення використали для дослідження хімічного складу, структури і довготривалої міцності спаяних з'єднань.

Наведено мікроструктури, спектри і хімічний склад та механічні властивості спаяних з'єднань. Установлено, що після паяння і термічної обробки боридна евтектика в з'єднанні відсутня, метал в зоні стику має хімічний склад і структуру близькі до складу і структури основного металу. Границя міцності спаяних з'єднань при 900 °C і товщині прошарку 0,08 мм складають 91 % і 89 % від основного металу для сплавів CM93-VI і CM96-VI, що перевищує світовий рівень. Швидкість ВСК припою SBM-4 в розчині солей 25 % NaCl + 75 % Na₂SO₄ при температурі 900 °C складає 0,4-1,32 мг/см²·год, що відповідає технічним вимогам.

В п'ятому розділі досліджено напружено-деформований стан (НДС) спаяних з'єднань у вузлі циліндр-циліндр (Ц-Ц) в пружному стані і з урахуванням миттєвої пластичності. Визначено вплив характеру навантаження, товщини прошарку, його фізико-механічних властивостей і властивостей основного металу на НДС з'єднань.

Установлено, що при паянні вузлів Ц-Ц тільки в невеликій зоні біля зовнішньої поверхні і в прошарку формується об'ємний НДС, для оцінки впливу якого на міцність і пластичність матеріалів вузла використано коефіцієнт жорсткості напруженого стану $\kappa_{\text{ж}} = \frac{\sigma_{1(3)}}{\sigma_{\text{екв}}}$, де $\sigma_{1(3)}$ – максимальні головні напруження, $\sigma_{\text{екв}}$ – еквівалентні напруження.

При $\kappa_{\text{ж}} < 1,0$ виникає ефект знеміцнення (зниження рівня границі плинності і підвищення пластичності) матеріалу в порівнянні з лінійним напруженим станом ($\kappa_{\text{ж}} = 1,0$), в умовах якого проводять стандартні механічні випробування матеріалів. При $\kappa_{\text{ж}} > 1,0$ виникає ефект зміцнення, тобто підвищення границі плинності і зниження пластичності матеріалу.

Показано, що при стисненні вузла проявляється ефект зміцнення металу прошарку і знеміцнення основного металу при «м'якому» прошарку (з меншим модулем пружності, ніж основного металу). При «жорсткому» прошарку в основному металі $\kappa_{\text{ж}} > 1,0$, в прошарку $\kappa_{\text{ж}} < 1,0$. При розтягуванні вузла картина протилежна. Зміна товщини прошарку при його відносній товщині $s/d = 0,025-0,01$ ($s = 50-200$ мкм) не впливає на значення $\kappa_{\text{ж}}$.

Встановлено, що при охолодженні вузла з різними ТКЛР, модулями пружності і границями плинності (в межах ± 15 %) основного металу і прошарку в основному металі на більшій довжині (88 %) стику $\kappa_{\text{ж}} < 1,0$ і лише біля зовнішньої поверхні $\kappa_{\text{ж}} > 1,0$. В прошарку на 80 % довжини стику спостерігається лінійний напружений стан ($\kappa_{\text{ж}} = 1,0$), при наближенні до зовнішньої поверхні метал спочатку зміцнюється, а далі знеміцнюється. При охолодженні під тиском і меншому ТКЛР прошарку порівняно з основним металом в прошарку $\kappa_{\text{ж}} > 1,0$, в основному металі $\kappa_{\text{ж}} < 1,0$. При більшому ТКЛР прошарку картина протилежна.

Установлено, що для досягнення рівня міцності спаяного з'єднання, близького до рівня основного металу, необхідно забезпечити при паянні на всій довжині стику коефіцієнт жорсткості напруженого стану на рівні одиниці. Це можливо лише при забезпеченні хімічної і структурної однорідності металу в зоні

стику за рахунок процесів ізотермічної кристалізації припою і дифузії при паянні і термічній обробці.

У шостому розділі описано технології виготовлення порошку припою SBM-4, паяння соплових лопаток судових турбін в пакети і виправлення поверхневих дефектів відливок методом паяння припоєм SBM-4. Технологія паяння лопаток включає операції підготовки з'єднаних поверхонь, технологічних матеріалів, складання, паяння, яке проводиться в печі, що пройшла контроль температурного перепаду в робочому просторі. Температура паяння складає (1220-1230) °С зі сплаву SM96-BI з монокристалічною або спрямованою структурою або (1200-1215) °С для лопаток із SM93-BI з полікристалічною структурою протягом 15 ± 5 хв. у вакуумі не гірше 10^{-2} Па. Після цього лопатка охолоджується до температури 1070 °С, витримується при температурі 60 хв., далі охолоджується до 200 °С у вакуумі, а далі на повітрі. Потім проводиться механічна обробка і контроль якості відповідно до Технологічної Інструкції (ТІ).

За аналогічними операціями виправляються дефекти відливок. Попередньо всі лопатки проходять ступінчатий цикл термічної обробки, включаючи гомогенізацію при температурі 1180 °С.

В цьому розділі наведено деякі положення ТІ НВКГ «Зоря»-«Машпроект», що поділяють дефекти на підлягаючі виправленню і виправлення яких не допускається, наприклад на вхідних і вихідних кромках лопаток.

Залежно від розміру дефекта його виправлення проводиться припоєм SBM-4 без наповнювача або з наповнювачем, наприклад, дефекти типу «раковин» розробляються до видалення, а поверхня очищається від оксидів на відстані не менше 5 мм та знежирюється спиртом або ацетоном. В якості наповнювача використовується порошок SM88Y-BI, який виготовляється «Укрспецсталлю» для підприємств України, або припій SBM-3, розроблений в НУК ім. адмірала Макарова і НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Наповнювач і припій SBM-4 змішуються у відношенні 1:1. Порошкова суміш закріплюється на поверхні лопатки 5 %-им розчином смоли БМК-5 в ацетоні. Кількість порошку повинна бути більшою від об'єму розробленого дефекту на (40-50) %. Виправлення дефектів проводиться за тими ж параметрами, що і паяння і в тих же печах, які наведені в розд. 2 (НВКГ «Зоря»-«Машпроект»). В шостому розділі

наведено макро- і мікроструктуру виправлених дефектів лопаток, які свідчать про успішну реалізацію розробленої технології.

Висновки дисертації відображають основні наукові та практичні результати роботи, які отримано дисертантом відповідно до поставлених задач, що свідчить про досягнення мети дисертації, яка є завершеною роботою і має суттєве наукове і практичне значення.

В додатках наведено список публікацій, в яких відображено основні наукові результати дисертації, договір з ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» на спільне виконання науково-дослідних робіт, акти впровадження результатів дисертаційної роботи на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», НВЦ «Плазер» та акт дослідно-промислової перевірки результатів дисертації від Фізико-технологічного інституту металів і сплавів НАН України, а також від НУК про використання при викладанні дисципліни «Паяння матеріалів» студентам кораблебудівного інституту.

Зауваження по дисертації

1. На мій погляд назва роботи не є вдалою, тим паче вона повністю співпадає з метою. Для цієї роботи більш підходить, наприклад «Технологічні засади створення припою и т.д.».

2. При формулюванні наукової новизни в п.4 написано: «...зовнішньої поверхні з'єднання та в самому прошарку утворюється об'ємний напружено-деформований стан, який призводить до зміцнення або знеміцнення основного металу та прошарку». Було б більш конкретно, якщо речення продовжити: «залежно від їх фізико-механічних властивостей і характеру навантаження» відповідно до тексту в розд. 5.

3. В розд. 1 дисертант детально аналізує стан розробки припоїв і способів паяння, в тому числі наводить термін «...ТLP-з'єднання...», але не пояснює його.

4. В розд. 2 дисертант, розглядаючи планування експерименту, не вказує прийняту кількість точок-дослідів.

5. В розд. 3, досліджуючи вплив депресанта припою на температуру паяння та площу розтікання (рис. 3.12), витримуючи при температурі паяння 10 хв., але надалі без пояснення рекомендована витримка складає 15 ± 5 хв.

6. В розд. 4 автор досліджує і наводить ряд термограм з різним вмістом бору, в тому числі і припою SBM-4. Було б доцільно більше уваги приділити термограмі припою (рис 4.2) і критичним точкам температури.

7. В розд. 4 дисертант не пояснює яким чином вибирали концентрацію в припої цирконію.

8. В розд. 4, на рис.4.14 наведена мікроструктура спаяних з'єднань сплаву СМ93-ВІ припоєм SBM-4 при складанні без зазору і тиску, при різних зазорах і основного металу, але нема пояснень у тексті.

9. У висновку 3 розд. 4 написано «...Припій SBM-4 показав високі технологічні властивості, а також високу проникність в мікротріщини і мікрозазори...», але це не наведено у мікроструктурах розділу 4.

10. В розд. 5 дисертант при дослідженні НДС з'єднань враховує миттєву пластичність, але не пояснює умов пластичної деформації.

11. В розд. 6 доцільно було пояснити вибір часу витримки при температурі паяння та відзначити наскільки технологія виправлення дефектів підвищує вихід придатних лопаток.

12. В дисертації є декілька друкарських помилок, наприклад на сторінках: 2 «У...» замість «Біля»; 28 «... суднових...» замість «... морських...»; 116 «... 20-30 МПа.» замість «... 285 МПа», а на деяких рисунках рис. 3.6, 3.7, 3.9, 4.16 нечітко позначено ділянки мікроаналізу.

Загальні висновки про відповідність дисертації вимогам «Порядку проведення експерименту з присудження наукового ступеня доктора філософії»

Вважаю, що дисертаційна робота **Бутурля Євгена Андрійовича** «Розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів лопаток суднових газових турбін нового покоління» за актуальністю, об'ємом та методичним рівнем досліджень, ступенем обґрунтованості наукових положень і висновків, науковою новизною і практичною цінністю, рівнем отриманих результатів та висновків, повнотою їх викладання у наукових працях відповідає вимогам МОН України до кваліфікаційних наукових праць, а саме:

- Наказу 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** заслугоує присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 - Механічна інженерія та за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент,
головний науковий співробітник,
в.о. завідувача відділу імпульсної
обробки дисперсних систем Інституту
імпульсних процесів і технологій
НАН України, доктор технічних наук,
професор



О.М. Сизоненко

Підпис доктора техн. наук,
проф. Сизоненко О.М. засвідчую.
Вчений секретар, кандидат технічних наук



А. В. Сінчук