

### ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Українця Максима Сергійовича** на тему :  
**«Особливості структуроутворення та експлуатаційні властивості композитів систем  
NiAl-MeB<sub>2</sub> для високотемпературних зносостійких покриттів»**,  
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство»

#### Актуальність обраної теми дисертації

Дисертаційна робота Українця М. С., що подана до захисту, спрямована на вирішення важливого науково-технічного завдання – встановлення закономірностей структуроутворення нових композиційних покриттів на основі інтерметаліду NiAl, армованого диборидами металів, та їх вплив на функціональні властивості деталей в газотурбінних двигунах, які працюють за температур до 800 °С.

Дисертаційна робота Українця М. С. пов'язана з виконанням науково-технічних робіт у межах програми Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України в рамках програм «Розробка фізико-хімічних принципів створення композиційних матеріалів систем (Ni,Fe)Al-Me(IV)-B<sub>2</sub> та покриттів із них з підвищеною корозійною стійкістю та зносостійкістю» (шифр теми – III-33-12, реєстраційний номер – 0113U000314) та «Розробка технологічних принципів отримання нових зносо- й корозійностійких газотермічних та електроіскрових покриттів системи NiAl-CrB<sub>2</sub> і дослідження їх поведінки в умовах високих (до T=1000 °С) температур» (шифр теми – III-20-16).

Науково-дослідні роботи, що виконувались у межах вказаних наукових тем, є свідченням затребуваності науково-дослідних робіт з даного напрямку, і, відповідно, вказують на актуальність дисертаційного дослідження.

В процесі експлуатації поверхні деталей машин та механізмів піддаються інтенсивному зношуванню. Відновлювати пошкоджені ділянки чи підвищувати зносостійкість нових деталей доцільно методами інженерії поверхні, а саме нанесенням захисних покриттів з високим рівнем експлуатаційних характеристик.

Серед матеріалів, які можуть бути використані для нанесення таких покриттів, найбільш перспективними є композиційні порошкові матеріали (КПМ) на базі широко розповсюджених в промисловості інтерметалідів з домішками тугоплавких сполук.

Для захисту поверхонь торцевих ущільнень та торців лопаток використовуються як промислові матеріали, так і розробки науковців, де в якості зміцнюючої фази в таких композитах використовуються переважно оксиди. Проте, оксиди є неоптимальною зміцнюючою фазою для зміцнення NiAl внаслідок їх низької змочуваності і ряду інших недоліків. У той же час перспективними сполуками для зміцнення алюмініду нікелю є тугоплавкі дибориди цирконію, титану та хрому, які мають високі фізико-механічні та експлуатаційні характеристики.

Наведені обставини стали підґрунтям для формування дисертантом Українцем М. С. обґрунтованого науково-технічного завдання, що полягало у встановленні закономірностей структуроутворення нових композиційних покриттів на основі інтерметаліду NiAl, армованого диборидами металів, та їх вплив на експлуатаційні властивості композитів систем NiAl-MeB<sub>2</sub> для високотемпературних зносостійких покриттів. Вирішення сформульованого дисертантом Українцем М. С. науково-технічного завдання відкрило шляхи одержання високоефективних композиційних покриттів з високими функціональними властивостями.

Наведені факти характеризують тему рецензованої дисертації як *актуальну*, та підтверджують її відповідність вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

## Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Обґрунтованість наукових положень дисертаційного дослідження Українця М. С., переконливість висновків та рекомендацій, виконаних за результатами роботи, обумовлені використанням для їх одержання великої кількості різнопланових методів досліджень та сучасного експериментального обладнання. Серед них використовувались методи визначення триботехнічних характеристик, методи рентгенофазового, металографічного, мікродюрOMETричного, електронномікроскопічного аналізів.

Достовірність одержаних у дисертаційній роботі результатів, положень, висновків і рекомендацій підтверджено співпадінням результатів експериментів, отриманих різними експериментальними методами, застосуванням сучасного високоточного експериментального обладнання, а також апробацією результатів досліджень в умовах виробництва, про що свідчить затверджена технічна документація, яку наведено у «Додатках» до дисертації.

Обґрунтовані положення і висновки рецензованої роботи не вступають у протиріччя з фундаментальними основами матеріалознавства, металознавства та термічної обробки металів і порошкової металургії.

Вирішення поставленого науково-технічного завдання дозволило автору одержати низку нових результатів, що являють собою наукову новизну дисертації. Вважаю за необхідне наголосити на найважливіших положеннях:

- Автором сформульовано новий підхід до створення високотемпературних зносостійких КПМ на основі NiAl, який полягає у необхідності його армування дисперсними тугоплавкими сполуками з метою зниження пластичності інтерметаліду за температур  $T \geq 500$  °С, запобігання руйнації захисного оксидного шару, сформованого на поверхні NiAl при терті і, як наслідок, підвищення зносостійкості отриманого композиту;

- У роботі вперше досліджено особливості змочування та фізико-хімічної взаємодії в системах «NiAl-ZrB<sub>2</sub>», «NiAl-TiB<sub>2</sub>» і «NiAl-CrB<sub>2</sub>» і встановлено, що найбільш перспективним в якості зміцнюючої домішки для створення КПМ на базі NiAl є CrB<sub>2</sub>, який змочується інтерметалідом з формуванням контактних кутів близько 0°, а в результаті взаємодії в системі «NiAl-CrB<sub>2</sub>» на поверхні боридних зерен утворюється нова проміжна фаза системи Ni-Cr-B, яка підвищує міцність зв'язку між алюмінідом нікелю і диборидом хрому.

- Показано, що введення домішок дибориду хрому до алюмініду нікелю в кількості 15÷45 мас.% призводить до значного підвищення (>3 разів) межі текучості та напруження руйнування отриманих композиційних порошкових матеріалів системи «NiAl-CrB<sub>2</sub>» порівняно з вихідним інтерметалідом при температурах 20÷800 °С, що можна пояснити утворенням фрагментів зв'язного каркасу із частинок тугоплавких сполук в об'ємі інтерметаліду.

- Встановлено, що дисперсне армування NiAl частинками CrB<sub>2</sub> змінює механізм зношування покриттів системи «NiAl-CrB<sub>2</sub>» в умовах високотемпературного тертя із абразивно-адгезійного для вихідного інтерметаліду на окиснювальний для композиційного покриття за  $T=500\div 800$  °С та забезпечує підвищення зносостійкості покриттів із отриманих КПМ в 2-3 рази, порівняно з вихідним інтерметалідом.

Вищенаведене позитивно характеризує наукові напрацювання дисертанта, що дозволило автору рекомендувати використання покриттів з матеріалу НАБХ-15 у вузлах тертя, працюючих за високих температур ( $T=500\div 800$  °С).

### Значимість результатів дисертаційної роботи для науки і практики

Наукова та практична значимість дисертації Українця М. С. полягає в тому, що автор науково обґрунтував, визначив і практично підтвердив склад КПМ на базі NiAl, армованих домішками CrB<sub>2</sub>, і режими отримання плазмових та ЕІЛ покриттів із високими адгезією до підкладки та триботехнічними характеристиками; сформулював науковий підхід при створенні високотемпературних зносостійких КПМ на базі NiAl з домішками тугоплавких сполук і запропоновано рекомендації щодо використання покриттів з матеріалу НАБХ-15 у вузлах тертя, працюючих за високих температур ( $T=500\div 800$  °С).

Стендові випробування в ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна, торці яких були зміцнені покриттям НАБХ-15, показали, що їх зносостійкість за  $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$  в 1,5-1,8 разів вища, порівняно з лопатками, типовими для даної конструкції.

Окрім цього передбачається, що розроблені композиційні матеріали системи «NiAl-CrV<sub>2</sub>» в подальшому будуть апробовані в якості детонаційних та HVOF покриттів в діапазоні температур  $20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Також планується проведення спільно з Талліннським технологічним університетом (Естонія) циклу випробувань по встановленню корозійної стійкості розроблених композиційних матеріалів та покриттів в умовах високих температур на повітрі та в агресивних середовищах. Для отриманих газо-термічних та електроіскрових покриттів буде проведено випробування в умовах інтенсивного високотемпературного газо-абразивного зносу та зроблено рекомендації по впровадженню їх до промислового виробництва.

Вищевказане свідчить про високу практичну значимість виконаного Українцем М. С. дисертаційного дослідження.

Зазначу, що різнобічні дослідження, наукові та практичні результати дисертації є системними, коректними та обґрунтованими щодо накопиченого фактажу, який автор отримав, застосовуючи сучасні методи досліджень та обладнання і підтвердив його практичною реалізацією в умовах промислового виробництва.

### **Повнота викладу основних результатів дисертації**

Основні результати рецензованої дисертаційної роботи Українця М. С. опубліковано у 10 наукових працях, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях (3 у закордонних виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 1 у вітчизняному виданні, яке входить до наукометричної бази даних Scopus та переліку наукових фахових видань МОН України, 2 у вітчизняних виданнях, які входять до переліку наукових фахових видань МОН України), 4 публікації за матеріалами доповідей на науково-технічних конференціях.

Загалом вимоги стосовно повноти публікацій та апробації результатів дисертації Українця М. С. виконано у повному обсязі.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертація Українця М. С. складається зі вступу, п'яти розділів, узагальнень, висновків, списку використаних джерел із 173 найменувань і 3 додатків. Робота викладена на 6 авторських аркушах і містить 63 рисунки і 18 таблиць.

**Вступ дисертації** достатньо повно розкриває сутність та сучасний стан науково-технічного завдання, аргументи, що зумовили його постановку; автором обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, наведено зв'язок роботи з науковою програмою, мету роботи, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, сформульовано наукову новизну, визначено практичну значимість одержаних результатів, наведено особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень, публікації за темою дисертації та структуру роботи.

**У першому розділі** дисертант Українець М. С. докладно, шляхом критичного аналізу висвітлив сучасний стан питання щодо технологій отримання інтерметаліду NiAl як перспективного матеріалу для отримання високотемпературних зносостійких покриттів. Автор дисертації показав, що NiAl має високі температуру плавлення, окисну та корозійну стійкості, проте, його використання у вузлах тертя обмежене внаслідок підвищеної пластичності алюмініду нікелю за температур вище  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що призводить до руйнації захисних оксидних плівок, утворених на поверхні інтерметаліду, та інтенсифікації захоплювання NiAl з матеріалом контртіла, реалізації абразивно-адгезійного механізму зношування та, як наслідок, підвищення зносу пари тертя.

При аналізі літературних джерел автором дисертації Українцем М. С. було розглянуто відомості, які показали, що дисперсне армування інтерметаліду тугоплавкими частками підвищує його жорсткість і робить можливим використання алюмініду нікелю у високотемпературних вузлах тертя у вигляді покриттів, а у якості зміцнюючої фази зазвичай використовуються оксиди, карбіди, нітриди і дибориди.

Дисертантом висвітлено, що оксиди характеризуються невисокою змочуваністю металами та сплавами, що негативно впливає на міцність зв'язку між матрицею та армуючою фазою, а карбідам і нітридам властива висока дефектність в підрешітці неметалу, то введення тугоплавких диборидів до складу NiAl з метою його зміцнення є раціональним. При цьому, найбільш перспективними армуючими домішками є частки CrB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub> і ZrB<sub>2</sub>.

Надалі дисертант проілюстрував перспективність застосування розроблюваного зносостійкого КМП в якості захисних покриттів для робочих поверхонь торцевих ущільнень, показав його можливе використання для захисту торців лопаток компресорів високого і низького тисків (компоненти пари тертя «торець лопатки-корпус ГТД») в газотурбінних двигунах нового покоління. Дисертант проаналізував, що у даному випадку руйнуючими факторами є механічне стирання внаслідок тертя-ковзання, високі температури (500÷800 °С) та корозія; тому для підвищення ресурсу робочі поверхні торцевих ущільнень і торців лопаток покриваються керамічними чи композиційними зносостійкими покриттями.

Як завершення розділу 1 здобувач Українець М. С. формулює напрямок дисертаційних досліджень, шляхи вирішення поставлених завдань та формує загальну схему проведення досліджень.

Мені видається, що огляд літературних вітчизняних і закордонних джерел та наступні узагальнення аналітичних даних, виконані шляхом критичного аналізу, дозволили здобувачеві Українцю М. С. обґрунтувати доцільність виконання досліджень з означеної теми, окреслити мету роботи та шляхи її досягнення.

У другому розділі дисертації здобувач Українець М. С. висвітлює методичний підхід до виконання дисертаційної роботи. Для цього дисертант, перш за все, надає детальний опис технологічних етапів і обґрунтованих режимів одержання композиційного порошкового матеріалу системи «NiAl-CrB<sub>2</sub>, апаратури й устаткування для подрібнення, змішування вихідних порошоків, обладнання для гарячого пресування, детально описує методику одержання порошкових сумішей композиційних матеріалів серії «НАБХ-х» для нанесення газотермічних покриттів.

Також у цьому розділі автор також подає характеристику вихідних порошоків і матеріалів, висвітлює методику гарячого пресування порошоків. Окрім цього автор висвітлює напрацювання з технології отримання газотермічних покриттів із розроблених композиційних порошкових сумішей НАБХ-15 і НАБХ-30 і вихідного сплаву ПН70Ю30 методом плазмового напилювання (ПН) у відкритій атмосфері, а також технологічні режими отримання електроіскрових покриттів з використанням електродів з матеріалів НАБХ-15 і НАБХ-30.

Далі даному розділі дисертації автор обґрунтував та скомпонував комплексну методику розгалужених експериментальних досліджень, що має у своєму складі низку найсучасних тонких, стандартних та оригінальних методів досліджень з використанням різноманітного експериментального устаткування. А саме, дисертант у даному розділі дисертації представляє опис методів досліджень, таких як електронно-мікроскопічні та рентгенівські дослідження, методики дослідження фізико-механічних характеристик та триботехнічних випробувань, метод високотемпературного диференційно-термічного аналізу.

На мою думку, даний розділ дисертації Українця М. С. є надзвичайно значущим розділом, який розкриває обґрунтований напрям досліджень та методи вирішення задач роботи.

Вказане демонструє послідовний та системний підхід автора до вирішення важливої науково-технічної задачі, що поставлена у дисертації, а сформована дисертантом Українцем М. С. методика проведення всебічних досліджень, що викладена у розділі 2, забезпечила одержання достовірних та коректних результатів.

Вважаю, що загалом даний розділ дисертації Українця М. С. свідчить про логічні та чіткі напрямки реалізації поставленої мети роботи, та підтверджує здатність автора ставити та послідовно розв'язувати складні наукові завдання, застосовувати найсучасніші методики та обладнання, співставляти і аналізувати одержані різними методами результати, робити на їх основі коректні висновки.

Це демонструє послідовний системний підхід дисертанта до вирішення складних завдань.

У третьому розділі дисертації здобувач Українець М. С. зосереджується на дослідженнях змочування в системах «NiAl-MeB<sub>2</sub>». Автором було встановлено, що з досліджуваних диборидів Zr, Ti та Cr найбільш оптимальним для створення зносостійкого композиційного порошкового матеріалу на основі Ni є диборид хрому, який змочується розплавом інтерметаліду з формуванням контактних кутів  $\theta \approx 0^\circ$ .

Дисертантом в результаті детального дослідження ЗВ системи «NiAl-CrB<sub>2</sub>» встановлено, що в процесі взаємодії утворюється нова, додатково-армуюча, фаза Ni-Cr-B, мікротвердість якої становить 10,2 ГПа.

Здобувач Українець М. С. показав, що композиційний матеріал системи «NiAl-CrB<sub>2</sub>» складається з інтерметалевої матриці і двох типів армуючих домішок: вихідного CrB<sub>2</sub> і фази Ni-Cr-B, утвореної в результаті взаємодії алюмініду нікелю з диборидом хрому. Згідно результатів МРСА та РФА дана фаза є боридом Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, легованим Ni.

Так, в результаті досліджень виявлено, що фаза Ni-Cr-B оточує частинки дибориду хрому і формує плавний перехід між NiAl та CrB<sub>2</sub>. Присутність такої перехідної фази повинна позитивно відобразитися на міцності з'єднання зерен дибориду з інтерметалідом, забезпечуючи високі фізико-механічні характеристики композиційного матеріалу системи «NiAl-CrB<sub>2</sub>».

Узагальнюючи отримані дані, дисертант продемонстрував, що такий композит може бути рекомендований для застосування у високотемпературних вузлах тертя, оскільки тугоплавкі домішки сприяють опору пластичній деформації інтерметаліду з одного боку та підвищують його зносостійкість – з іншого.

Мені видається, що наведені у даному розділі експериментальні результати та зроблені висновки показують важливість отриманих даних не тільки у науковому, але і у прикладному плані, коли стає можливим цілеспрямовано формувати склад високотемпературних композитів та прогнозувати їх технологічні і функціональні характеристики.

Четвертий розділ дисертації Українця М. С. розкриває результати досліджень впливу домішок CrB<sub>2</sub> на характеристики міцності композиційних матеріалів на основі NiAl в широкому діапазоні температур. Було показано, що армування інтерметаліду NiAl боридом CrB<sub>2</sub> підвищує характеристики міцності отриманих композитів серії «НАБХ-х» при випробуванні на стискання і вигин, і підвищуються як напруження деформування при стисканні, так і напруження руйнування композиційного матеріалу під дією розтягуючих напружень при вигині.

Автором доведено, що введення до NiAl домішок CrB<sub>2</sub> в кількості вище 12% призводить до утворення фрагментів зв'язного каркасу із частинок тугоплавких сполук в об'ємі інтерметаліду. Завдяки присутності такого каркасу композиційні матеріали серії «НАБХ-х» із вмістом 15 (30, 45) % CrB<sub>2</sub> мають значно вищу  $\sigma_{0,2}$  та напруження руйнування порівняно з вихідним інтерметалідом при температурах 20÷800 °С.

При цьому відсутність міжзеренного руйнування свідчить про високу адгезію на границі фаз «інтерметалід-диборид». Внаслідок цього тріщина проходить через фази інтерметаліду і дибориду хрому, утворюючи мікроструктуру з характерними ділянками транскристалічного руйнування.

Оскільки композиційний матеріал НАБХ-15 має значно вищі характеристики міцності, порівняно з вихідним інтерметалідом, в цільовому діапазоні температур 20÷800 °С, дисертант узагальнив, що даний композиційний матеріал НАБХ-15 може бути рекомендований до застосування його у високотемпературних вузлах тертя.

Представлений дисертантом аналіз результатів показує, що цей розділ дисертації Українця М. С. займає одну з ключових позицій з погляду не тільки наукової цінності доробку автора, але і з точки зору рекомендацій експлуатаційникам, виробникам і розробникам нових ефективних композиційних матеріалів, призначених для роботи у жорстких умовах експлуатації.

У п'ятому розділі дисертації Українця М. С. наведено результати вибору оптимальних режимів нанесення плазмових та ЕІЛ покриттів НАБХ-15 (30), визначено інтенсивності зношування їх при терті за схемою «pin-on-disc» в температурному діапазоні 20÷800 °С та встановлено механізми зношування.

В результаті досліджень було отримано плазмові та електроіскрові покриття композиційних матеріалів НАБХ-15 (30) і визначено інтенсивність та механізми їх зношування в парі зі сталевим та NiAl-контртілом в широкому діапазоні температур (20÷800 °С).

Автором переконливо продемонстровано, що введення CrB<sub>2</sub> змінює адгезійний механізм зношування, характерний для NiAl, на окиснювальний, характерний для покриттів НАБХ, при терті за T≥500 °С. При цьому причиною такої зміни є зниження пластичності інтерметаліду і, як наслідок, збереження поверхневої оксидної плівки, сформованої на алюмініді нікелю, а також робота оксидів, утворених на зернах дибориду, в якості твердого мастила в зоні тертя.

Як показали дослідження дисертанта Українця М. С., найвищу зносостійкість в умовах тертя за 20÷800 °С має покриття алюмініду нікелю, армованого 15% CrB<sub>2</sub>. Композиційні покриття НАБХ-15 (30) за кімнатних температур мають абразивний механізм зношування, а за 500 °С і вище – окиснювальний.

Враховуючи одержані дані, розроблений композиційний матеріал НАБХ-15 (NiAl-15% CrB<sub>2</sub>) рекомендується до застосування у високотемпературних вузлах тертя (T=20÷800 °С).

Наведений автором фактичний матеріал даного розділу дисертації переконує у важливості отриманих результатів і висновків не тільки у науковому, але й у прикладному плані, що дозволяє позитивно охарактеризувати здобувача Українця М. С. як ретельного науковця, який чітко окреслює та успішно вирішує складніші наукові завдання та реалізує їх на практиці.

На мою думку, наведені у даному розділі дисертації результати ілюструють такий важливий і невід'ємний бік роботи, як реальну можливість інженерної реалізації напрацювань автора.

Підрозділ дисертаційної роботи **„Узагальнення. Видача рекомендацій для використання розроблених покриттів”** резюмує напрацювання дисертанта Українця М. С. щодо розробленого наукового підходу до створення високотемпературних зносостійких КПМ на основі NiAl, який полягає у необхідності його армування дисперсними тугоплавкими сполуками з метою зниження пластичності інтерметаліду за температур T ≥ 500 °С, запобігання руйнації захисного оксидного шару, сформованого на поверхні NiAl при терті і, як наслідок, підвищення зносостійкості отриманого композиту. Автор також подає узагальнення щодо конкретного практичного застосування результатів дисертаційного дослідження.

У **додатках** до дисертації, що рецензується, представлено затверджену технічну документацію – акт стендових випробувань на державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна, торці яких були зміцнені плазмовими покриттями НАБХ-15. Випробування показали їх високі експлуатаційні характеристики та зносостійкість в 1,5-1,8 разів вищу при T=500 °С, порівняно з лопатками, типовими для даної конструкції.

У документації зазначається, що розроблений КПМ НАБХ-15 рекомендується використовувати для нанесення захисних покриттів на робочі поверхні деталей, що працюють в умовах високотемпературного (T=20÷800 °С) тертя, в тому числі – на кільця торцевих ущільнень і торці лопаток в парах тертя «торець лопатки-корпус ГТД» в газотурбінних двигунах з контролем кліренсу.

### **Зауваження по дисертаційній роботі**

Окрім викладених вище позитивних якостей рецензованої дисертації Українця М. С. слід зробити наступні зауваження по роботі:

1. У рубриці «Актуальність теми» дисертації і у авторефераті відсутнє чітке її формулювання, як це вимагають нормативні документи з питань підготовки та експертизи дисертацій, а автор лише вказує на перспективність зміцнення інтерметаліду NiAl тугоплавкими диборидами, не аргументуючи чому саме ними можна досягти високотемпературного зміцнення.

2. На жаль, у рубриці «Наукова новизна одержаних результатів» у пунктах 2 і 3 відсутня ступінь новизни одержаних наукових результатів (чи то одержано «вперше», чи то «набуло подальшого розвитку...» і т.п.).

Це не дозволяє оцінити пріоритетність представлених автором наукових положень.

3. У розділі 2 дисертації описуються технологічні аспекти нанесення покриттів, наводяться ряд методик виконання досліджень і випробувань, проте, на жаль, автор не наводить

методів математичної обробки результатів вимірювань, коли порівняння і оцінка середніх величин, а також визначення достовірності отриманих результатів виконується методами теорії ймовірності та математичної статистики.

Зокрема, дисертант на С. 69 лише вказує, що міцність зчеплення покриття з підкладкою визначали як середнє арифметичне від результатів 5 випробувань. Це не дозволяє повною мірою оцінити достовірність отриманих автором даних.

До того ж, на жаль, відсутні висновки до такого важливого методологічного розділу, як розділ 2.

4. У розділі 3 автор дисертації констатує, що серед досліджених диборидів Zr, Ti та Cr найбільш оптимальним є диборид хрому.

Проте, на жаль, не сформульовано що саме було критеріями оптимізації, і, як наслідок, дозволило зробити припущення щодо підвищення фізико-механічних характеристик покриття саме завдяки дибориду хрому.

5. Дисертант показав у розділі 4, що армування інтерметаліду NiAl диборидом CrB<sub>2</sub> підвищує характеристики міцності на стискання та згин отриманих композитів.

Автор продемонстрував, що новий композит має значно вищі характеристики міцності порівняно з вихідним інтерметалідом NiAl.

Втім, характеристики міцності, напевно, були б вищими при армуванні NiAl й іншими зміцнюючими сполуками.

Тому було б доцільно навести характеристики міцності не тільки для армованого диборидом хрому інтерметаліду у порівнянні з вихідним NiAl, але й також для інтерметаліду NiAl, що армований іншими зміцнюючими сполуками. Така інформація була б вельми переконливою.

6. Автором у розділі 5 визначено характер зношування покриття НАБХ-15, яке продемонструвало найкращу зносостійкість, проілюстровано хімічний склад покриття у досліджуваних точках доріжки тертя по глибині травлення (рис. 5.2.8, С. 126).

Проте було б вельми інформативним представлення кількісного фазового складу поверхонь тертя після високотемпературних випробувань. Це надало би змогу (на майбутнє) керувати зносостійкістю покриттів технологічними заходами, варіюючи, зокрема, видами зміцнюючих армуючих домішок, їх кількістю, та прогнозувати поведінку покриттів в різних умовах експлуатації.

7. У дисертаційній роботі і у авторефераті дисертант подає дуже важливі практичні результати, де вказує, що зносостійкість лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна з нанесеним покриттям НАБХ-15 у 1,5-1,8 разів вища у порівнянні з типовими лопатками для даної конструкції.

Мені видається, що викладення практичного аспекту дисертаційної роботи було б значно посиленим, якби автор надав розрахунок очікуваного економічного ефекту від впровадження результатів досліджень.

8. На жаль, список літературних джерел виконано з відхиленнями від стандарту „ДСТУ 7.1:2006. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання”.

Хоча в той же час список публікацій автора за темою дисертації виконано вірно.

### **Загальні висновки по дисертації**

Дисертація Українця М. С. є завершеною науковою працею, при виконанні якої були одержані нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують актуальне науково-технічне завдання - встановлення закономірностей структуроутворення нових композиційних покриттів на основі інтерметаліду NiAl, армованого диборидами металів, створення КПП системи «NiAl-тугоплавка сполука» для отримання газотермічних та електроіскрових покриттів з високою зносостійкістю, призначених для роботи в умовах високотемпературного (500÷800 °С) тертя.

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у наукових фахових і міжнародних виданнях та широко апробовані на міжнародних науково-технічних конференціях.

Матеріали дисертації Українця М. С. повністю відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство».

Зміст автореферату дисертаційної роботи Українця М. С. є ідентичним до основних положень дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота «**Особливості структуроутворення та експлуатаційні властивості композитів систем NiAl-MeV<sub>2</sub> для високотемпературних зносостійких покриттів**» відповідає вимогам до кандидатських дисертацій згідно п. 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор – **Українець Максим Сергійович** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент,  
професор, доктор технічних наук,  
в.о. зав. кафедри технології поліграфічного виробництва  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Т.А. Роїк

Підпис професора, д.т.н. Т.А. Роїк засвідчую:  
Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



А.А. Мельниченко