

Відгук офіційного опонента

на дисертаційну роботу Українця Максима Сергійовича

«Особливості структуроутворення та експлуатаційні властивості композитів систем NiAl-MeB₂ для високотемпературних зносостійких покриттів»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Розвиток сучасної техніки неможливий без застосування матеріалів із високими експлуатаційними властивостями. Важливе місце серед цих матеріалів посідають композиційні матеріали, зміцнені дисперсними частинками тугоплавких сполук. Ці частинки діють як бар'єри для руху дислокацій, що і визначає підвищення міцності та опору пластичній деформації. Перспективним матеріалом для роботи в умовах високотемпературного тертя вважається інтерметалід NiAl, властивості якого підвищують шляхом зміцнення переважно дисперсними частинками оксидів. Однак при виготовленні таких композиційних матеріалів виникають труднощі, пов'язані з низьким змочуванням оксидів розплавленою зв'язкою. Проблему можна вирішити, застосувавши тугоплавкі бориди хрому, титану, цирконію в якості зміцнюючої фази. Означена задача потребує комплексного дослідження закономірностей формування структури та властивостей зон контактної взаємодії, що утворюються в системах «інтерметалід-тугоплавкий борид». Враховуючи важливість створення нового композиційного матеріалу з підвищеною зносостійкістю в умовах високотемпературного тертя, дослідження, виконані в дисертаційній роботі М.С.Українця, спрямовані на отримання газо-термічних та електроіскрових покриттів з керованою структурою та трибологічними властивостями, є безумовно актуальні. Цей висновок також підтверджує зв'язок дисертації з планами науково-дослідних

робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича і її виконання в рамках двох програм (шифри тем – III-33-12, №0113U000314; III-20-16).

Ступінь обґрунтованості, достовірності та новизна наукових положень, висновків, рекомендацій

Достовірність експериментальних результатів, обґрунтованість наукових висновків і рекомендацій, які випливають із дисертаційної роботи М.С.Українця, не викликають ніяких сумнівів. Дослідження виконані із залученням сучасного експериментального обладнання та комп'ютерної техніки. Заслужує на увагу комплексний підхід автора до вирішення поставлених питань. Отримані результати корелюють із результатами інших дослідників. Вони апробовані на авторитетних міжнародних і національних науково-технічних конференціях, опубліковані в провідних закордонних та вітчизняних фахових спеціалізованих виданнях.

Дисертаційна робота М.С.Українця складається з вступу, п'яти розділів, узагальнень, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету досліджень, показано наукову новизну і практичне значення дисертаційної роботи. Перший розділ містить літературний аналіз сучасного стану наукової діяльності в галузі створення нових композиційних матеріалів, зміцнених дисперсними тугоплавкими сполуками. Зокрема охарактеризовано композиційні порошкові матеріали на основі NiAl, способи їх зміцнення. Описано структуру та властивості інтерметаліду NiAl, а також механізми його зношування в умовах тертя за кімнатної та підвищеної температур. Наведено склад та властивості порошкових матеріалів, призначених для зміцнення матриці NiAl. Описано можливі способи отримання таких композиційних матеріалів. Обґрунтовано перспективність зміцнення матриці NiAl дисперсними тугоплавкими борідами. Висвітлено перспективні напрямки застосування композиційних матеріалів в якості зносостійких високотемпературних покриттів для захисту робочих поверхонь торцевих

ушілень, торців лопаток компресорів низького та високого тисків в газотурбінних двигунах. Зазначено, що розробка композиційного матеріалу системи «NiAl-MeB₂» для отримання зносостійких електроіскрових та плазмових покриттів є актуальною задачею сучасного матеріалознавства. Посилаючись на аналіз літературних джерел, обґрунтовано задачі досліджень, які потребують вирішення в дисертаційній роботі. Наведено структурну схему роботи, за якою виконували експериментальні дослідження.

У другому розділі охарактеризовано об'єкти дослідження, зокрема вихідні матеріали для виготовлення композитів на основі інтерметаліду NiAl, зміцненого дисперсними боридами хрому. Визначено напрями досліджень, пов'язані з вивченням контактної взаємодії в системах «металевий розплав – тугоплавка сполука». Охарактеризовано задіяні методику «лежачої краплі» та установку для дослідження кінетики розтікання. Детально описано технології отримання порошкового композиційного матеріалу «NiAl-CrB₂», виготовлення сумішей для газотермічних покриттів «НАБХ-х», нанесення електроіскрових та плазмових композиційних покриттів. Наведено відомості про задіяні методики дослідження структурно-фазового та хімічного складу композиційних матеріалів, сумішей і покриттів, а саме про методики металографічного, рентгенофазового, диференціального термічного, мікрорентгеноспектрального та інших аналізів. Описано методики визначення фізико-механічних (мікротвердості, межі плинності, міцності на вигин) та трибологічних властивостей.

Третій розділ присвячено дослідженню та аналізу механізмів контактної взаємодії в системах «NiAl-MeB₂». Описано структуру зон взаємодії між інтерметалідом NiAl та підкладками, виготовленими з диборидів цирконію, титану, хрому. Зроблено висновок про те, що найбільш перспективною тугоплавною сполукою для зміцнення інтерметаліду NiAl є диборид хрому. Детально охарактеризовано структурно-фазовий та хімічний

склад зони взаємодії в системі «NiAl-CrV₂», запропоновано механізм її структуроутворення. Наведено результати дослідження зразку «NiAl-15%CrV₂» методами диференціального термічного, металографічного, мікрорентгеноспектрального та мікродюрOMETричного аналізів.

У четвертому розділі подано результати визначення механічних властивостей зразків композиційних матеріалів «НАБХ-х». Зокрема описано вплив домішок дибориду хрому на межу плинності та міцність на вигин в інтервалі температур 20÷800 °С. Особливу увагу приділено аналізу структури зламів зразків. Зокрема зроблено висновок про відсутність міжзеренного руйнування та високу адгезію на границях поділу між інтерметалідом NiAl та диборидом хрому. Зазначено, що композиційний матеріал НАБХ-15 має найбільшу міцність серед досліджених зразків.

У п'ятому розділі наведено результати вивчення структури та триботехнічних характеристик композиційних покриттів, отриманих методами газотермічного напилювання та електроіскрового легування. Визначено вплив вмісту домішок дибориду хрому на зносостійкість в умовах тертя за схемою «pin-on-disk» в інтервалі температур 20÷800 °С. Наведено залежності інтенсивності зношування від складу досліджених зразків НАБХ-х. Обґрунтовано зміну механізмів зношування інтретметаліду NiAl при підвищенні температури вище 500 °С з абразивно-адгезійного на адгезійний та композиційних покриттів на основі того ж інтретметаліду, зміцненого диборидом хрому – з абразивного на окислювальний. Для застосування у високотемпературних вузлах тертя рекомендовано композиційний матеріал НАБХ-15.

Додатки містять акт технічного випробування, що підтверджує перспективність впровадження результатів роботи в умовах ДП КБ «Південне» для отримання газотермічних покриттів на торці лопаток газотурбінних двигунів авіаційної та наземної техніки, список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

Ступінь новизни виконаних у дисертаційній роботі М.С.Українця досліджень визначається тим, що більшість результатів отримана автором уперше. Серед них наступні:

- закономірності контактної взаємодії та структуроутворення в системах «NiAl-Zr(Ti,Cr)B₂»;
- температури фазових перетворень під час нагрівання/охолодження порошкової суміші «NiAl-15%CrB₂», визначені методом диференціального термічного аналізу;
- вплив введення дисперсних диборидів хрому на межу плинності та міцність на вигин композиційних порошкових матеріалів на основі інтерметаліду NiAl;
- механізми руйнування зразків НАБХ-15, визначені на основі фрактографічних досліджень зламів;
- механізми зношування плазмових та електроіскрових композиційних покриттів НАБХ-15 в умовах тертя за схемою «pin-on-disk» в інтервалі температур 20÷800 °С;
- рекомендації щодо режимів нанесення плазмових та електроіскрових покриттів НАБХ-15 (30).

Практичне значення отриманих результатів

Окрім відзначених вище наукових результатів, наведених у дисертаційній роботі М.С.Українця, необхідно вказати ще ряд її достоїнств, що мають практичне значення. В умовах державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К.Янгеля проведено стендові випробування лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна, зміцненого плазмовим покриттям НАБХ-15, що показали підвищення їх зносостійкості в 1,5-1,8 разів порівняно з типовими лопатками. Результати роботи також планується використати при створенні детонаційних та HVOF покриттів.

Таким чином, комплекс виконаних автором досліджень не обмежується лабораторними випробуваннями, а є корисний матеріал для застосування на практиці. Завдяки цьому дисертаційна робота М.С.Українця є завершеною науковою працею.

Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати роботи повністю викладено в 10 наукових працях, із яких 6 статей опубліковано в спеціалізованих наукових виданнях згідно переліку МОН України (3 статті – у зарубіжних виданнях, що входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus та Web of Science, 1 стаття – у вітчизняному виданні, що входить до науко-метричної бази Scopus), 4 публікації за матеріалами доповідей на конференціях. Вони обговорювалися на 8 науково-технічних міжнародних конференціях. Об'єм представленої дисертації, одержані нові результати, документи, що підтверджують практичне значення, рівень наукових публікацій свідчать про завершеність роботи в цілому і її важливість для науки й вітчизняної промисловості. Автореферат достатньо повно відображає зміст дисертації.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації і автореферату

1. З точки зору закону збереження об'єму не зовсім вдалим є опис автором зони взаємодії системи «NiAl-CrB₂», яка «повністю знаходиться в об'ємі підкладки» (с.80, рис. 3.2.3), через те, що крапля NiAl повністю «проникає в об'єм дибориду хрому» (с.79). Таке було б можливе лише за умови значної пористості підкладки, яку би крапля змогла просочити повністю. Але підкладка є відносно суцільною (пористість 5%, с. 72), тому при змочуванні зона контактної взаємодії поширюється як у бік підкладки, так і в бік краплі, структура якої майже повністю змінюється. Тому більш правильним було б вважати зону взаємодії не двофазною, як зазначає автор

(с.83), а трифазною, врахувавши присутність у її структурі фази CrB_2 (рис. 3.2.6).

2. Важко погодитися із запропонованою автором послідовністю плавлення/кристалізації зразку «NiAl-15%CrB₂». За думкою автора інтерметалід NiAl ($T_{\text{пл}}=1638^\circ\text{C}$) починає плавитися при температурі 1250°C . У ньому розчиняється фаза CrB_2 ($T_{\text{пл}}=2200^\circ\text{C}$) з утворенням фази $(\text{Cr,Ni})_3\text{B}_4$ ($T_{\text{пл}}=2240^\circ\text{C}$). До речі, останню автор називає фазою Ni-Cr-B, невдало застосовуючи запис, яким зазвичай користуються для позначення системи сплаву. На наш погляд, за температури, набагато нижчої за температури плавлення фаз, скоріше можливі процеси контактного плавлення. У цьому випадку за рахунок дифузії бору та хрому в фазу NiAl може утворюватися низка легкоплавких евтектик, присутніх на діаграмах стану відповідних систем. Фаза $(\text{Cr,Ni})_3\text{B}_4$ може входити до складу однієї з евтектик і кристалізуватися за роздільним механізмом через малий об'єм рідини.

3. Аналізуючи характер руйнування зразків композиційних матеріалів «НАБХ-х», автор детально описує вигляд зламів (с. 110), не роблячи висновок про механізм їх руйнування. Хоча більш прийнятною була б ідентифікація зламів відповідно до загально визнаної класифікації: в'язкий, крихкий, квізкрихкий, квазів'язкий тощо.

4. Серед позитивних результатів, пов'язаних з введенням до складу NiAl-електроіскрових покриттів дисперсних частинок CrB_2 , автор указує на зменшення кількості тріщин у перехідній зоні між покриттям і сталлю основою (с. 132). При цьому причиною таких змін автор вважає релаксацію напружень, які виникають через різницю коефіцієнтів термічного розширення контактуючих речовин. Хоча, враховуючи крихкість матеріалів, більш вірогідною причиною зменшення тріщиноутворення є реалізація одного з механізмів гальмування тріщини, що спостерігаються в композиційних матеріалах.

5. У цілому висвітлення результатів роботи в дисертації справляє гарне враження як своєю послідовністю, так і чіткістю викладення. Проте

трапляються неточності. Наприклад, мікротвердість віднесена до фізико-хімічних властивостей (с.68), об'ємні дефекти – пори – названі «точковими» (с.76), а плоскі кристалічні грані – «прямолінійними» (с.88). Мікроструктуру зони взаємодії утворюють фази та структурні складові, а «не тріщини, відколи та відшарування» (с.74). Зустрічаються неточності перекладу, наприклад «поєднання» замість сполук (с.91), «текучість» замість плинності (розд. 4), «частки» замість частинок (с.61.) та інші. Не вказана або вказана неправильно розмірність деяких величин, наприклад, параметра ґратки (табл. 1.1.1) або коефіцієнта теплопровідності ($B/(m \cdot K)$ замість $Bt/(m \cdot K)$) (табл. 1.1.2). Іноді на графіках або в таблицях не зазначені похибки вимірювання величин.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам

Зроблені зауваження не мають принципового характеру, який би стосувався суті дисертаційної роботи. В цілому можна заключити, що дисертантом отримані нові наукові результати, що дозволило вирішити важливу науково-технічну задачу, яка полягає у створенні нових газотермічних та електроіскрових композиційних покриттів для роботи в умовах високотемпературного тертя на основі дослідження закономірностей контактної взаємодії в системах «NiAl-MeB₂» та особливостей формування структури та властивостей порошкових композиційних матеріалів з підвищеними трибологічними характеристиками.

На підставі вищесказаного можна зробити висновок про те, що дисертаційна робота Українця Максима Сергійовича відповідає всім вимогам п.11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р. та №1159 від 30.12.2015 р. до актуальності, методичного рівня, змісту, наукової

новизни, практичного значення, оформлення тощо, є закінченою кваліфікаційною науковою роботою, а її автор Українець Максим Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент –

професор кафедри експериментальної фізики

та фізики металів Дніпровського

національного університету ім. О.Гончара,

доктор технічних наук

О.В.Сухова

Підпис О.В.Сухової підтверджую –

Вчений секретар Дніпровського

національного університету ім. О.Гончара,

кандидат фізико-математичних наук



Т.В.Ходанен