

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Гончарука Віктора Анатолійовича «Вплив структурних факторів на механічні властивості високоміцних композиційних матеріалів на основі тугоплавких сполук», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

### *Актуальність теми дисертації.*

Сучасна промисловість потребує конструкційних і функціональних матеріалів із підвищеними механічними властивостями для різних застосувань. В останні десятиріччя композити стають усе більш затребуваними у тих випадках, коли традиційні сплави не в змозі виконати задані функції. Стримуючим фактором є недостатність даних щодо кореляції між структурою та механічними властивостями композитів в широкому інтервалі температур, і недосконалість неруйнівних методів визначення міцності зразків/виробів, яким властива висока крихкість. Тому дисертаційна робота Гончарука Віктора Анатолійович, в якій розглядається проблема впливу структурних факторів на механічні властивості високоміцних композиційних матеріалів, безперечно є актуальною.

Дослідження, результати яких увійшли до дисертаційної роботи, виконувались за низкою відомчих тем НАН України, національних і міжнародних проектів, тематика яких відповідає основним науковим напрямкам робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України та пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки. Серед них можна виділити наступні актуальні теми «Розробка нового покоління легкої броні на основі шаруватих композитів» (№ 437/445, 2016 – 2017 рр.); «Розробка легких ударостійких сплавів для захисту» (№453/473, 2018 – 2021 рр) та проект УНТЦ: №1997 «Пластичність та деформаційні криві, отримані методом індентування для кераміки та покриттів».

### *Загальна характеристика дисертаційної роботи.*

Представлена дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків і переліку використаних літературних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми виконаної роботи, визначено мету та основні задачі досліджень, сформульовано наукову новизну і практичну значимість одержаних результатів, вказано дані про апробацію основних положень дисертації.

У першому розділі наведено аналіз сучасного стану наукової проблеми, яку автором досліджено у дисертації. Зокрема розглянуто розглянуті основні типи композиційних

матеріалів з різними типами матриці та другої фази, а також проаналізовані методи підвищення їх механічних властивостей. Особливу увагу приділено матеріалам з крихкою матрицею і різними типами зв'язки (крихкою та пластичною). Проаналізовано також вплив структурних факторів (розміру та форми частинок, вмісту зв'язуючої складової композиту та ін.) та температури на механічні властивості композитів.

Також, детально проаналізовані механізми генерації акустичної емісії в крихких та пластичних матеріалах: різна амплітуда сигналів та різний частотний діапазон. Описані методи реєстрації акустичної емісії. Проаналізовано можливий взаємозв'язок між параметрами акустичної емісії та характеристиками міцності матеріалів. На підставі аналізу викладених літературних даних показано важливість не тільки визначення властивостей матеріалу, але й розвитку уявлень про фізичні процеси, які відбуваються в матеріалі при механічному навантаженні, що стає можливим при системному аналізі на підставі комбінації різних методів досліджень та використанні сучасних теорій пластичної деформації та руйнування матеріалів.

В цілому, матеріал, що викладений в цьому розділі, достатньо повний та відображає сучасний стан проблем, що розглядаються в роботі.

*Другий розділ* містить характеристику об'єктів дослідження та обґрунтування доцільності їх вибору для вирішення поставлених задач, а також дано опис використаних методів дослідження. Крім стандартних методів механічних випробувань (визначення комплексу механічних властивостей із застосуванням стандартних випробувань на згин за три-точковою схемою) низькотемпературні залежності характеристик міцності та пластичності ( $-196...20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) вимірювались на модернізованій установці Р-5 під шаром охолоджувальної рідини, а дослідження механічних характеристик вище кімнатної температури (в інтервалі  $20...1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – на модернізованій установці Р 1246. Структурні дослідження проведені за допомогою оптичної та растрової електронної мікроскопії. Аналіз поведінки матеріалів методом АЕ реалізовано за допомогою системи збору і обробки даних експерименту, створеної за безпосередньої участі дисертанта на базі акустоемісійного приладу АФ - 15 та ІВМ – сумісного комп'ютера .

*Третій розділ* присвячений дослідженню впливу розміру часток WC, вмісту Co на механічні властивості твердих сплавів WC-Co в широкому інтервалі температур. Вперше проведено систематичне дослідження вказаних параметрів на механічні властивості сплавів WC-Co в інтервалі температур  $-196...+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Наведені результати структурних досліджень і визначені структурні параметри: середній розмір зерна  $d$ , середня ширина кобальтового прошарку  $\lambda$  і зв'язність  $S$ .

Представлені величини механічних характеристик у залежності від розміру структурних елементів, а саме: межа міцності і межа плинності, пластичність до руйнування  $\delta$ , фізична та умовна температури в'язко-крихкого переходу.

Проведений детальний аналіз деформаційного зміцнення сплавів WC-Co та встановлено, що для цих сплавів характерне параболічне деформаційне зміцнення з моменту початку пластичної течії. Апроксимація кривих "напруження  $\sigma$  - деформація  $\epsilon$ " відповідно до рівняння Людвіка із врахуванням дислокаційного механізму деформації дала можливість визначити основні параметри, що характеризують деформаційне зміцнення, а саме: коефіцієнт і показник деформаційного зміцнення. З'ясовано, що коефіцієнт деформаційного зміцнення  $N$  більш ніж на порядок переважає величину  $N$  для сталей чи молібдену. Для показника зміцнення отримано величини  $\leq 0,5$ .

У четвертому розділі вивчено вплив співвідношення фракцій SiC та температури на механічні властивості самозв'язаного SiC. Межу міцності та тріщиностійкість самозв'язаного карбиду кремнію при довільному співвідношенні фракцій SiC розраховано за допомогою регресійного рівняння, отриманого методом планування експерименту. Отримані експериментальні дані задовільно відповідають теорії. Найважливіше, що в даному розділі встановлено, за якої структури матеріал має оптимальні механічні властивості – ця структура повинна бути бімодальною та містити структурні елементи розміром 10 і 3 мкм. У цьому ж розділі на основі даних експерименту розроблено методику термомеханічної обробки керамічних матеріалів SiC (і для порівняння Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), яка дозволила підвищити міцність за кімнатної температури у 1,5 рази, а тріщиностійкість у 2,5 рази, порівняно з вихідним матеріалом.

П'ятий розділ присвячений вивченню особливостей механічної поведінки і механізмів деформації досліджених матеріалів методом реєстрації акустичної емісії в процесі випробувань на трьох-точковий згин та індентування. Розроблена та обґрунтована методологія випробувань і вимірювань акустичної емісії. В процесі випробувань зразків на 3-х точковий вигин встановлено, що найбільш інформативним параметром акустичної емісії, що характеризує межу міцності матеріалу, є сумарна амплітуда.

Експериментально встановлено, що зв'язок між значенням сумарної амплітуди акустичної емісії (при значенні прикладеного до зразка напруження  $\sigma = 0,8$  межі міцності) і межею міцності зразка на вигин  $\sigma_p$  з хорошою точністю описується виведеним у роботі рівнянням. Сформульований алгоритм визначення межі міцності матеріалів за даними сумарної амплітуди акустичної емісії.

Також проведені оцінки межі міцності за іншим критерієм -  $\sigma_{AE}$  – напруженням, при якому відбувається зміна характеру акустичної емісії з дискретного на безперервний. Викладені результати аналізу експериментальних даних показали, що залежність межі міцності від напруження переходу характеру акустичної емісії з дискретного на безперервний добре апроксимується лінійною залежністю, хоча і з різними коефіцієнтами. Розбіжність між розрахунковими і фактичними значеннями межі міцності не перевищує 3%. У цьому ж розділі показано принципову відмінність характеру акустичної емісії при індентуванні в матеріалах, що складаються лише з крихких фаз (SiC) та в матеріалі, що містить пластичну фазу (WC-Co). Для всіх досліджених матеріалів встановлена взаємно однозначна залежність між середньою для даного зразка величиною  $\Sigma U$  (сумарної амплітуди акустичної емісії протягом усього акту індентування з моменту початку навантаження аж до максимального значення  $P_{max}$ ) і  $\sigma_p$  (межею міцності даного зразка).

#### *Оцінка змісту дисертаційної роботи*

Матеріал представленої роботи поданий у логічній послідовності з обґрунтуванням і узагальненням результатів у вигляді висновків за розділами і загальних висновків. Зміст дисертації відповідає напрямку дослідження за спеціальністю 01.04.07 – «фізика твердого тіла» та відображає отримані автором теоретичні та прикладні результати, сукупність яких вирішує поставлену задачу, обумовлюючи завершеність цілісного наукового дослідження.

*Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та їх достовірність*

Обґрунтованість представлених у дисертаційній роботі Гончарука В. А. наукових положень, висновків і рекомендацій полягає перш за все у комплексному підході до вирішення поставлених наукових задач, який включає використання і експериментальних даних, і відомих моделей. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи ґрунтуються на всебічному аналізі отриманих результатів та використанні наукових положень сучасної теорії міцності/пластичності. Враховуючи вище вказане, обґрунтованість викладених в роботі положень не викликає сумніву.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечена коректністю постановки задач, адекватністю фізичних припущень, застосуванням сучасних методів досліджень і статистичної обробки експериментальних даних та підтверджується задовільною відповідністю при зіставленні результатів розрахунків з отриманими експериментальними даними, а також апробацією основних результатів на представницьких наукових конференціях.

### *Новизна наукових результатів роботи*

У роботі вперше отримані такі наукові результати:

- проведено дослідження механічних властивостей композиційних матеріалів з крихкою матрицею та крихкою та пластичною зв'язкою та встановлено закономірності формування їх оптимальної структури та властивостей. Проведено системний аналіз механічної поведінки сплавів WC-Co у широкому температурному інтервалі (на отриманих в ідентичних умовах сплавах вивчено вплив розміру часток матриці, вмісту Co – зв'язки та температури на комплекс механічних властивостей). Також вперше вивчені механічні властивості сплавів з близькими до нанорозмірних частками WC.
- Проведено дослідження і дано фізичне трактування температурної залежності міцності SiC з використанням узагальненої схеми температурної залежності механічних властивостей. Встановлено факт заліковування тріщин у крихкому матеріалі за нагрівання та витримки під дією механічного напруження в певному температурному інтервалі. Запропоновано методика термомеханічного оброблення керамічних матеріалів для підвищення їх міцності та тріщиностійкості.
- Методом акустичної емісії вивчено механічну поведінку досліджених матеріалів при механічному навантаженні. Визначено параметр акустичної емісії, найбільш інформативний для визначення межі міцності матеріалу – сумарна амплітуда  $\Sigma U$ . Вперше розроблено теоретичні основи та алгоритм практичного застосування методики неруйнівного контролю межі міцності ор композиційних матеріалів методом акустичної емісії. Показано принципову відмінність характеру акустичної емісії в суто крихких матеріалах та тих, що містять пластичну фазу.

### *Практична значущість одержаних результатів.*

Встановлені закономірності формування оптимального комплексу механічних властивостей за рахунок оптимальних розміру та співвідношення часток крихкої матриці та зв'язки можуть бути застосовані при виробництві твердосплавних інструментів з подовженим ресурсом роботи.

Вперше розроблений і відпрацьований алгоритм термомеханічної обробки може бути використаний для підвищення міцності та тріщиностійкості керамічних матеріалів на 50 і 150 %, відповідно.

Встановлені механізми акустичної емісії в суто крихких матеріалах дозволили розробити методологію застосування вимірювань акустичної емісії в процесі механічних випробувань (зокрема, три-точковим згином і індентуванням) для неруйнівного контролю

керамічних матеріалів і визначення їх межі міцності з високою точністю (похибка не перевищує 3,5%).

Результати досліджень, а також вдосконалений метод реєстрації акустичної емісії у процесі механічних випробувань можуть бути використані на етапах проектування і розробки композитних матеріалів промислового призначення.

#### *Повнота викладу результатів роботи в опублікованих працях*

Зміст дисертаційної роботи відображено в 18 наукових працях: у тому числі у 9 статтях у фахових наукових виданнях (6 із яких входить до міжнародних науково-метричних баз), у 7 тезах доповідей на конференціях, у 1 авторському свідоцтві на винахід. У наведених вище роботах, які опубліковано у відкритій пресі, повністю розкрито основні наукові результати, що становлять наукову цінність дисертації.

#### *Зауваження до змісту дисертаційної роботи*

- 1) З літератури відомо, що метод суміші деколи застосовують для оцінки модуля пружності композитів. З представлених результатів не зрозуміло, чи визначали та чи аналізували модуль пружності досліджених матеріалів при згині/індентуванні в даній роботі? Якщо ні, то яка думка автора щодо можливості таких оцінок?
- 2) Відомо, що в металевих матеріалах наявність бімодальної мікроструктури, що містить нано- чи субмікророзмірні зерна та зерна мікроскопічних розмірів, дозволяє отримувати комплекс підвищених механічних властивостей. При цьому, вважається, що наявність зерен малого розміру забезпечує підвищення величин межі текучості/міцності, а зерна більшого розміру сприяють достатній пластичності. Чи може подібний підхід бути застосований до інтерпретації експериментальних даних щодо механічних властивостей WC-Co і SiC?
- 3) Потребує більш детального пояснення питання щодо переліку використаних в роботі параметрів акустичної емісії (частота, амплітуда) і критеріїв вибору діапазонів їх реєстрації.
- 4) В дисертації не досить чітко викладені положення щодо того, які мікроструктурні особливості двох основних вивчених матеріалів (WC-Co і SiC) викликають протилежні залежності межі міцності від сумарної кількості імпульсів акустичної емісії?
- 5) Питання щодо використання експериментальних результатів, отриманих на лабораторних зразках, для прогнозування експлуатаційних характеристик виробів і деталей, виготовлених із цих матеріалів, є важливим і часто ключовим у інженерній

практиці. У зв'язку із цим, у дисертації та авторефераті варто було б більш чітко висвітлити взаємозв'язок між механічними властивостями досліджених матеріалів і характеристиками готових виробів.

- б) Є кілька зауважень до оформлення роботи (трапляються підписи на схемах і кривих англійською та/або російською мовами...).

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, які виносяться на захист, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Підсумовуючи, вважаю, що дисертаційна робота В.А. Гончарука «Вплив структурних факторів на механічні властивості високоміцних композиційних матеріалів на основі тугоплавких сполук» відповідає «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», зокрема, його пп. 9, 11, 12, затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 року № 567 (зі змінами, внесеними згідно Постанови Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 року та № 1159 від 30.12.2015 року), а також вимогам МОН України до кандидатських дисертацій. Автор дисертаційної роботи, Гончарук Віктор Анатолійович, цілком заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,  
Завідувач відділу  
фізичних основ інженерії поверхні  
Інституту металофізики ім. Г.В.Курдюмова  
НАН України  
д.ф.-м.н.

Підпис Б.М.Мордюка засвідчую  
Учений секретар  
Інституту металофізики ім. Г.В.Курдюмова  
НАН України  
к.ф.-м.н.



Б. М. Мордюк

М. І. Савчук