

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шеремета Віталія Ігоровича

на тему **«Закономірності формування структури та фізико-механічних властивостей твердих сплавів WC-Co в умовах ізостатичного тиску»**,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

### **Актуальність теми дисертації.**

Тверді сплави надзвичайно широко використовуються в обробних технологіях сучасного машинобудування. Процеси різання, фрезерування, штамповки, виглажування, волочіння неможливо уявити без застосування твердих сплавів різних модифікацій. Забезпечення високих фізико-механічних та експлуатаційних властивостей можливо завдяки цілеспрямованому поєднанню твердого тугоплавкого наповнювача та пластичної металевої зв'язки в одній металокерамічній композиції. Серед основних шляхів покращення властивостей твердих сплавів широко використовуються методи, засновані на модифікації їх елементного складу, термічної обробки та консолідації.

Наразі існує низка робіт по вивченню впливу добавок інгібіторів росту зерен до складу твердих сплавів, в яких автори реєструють ріст твердості матеріалу, однак його тріщиностійкість та міцність суттєво падають. Термічну обробку твердих сплавів проводять як за високих температур, так і за низьких, від'ємних. Обробка сплавів гарячим ізостатичним пресуванням позитивно впливає на ріст їх границі міцності, однак твердість та тріщиностійкість дещо знижуються. Було зроблено висновок, що пористість, яка все ще присутня після гарячого ізостатичного пресування, пояснюється домішками, що заповнюють пори, і що їх не можна усунути гарячим ізостатичним пресуванням. Глибока кріогенна обробка твердих сплавів за температури кипіння азоту ініціює мартенситне перетворення в кобальті та зміну його поліморфної модифікації з кубічної на гексагональну, що супроводжується підвищенням твердості та зносостійкості композиту.

Таким чином, проведення комплексного дослідження по визначенню впливу холодного ізостатичного пресування (ХІП) неспечених заготовок з твердих сплавів та впливу обробки високим гідростатичним тиском спечених твердих сплавів на їх фазовий склад, напружено-деформований стан, структуру, фізико-механічні характеристики та експлуатаційні властивості інструменту з цих матеріалів є актуальною науковою задачею, що становить практичний інтерес.

## **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Уперше, в рамках узагальненого аналізу серії фізичних експериментів, встановлено, що ХІП неспечених твердих сплавів WC-8Co та WC-15Co задає кінетичні умови, що забезпечують формування структури спечених сплавів з переважаючою ГЦП поліморфною модифікацією кобальту на противагу переважаючій ГЦК модифікації зв'язуючої складової в сплавах, одержаних одночасним пресуванням, шляхом ініціації мартенситного ГЦК→ГЦП фазового перетворення Co.

На основі порівняльного аналізу експериментальних даних вперше показано, що застосування ХІП неспеченого твердого сплаву WC-8Co-0,3VC призводить до структурних змін в спеченому сплаві, що супроводжуються зростанням сумарної інтенсивності дифракції від площин ГЦК поліморфної модифікації кобальту на порядок порівняно зі сплавом того ж хімічного складу, одержаного одночасним пресуванням. Водночас показано, що співвідношення інтенсивностей дифракції площин (001) WC до дифракції площин {100} WC для спеченого сплаву WC-8Co-0,3VC, який піддавали ХІП, зросло на 15 % порівняно зі сплавом того ж хімічного складу, одержаного одночасним пресуванням, що вказує на спадкування форми кристалів WC вихідного порошку.

У роботі вперше експериментально встановлено можливість підвищення міцності, твердості та тріщиностійкості твердих сплавів WC-8Co, WC-8Co-0,3VC, WC-15Co, одержаних із застосуванням ХІП, за рахунок зміни фазового складу та зменшення розміру структурних складових. Так, в сплаві WC-8Co, який піддавали ХІП, міцність при триточковому згині зросла на 9 %, а твердість на 2 одиниці за шкалою HRA порівняно із сплавом, одержаним одночасним пресуванням, що вказує на можливість застосування ХІП в якості альтернативи операції ГПП твердих сплавів. Показано, що застосування ХІП під час одержання твердого сплаву WC-8Co-0,3VC відобразилось у підвищенні його тріщиностійкості в 1,5 рази із збереженням тенденції зменшення розміру зерен WC, що є критично важливим для сплавів з інгібіторами росту зерен (ІРЗ). Застосування ХІП під час одержання твердого сплаву WC-15Co дозволило підвищити міцність при триточковому згині на 13 % та твердість на 1 одиницю за шкалою HRA.

У рамках експлуатаційних випробувань вперше встановлено, що більш високу зносостійкість мають тверді сплави, які піддавали ХІП до спікання. Так, ширина ділянки зношування на вставці бурового долота з твердого сплаву WC-6Co, який піддавали ХІП, коротша на 16 % порівняно з тим же параметром на

інструменті зі сплаву, одержаного одновісним пресуванням. Довжина ділянки зношування на крайці різця з твердого сплаву WC-8Co, який піддавали ХП, у 3 рази коротша у порівнянні з тим же параметром на різці зі сплаву, одержаного одновісним пресуванням, і більш ніж у 2 рази коротша порівняно з довжиною ділянки зношування на крайці різця, одержаного із застосуванням ГП. Довша вісь плями еліптичної ділянки зношування на робочій поверхні виглажувача з твердого сплаву WC-15Co, який піддавали ХП, майже у 2 рази коротша порівняно з тим же параметром на інструменті зі сплаву, одержаного стандартною технологією.

Уперше виявлено, що обробка твердого сплаву WC-15Co високим гідростатичним тиском ініціює мартенситне ГЦК→ГЦП фазове перетворення у кобальті. Збільшення кількості ГЦП модифікації Co по відношенню до загальної кількості кобальту в твердому сплаві відобразилось на рості твердості та міцності обробленого ВГТ сплаву. Унаслідок зміни фазового складу та зміни характеру взаємодії зерен WC та Co підвищилась зносостійкість твердого сплаву WC-15Co, який після спікання піддавали обробці ВГТ. Так, довша вісь еліптичної плями зношування на робочій поверхні виглажувача зі сплаву, який піддавали обробці ВГТ, на 37 % коротша порівняно з тим же параметром на інструменті зі сплаву, який не піддавали додатковій обробці.

**Достовірність результатів роботи** ґрунтується на використанні основних положень **механіки деформівного тіла**, постулатів і положень **матеріалознавства**; забезпечується відповідністю розрахункових і експериментальних досліджень. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, одержаних автором добре узгоджуються між собою.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Шеремета В. І. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Матеріалознавство.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям матеріалознавство.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Шеремета Віталія Ігоровича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

## **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Викладений в роботі Шеремета В. І. матеріал є послідовним та логічним, що сприяє цілісному сприйняттю наукової проблематики та висновків. Текст написано у доступному науковому стилі, без надмірного ускладнення, із дотриманням норм академічної мови, графіки, таблиці та ілюстрації доповнюють зміст.

Оформлення відповідає встановленим вимогам до дисертацій докторів філософії.

Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 184 сторінки.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, показано наукову новизну та практичну цінність досліджень, наведені відомості про апробацію результатів, публікації та структуру роботи.

У роботі наведено результати глибокого **літературного огляду** сучасного стану розвитку технологій одержання та обробки твердих сплавів. Показано, що найбільш поширені методи одержання цих матеріалів мають низку переваг порівняно з традиційною технологією одержання цих матеріалів (компактування в закритих прес-формах та подальше спікання у вакуумі).

Таким чином, автор визначає створення наукових та практичних засад щодо розвитку технології одержання та обробки твердих сплавів, яка б забезпечувала підвищення рівня комплексу фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик актуальною задачею дослідження.

**Другий розділ** дисертаційної роботи включає загальні характеристики вихідних матеріалів, опис методики обробки зразків порошкової суміші твердих сплавів. Приведено опис використаних в роботі методів дослідження мікроструктури, хімічного та фазового складу, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

У **третьому розділі** встановлено основні механізми ущільнення під час компактування ХП тисками від 100 МПа до 400 МПа твердих сплавів WC-3Co, WC-8Co, WC-15Co. Виходячи з визначених закономірностей, обґрунтовано вибір оптимального тиску ХП, який забезпечує найвищу щільність компакту, формування структури пресовок твердих сплавів з більш дрібними частинками WC та підвищення рівня залишкових напружень у WC.

Досліджено взаємозв'язок між зміною напружено-деформованого стану компактів твердих сплавів WC-8Co і WC-15Co, одержаних ХП, та кінетикою процесів фазоутворення під час їх спікання. Показано, що на відміну від спечених пресовок твердих сплавів WC-8Co і WC-15Co, одержаних одночасним пресуванням, в яких кобальт переважно знаходився в ГЦК поліморфній

модифікації, кобальт в сплавах ідентичного хімічного складу, які піддавали ХІП перед спіканням, переважно знаходився в ГЦП поліморфній модифікації.

Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать про зміну співвідношення інтенсивностей дифракції площин гексагональної ґратки WC та сумарної інтенсивності дифракції площин ГЦК-Co в сплаві WC-8Co-0,3VC, одержаного ХІП, порівняно зі сплавом, одержаним одновісним пресуванням, що вказує на зменшення середнього розміру зерен WC та зміну розподілу кобальтової зв'язуючої в структурі композиту, одержаного із застосуванням ХІП.

У **четвертому розділі** автор наводить результати дослідження механічних властивостей досліджуваних твердих сплавів WC-8Co, WC-8Co-0,3VC і WC-15Co. Розглянуто особливості структури спечених твердих сплавів, сформованих із застосуванням ХІП, що якісно відрізняє дані композити від ідентичних марок сплавів, але одержаних після одновісного пресування. Показано принципову відмінність локальної взаємодії зерен WC та кобальтової матриці, їх деформації та руйнування під час механічних випробувань сплавів, одержаних ХІП, порівняно зі сплавами, одержаними після одновісного пресування порошкової суміші.

Показано, що ХІП сплаву, легованого інгібітором росту зерен, сформувало умови, що забезпечили утворення бімодальної структури спеченого композиту з гомогенними областями зв'язуючої фази – осередками кобальту. Встановлено, що зі зменшенням середнього розміру зерен WC у сплаві, який піддавали ХІП, на ряду зі збереженням тенденції підвищення твердості нетипово, як для сплавів, легованих інгібіторами росту зерен, тріщиностійкість композиту зросла в 1,5 рази порівняно зі сплавом WC-8Co-0,3VC, одержаного одновісним пресуванням.

У **п'ятому розділі** дисертаційної роботи проведено оцінку зносостійкості інструментів з твердих сплавів WC-6Co, WC-8Co та WC-15Co, одержаних ХІП, під час їх випробування в найбільш типових умовах експлуатації для кожної з досліджуваних марок. Встановлено, що в порівнянні з інструментом з твердих сплавів WC-6Co, WC-8Co та WC-15Co, одержаним одновісним пресуванням, інструмент з твердих сплавів, одержаний ХІП, показав кращу стійкість до зношування під час його експлуатаційного випробування. Показано, що у сплавах, одержаних ХІП, завдяки зміні фазового складу, напружено-деформованого стану та структури, переважаючим був принципово відмінний механізм зношування порівняно зі сплавами, одержаними одновісним пресуванням. Пластична деформація поверхневих шарів бурового, ріжучого та деформуючого інструменту з подальшим відшаруванням деформованого об'єму матеріалу під час адгезійного типу зношування була притаманна сплавам, одержаним одновісним пресуванням, поступове абразивне

зношування поверхневих шарів інструменту з подальшим викришуванням окремих зерен WC – для сплавів, одержаних ХІІ.

У шостому розділі автором запропоновано спосіб обробки твердих сплавів високим гідростатичним тиском (ВГТ). Показано, що обробка ВГТ твердого сплаву WC-15Co ініціює мартенситне фазове перетворення в зв'язуючій складовій, що супроводжується збільшення кількості ГЦП поліморфної модифікації кобальту у композиті. Виявлено, що обробка ВГТ формує градієнтний розподіл властивостей по об'єму композиту.

Наукові результати дисертаційної роботи опубліковано в 13 наукових працях: 5 наукових статтях у фахових виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science (2 з них у виданнях віднесених до третього квартиля (Q3), 2 до четвертого квартиля (Q4) відповідно до класифікації Scimago Journal & Country Rank та 1 наукова стаття у фаховому виданні України категорії А; 8 публікацій у збірниках наукових праць за матеріалами доповідей на конференціях).

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 13 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 1 стаття у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 4 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 2 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях.

Наукові публікації здобувача відзначаються високим рівнем обґрунтованості, актуальністю досліджень і науковою новизною. У працях системно викладено результати дисертаційної роботи, що засвідчує послідовність та цілісність дослідницького підходу. Здобувач дотримується принципів академічної доброчесності: коректно оформлено посилання на джерела, відсутні прояви плагіату, дотримано норм цитування, авторської етики та академічного стилю. Опубліковані праці повністю відповідають тематиці дисертації, містять реальні результати досліджень, апробовані в наукових і професійних середовищах, що додатково підкреслює їхню практичну та теоретичну цінність.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

## Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

За змістом дисертаційної роботи вважаю за можливе висловити наступні зауваження:

1. с.18 – Уперше, в рамках узагальненого аналізу серії фізичних експериментів, встановлено, що ХІП неспечених твердих сплавів WC-8Co та WC-15Co задає кінетичні умови. Про які кінетичні умови йде мова?

2. с.20 – Практичне значення одержаних результатів. На основі проведених досліджень були розширені уявлення щодо впливу ХІП на фізико-механічні властивості та експлуатаційні характеристики спекеного інструменту з цих матеріалів. – Практичне значення одержаних результатів полягає не у розширенні уявлень, а у розробці ефективних засобів впливу на покращення властивостей.

3. с.29 – Густина ГЦК-Co становить  $8,80 \text{ г/см}^3$ , а ГЦП-Co  $8,85 \text{ г/см}^3$ , а відтак ГЦП-Co за рівної кількості має в 1,5 % більший об'єм порівняно з ГЦК-Co. – Збільшення густини при умові збереження маси можливо тільки за рахунок зменшення об'єму.

4. с.35 – термічні напруження, спричинені різницею КТР. Термічні напруження є наслідком термопружної невідповідності компонентів.

5. с. 50 – Рисунок 1.20 – Схема установки ізостатичного пресування. Така схема забезпечує ізостатичний тиск тільки при певному співвідношенні довжини порошкової заготовки до діаметра.

6. Холодне ізостатичне пресування є лише однією з ланок технологічної схеми одержання твердих сплавів:

с.99 – 4.2 Механічні властивості твердого сплаву WC-8Co-0,3VC, одержаного ПІСЛЯ холодного ізостатичного пресування;

с.100 – 4.2.1 Взаємозв'язок структури та властивостей твердого сплаву WC-8Co-0,3VC, одержаного ПІСЛЯ холодного ізостатичного пресування;

с.109 – 4.3 Механічні властивості твердого сплаву WC-15Co, одержаного холодним ізостатичним пресуванням;

с.110 – 4.3.1 Взаємозв'язок структури та властивостей твердого сплаву WC-15Co, одержаного холодним ізостатичним пресуванням;

с.110 – Рисунок 4.15 – Мікроструктура твердого сплаву WC-15Co, одержаного одноісним пресуванням і ХІП;

7. с.115 – У твердому сплаві кобальтова матриця значно пластичніша за зерна WC. Карбід вольфраму також проявляє незначну пластичність. – Дивні ствердження.

8. с.118 – Максимальні зусилля локалізуються саме у вершині пірамідки Віккерса. – Не зусилля, а тиск.

9. с. 118 – Пов'язане з мартенситним фазовим ГЦК→ГЦП перетворенням зв'язуючої складової (рис. 3.12) зниження пластичності кобальту в твердому



сплаві WC-15Co, який піддавали ХІП. – На скільки знижується пластичність кобальту ?

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Шеремета Віталія Ігоровича на тему «Закономірності формування структури та фізико-механічних властивостей твердих сплавів WC-Co в умовах ізостатичного тиску» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 13 Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач **Шеремет Віталій Ігорович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

### **Офіційний опонент:**

Завідувач відділу №9  
комп'ютерного моделювання  
та механіки композиційних матеріалів  
Інституту надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України,  
д.т.н., чл.-кор. НАН України, професор



Анатолій МАЙСТРЕНКО

Підпис чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. Майстренка А.Л. засвідчую:

Вчений секретар  
Інституту надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України,  
к.т.н.



26 травня 2025 р.



Володимир СМОКВИНА