

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ім. В.М. БАКУЛЯ

ЄВДОКИМОВА ОЛЬГА В'ЯЧЕСЛАВІВНА 

УДК 620.22-419:621.893

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ
ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ТРИБОТЕХНІЧНИХ КОМПОЗИТІВ
З НАДКРУПНОЗЕРНИСТИХ ПОРОШКІВ ВИСОКОМОДУЛЬНИХ КАРБІДІВ**

05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ–2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

Науковий керівник: чл.-кор. НАНУ, доктор технічних наук, професор
Бондаренко Володимир Петрович,
Інститут надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ,
головний науковий співробітник відділу спікання
твердих сплавів та вольфрамівмісних композитів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Волкогон Володимир Михайлович,
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України,
завідувач відділу інструментального
матеріалознавства

Кандидат технічних наук, професор
Степанчук Анатолій Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського» МОН України, м. Київ,
професор кафедри високотемпературних матеріалів та
порошкової металургії

Захист відбудеться « 02 » березня 2017 р. о 13³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.230.01 при Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України за адресою: 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України та на сайті інституту у розділі «Захист дисертацій» – «Спецрада Д. 26.230.01».

Автореферат розіслано « 31 » січня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Вченої ради Д 26.230.01
доктор технічних наук, професор



В. І. Лавріненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Триботехнічні композити знаходять широке використання в машинобудуванні, атомній енергетиці, трубопровідному транспорті, гірничодобувній промисловості. Останнім часом у цих галузях активно розвивається новий напрямок створення герметичних насосів і турбоагрегатів, в яких пари тертя змащуються робочою рідиною (водою, бензином, гасом, розчинами солей, кислот і лугів), що перекачується. Це дозволяє удвічі зменшити габарити насосів, турбін і турбоагрегатів, але призводить до різкого погіршення умов роботи пари тертя. Забезпечити ефективну роботу таких пар тертя можливо тільки шляхом створення нових високоефективних антифрикційних матеріалів, що працюють в екстремальних умовах (при тисках до 100 МПа та граничному змащуванні). Цій проблемі значну роль приділяли Л. В. Заболотний і В. П. Бондаренко з учнями. Л. В. Заболотним показано, що для пар тертя з невеликим ресурсом роботи, що піддаються високим осьовим навантаженням, в результаті яких виникають пластичні деформації нерівностей поверхні, наприклад в опорах шарошкових доліт, більш доцільно використовувати макрогетерофазні композити, армовані вставками з твердих тугоплавких сполук, розміри яких у кілька разів перевищують розміри площадки фактичного контакту, тобто становлять кілька міліметрів. В. П. Бондаренком показано, що в парах тертя з високим ресурсом роботи (тисячі годин) більш ефективними є композити мікрогетерофазного типу, коли розміри структурних складових з тугоплавких сполук у кілька разів менші розмірів площадки фактичного контакту і становлять 1–2 мкм. При цьому тугоплавкі складові композиту повинні мати високі модулі пружності (≥ 400 ГПа) і енергії активації руху дислокацій ($\geq 1,5$ еВ).

Композити з проміжними розмірами структурних складових з тугоплавких сполук досі не досліджувалися, хоча їх використання може забезпечувати ряд ефектів, що значно покращують умови роботи пари тертя: перенос пластичної зв'язуючої фази з об'єму композита на поверхню тертя, створення пористої структури, в порах якої буде знаходитися робоча рідина, що забезпечить краще змащування площі фактичного контакту і охолодження поверхні тертя в цілому.

Для проведення досліджень у даній роботі використовували порошки карбіду вольфраму WC з модулем пружності 737 ГПа і енергією активації руху дислокацій 1,5 еВ та карбіду кремнію SiC з модулем пружності 430 ГПа і енергією руху дислокацій 3 еВ. Для забезпечення необхідної пористості вихідного матеріалу, розмір частинок порошку WC та SiC складав 40–125 мкм, що набагато більше розміру особливо крупнозернистих (10–15 мкм) твердосплавних порошків. Тому обрані порошки умовно називаємо надкрупнозернистими.

Крім того, вони в кілька разів відрізняються один від одного густиною (густина WC – 15,63 г/см³, SiC – 3,21 г/см³), що може бути визначальним при врахуванні цієї характеристики в умовах експлуатації (авіація, космонавтика, ракетобудування тощо).

Високі значення модуля пружності і енергії активації руху дислокацій у WC і SiC вказують на те, що при спіканні пресовок із вказаних надкрупнозернистих порошків отримати високі значення міцності і зносостійкості буде проблематично, тому в даній роботі передбачено необхідність використання пластичних зв'язуючих. В якості зв'язуючих на частинки WC і SiC наносили покриття з кобальту чи нікелю,

які широко використовуються у виробництві твердих сплавів, а також використовували евтектику ВН65 (35 % (за масою) WC+65 % (за масою) Ni).

При виготовленні деталей пар тертя високомодульні карбіди (WC, SiC) з покриттями поки що не використовувались. Не досліджено ні процеси їх ущільнення при пресуванні заготовок, ні закономірності формування структури і властивостей при їх спіканні. Все це не дозволяє науково обґрунтувати ефективну технологію виготовлення деталей пар тертя і визначити ефективні умови роботи пар тертя з них. Тому дослідження закономірностей формування структури і властивостей пористих триботехнічних композитів з надкрупнозернистих порошків високомодульних карбідів зі зв'язками з пластичних металів і сплавів є актуальними як з наукової, так і з практичної точок зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, результати яких приведені в даній роботі, виконані в рамках відомчої науково-дослідної теми Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України, III-65-07(0462) (держреєстрація № 0107U002812) «Розробка наукових принципів формування в зернистих надтвердих композитах високомодульних скелетних структур з заданим рівнем пластичної деформації та роботи руйнування» та планів проекту Сьомої рамкової програми Європейського Союзу – «СТАРТ»: «Розвиток співробітництва Україна – ЄС у галузі надтвердих матеріалів» (контракт № 295003) наукових досліджень Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України (ІНМ НАН України).

Мета роботи встановлення закономірностей формування структури і властивостей пористих композитів з надкрупнозернистих порошків карбідів WC і SiC зі зв'язками з пластичних металів і сплавів та отримання композиційних матеріалів для виготовлення високоефективних пар тертя, що змащуються робочою рідиною.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі **задачі**:

- визначення найбільш відомих високонавантажених пар тертя, що змащуються робочими рідинами;
- розробка методики проведення досліджень;
- дослідження закономірностей ущільнення при пресуванні надкрупнозернистих порошків карбідів без покриття та з покриттями;
- дослідження закономірностей ущільнення пресовок з надкрупнозернистих порошків високомодульних карбідів з покриттями та з домішкою пластичної зв'язки при твердофазному та рідкофазному спіканнях;
- дослідження структури, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей пористих композитів з надкрупнозернистих порошків карбідів WC і SiC;
- встановлення найбільш перспективного складу композиту для пар тертя;
- виготовлення і випробування дослідної партії деталей пар тертя, що змащуються робочою рідиною;
- розробка рекомендацій по використанню розроблених композитів.

Об'єкт дослідження – процеси структуроутворення та зношування металокерамічних матеріалів на основі тугоплавких сполук.

Предмет дослідження – закономірності формування структури і властивостей пористих триботехнічних композитів на основі надкрупнозернистих порошків WC і SiC зі зв'язками з пластичних металів та сплавів.

Методи дослідження. В роботі використовувалися такі методи: металографічне дослідження на електронному та оптичному мікроскопах при різних збільшеннях,

рентгенофазовий та мікрорентгеноспектральний аналізи, випробування міцності під час стискання та міцності під час згинання, а також тріщиностійкості. Триботехнічні випробування проводили на модернізованій трибометричній машині 2070 СМТ-1 при граничному змащуванні пари тертя водою, гасом ТС-1 та при тисках на доріжку тертя до 100 МПа. Натурні випробування проводили в умовах ДП «Завод № 410 ЦА» при експлуатації паливного насоса агрегату 934 двигуна Д36, при нормальному та обмеженому змащуванні гасом ТС-1.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше встановлено, що порошки з високомодульних надкрупнозернистих карбідів WC та SiC, покритих Co чи Ni, ведуть себе в процесі пресування в інтервалі тисків від 30 до 300 МПа як пластичні матеріали вже при товщині покриття пластичним металом ≥ 3 мкм, а закономірності їх ущільнення при пресуванні описуються рівняннями пресування М. Ю. Бальшина і Г. М. Ждановича, які були теоретично виведені для опису процесу пресування порошків пластичних металів.
2. Вперше встановлено, що покриття надкрупнозернистих WC і SiC кобальтом чи нікелем дозволяє забезпечувати тиск пресування брикетів без руйнування частинок WC і SiC від 30 до 250 МПа і отримувати пресовки з пористістю від 45 до 20 % відповідно.
3. Вперше встановлено явище самочинної структуризації композиту при рідкофазному спіканні надкрупнозернистого WC, покритого Co чи Ni, при якому утворюється міцна пориста скелетна структура, придатна для ефективного використання в якості високонавантаженого антифрикційного матеріалу.
4. Вперше встановлено, що покриття товщиною 5 мкм надкрупнозернистих частинок SiC дрібними ($d \leq 1$ мкм) частинками WC захищає при рідкофазному спіканні частинки SiC від хімічної взаємодії з нікелевим розплавом евтектичного складу ВН65, при цьому вміст ВН65 не повинен перевищувати 10 % (за масою), бо при більшому вмісті рідка фаза мігрує між зернами покриття з WC і взаємодіє з SiC з утворенням крихких силіцидів нікелю.
5. Вперше показано, що формування на надкрупнозернистих частинках SiC покриття з дрібнозернистого WC товщиною не менше 5 мкм забезпечує надійну фіксацію зерен SiC в об'ємі композиту під час тертя при номінальних тисках до 100 МПа. в зоні контакту.

Практичне значення отриманих результатів. Встановлено, що композити на основі WC, можна виготовляти з покриттями пластичних металів (Co чи Ni), нанесеними безпосередньо на частинки порошку, тоді як при виготовленні композитів на основі SiC необхідно використовувати проміжне покриття з дрібнозернистого WC. Показано, що композити на основі WC мають більш високі механічні характеристики, але значно (в 2 рази) більшу густину, тому їх використання більш доцільне в наземних умовах (трубопровідний транспорт малов'язких рідин, нафтовидобувна промисловість при закачуванні води і поверхневоактивних речовин в нафтові пласти), а композити на основі SiC – в авіації, космонавтиці.

На основі результатів дисертаційної роботи було розроблено технологічну інструкцію по одержанню деталей пар тертя (підп'ятників) на основі SiC(WC) з пластичною зв'язкою. Деталі пар тертя виготовлені з надкрупнозернистого SiC, покритого дрібнозернистим WC, з додаванням 5 % (за масою) евтектики ВН65, що розроблені в рамках дисертаційної роботи, пройшли дослідно-виробничу перевірку в умовах ДП «Завод № 410 ЦА», при режимах, які відповідають нормальним та екстремальним

умовам експлуатації паливного насоса агрегату 934, двигуна ДЗ6. Випробування показали, що зносостійкість підп'ятників з розробленого матеріалу в 3–3,5 разів перевищує зносостійкість серійного підп'ятника з олов'янистої бронзи, яка використовується в паливному насосі агрегату 934 двигуна ДЗ6. Розроблений матеріал рекомендований для виготовлення підп'ятників, що працюють у паливному насосі агрегату 934, а також для інших вузлів тертя, що змащуються малов'язкими рідинами.

Композиційний матеріал на основі надкрупнозернистого SiC, покритого дрібнозернистим WC, з додаванням 5 % (за масою) евтектики BN65 та технологія його виготовлення дозволяють отримувати деталі пар тертя з низьким коефіцієнтом тертя і високим показником зносостійкості, перевагою яких є низька густина, що важливо для авіа- та космічної промисловості.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Автору належать: планування досліджень, розробка методики проведення досліджень, виконання наукових і експериментальних досліджень, узагальнення отриманих результатів і їх аналіз, організація і участь у проведенні механічних, триботехнічних та натурних випробувань, формулювання основних висновків. Вибір об'єктів досліджень, постановка задач дослідження і обговорення одержаних результатів виконано спільно з науковим керівником.

Робота виконана в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України. Автору допомагали: нанесення покриттів на вихідні порошки WC і SiC виконала с.н.с., к.т.н. Т. М. Дуда, пресування проведено спільно з м.н.с. О. О. Матвійчуком та к.т.н. Подобою Я. О. Триботехнічні випробування проводилися спільно з н.с. А. П. Даніловим та проф. М. В. Кіндрачуком на базі Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету МОН України.

Апробація результатів досліджень. Основні результати роботи були представлені на наукових конференціях: Четверта міжнародна конференція студентів і аспірантів «До високих технологій на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (м. Київ, 2009 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми трибології» (м. Київ, 2010 р.); X Міжнародна науково-технічна конференція (м. Мінськ, 2012 р.); II Республіканська науково-технічна конференція молодих вчених ІММС НАН Білорусі «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (м. Гомель, Білорусь, 2012 р.); XII Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Політ» (м. Київ, 2012 р.); «E-MRS 2013 Fall meeting», (Poland, Warsaw, 2013 р.).

Дисертаційна робота у повному обсязі доповідалася і була ухвалена на розширеному засіданні секції «Матеріалознавство порошкових та композиційних матеріалів і покриттів» Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, 2016 р., та на засіданні міжкафедрального семінару Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету МОН України, 2016 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 16 друкованих робіт, із яких 2 статті у виданнях, що входять до наукометричних баз, 2 статті в наукових фахових виданнях України, 2 патенти, 4 статті у зарубіжних виданнях, 6 публікацій за матеріалами міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 140 найменувань і 2 додатків. Робота викладена на 160 сторінках і містить 80 рисунків, 26 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, показано зв'язок роботи з науковими планами і темами, сформульовано мету досліджень, визначено завдання і способи його вирішення, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі на основі літературних джерел розглянуто: основні класи композиційних матеріалів, котрі застосовуються для високонавантажених вузлів тертя в машинобудуванні; технології отримання виробів з композитів на основі карбідів тугоплавких металів, що застосовуються в таких вузлах; особливості їх роботи в парах, що змащуються малов'язкими рідинами.

Л. В. Заболотним відмічено, що для пар тертя з малим ресурсом роботи, але високими осьовими навантаженнями, в результаті яких виникають пластичні деформації нерівностей поверхні, рекомендується використовувати макрогетерофазні композити, армовані вставками з твердих тугоплавких сполук, розміри яких у кілька разів перевищують розміри площі фактичного контакту, тобто становлять кілька міліметрів. В. П. Бондаренком показано, що в парах тертя з великим ресурсом роботи (тисячі годин) більш ефективними є композити мікрогетерофазного типу, коли розміри структурних складових з тугоплавких сполук у кілька разів менші розмірів площі фактичного контакту. При цьому тугоплавкі складові композиту повинні мати високі модулі пружності (≥ 400 ГПа) і енергії активації руху дислокацій ($\geq 1,5$ еВ). Найбільш ефективними для вказаних пар тертя визначено алмаз, кубічний нітрид бору та карбід вольфраму.

Композити з проміжними розмірами структурних складових із тугоплавких сполук фактично досі не досліджувалися, хоча їх використання може дозволити забезпечувати ряд ефектів, що значно покращують умови роботи пари тертя: перенос пластичної зв'язуючої фази з об'єму композита на поверхню тертя, створення пористої структури, в порах якої буде знаходитися робоча рідина, що забезпечить краще змащування площі фактичного контакту і охолодження поверхні тертя в цілому.

Показано, що в трубопровідному транспорті, атомній енергетиці широко використовується деталі пар тертя із самозв'язаного карбіду кремнію. Вони витримують номінальні тиски до 50 МПа, але мають низьку тріщиностійкість. Деталі пар тертя з бабіту, олов'янистої бронзи та графітових матеріалів добре працюють лише в обмеженому інтервалі навантажень і при спеціальному змащенні.

Для отримання пористих композитів, в порах яких буде затримуватися робоча рідина для охолодження і змащування в процесі тертя, обрано порошки з високomodульних карбідів WC та SiC, розмір яких складав 40–125 мкм. Крім того, вказані карбіди в кілька разів відрізняються один від одного густиною (WC – $15,63$ г/см³, SiC – $3,21$ г/см³), що може бути визначальним при врахуванні цієї характеристики в умовах експлуатації (авіація, космонавтика, ракетобудування тощо)

Для надання підвищених механічних та триботехнічних характеристик необхідно додавати зв'язку. В якості зв'язуючого обрано метали, які широко використовуються у виробництві твердих сплавів (Co і Ni), а також суміш евтектичного складу ВН65 (35 % (за масою) WC+65 % (за масою) Ni), яка має високі показники пластичної деформації. При виготовленні деталей пар тертя такі гетерофазні порошки поки що не використовувались. Не досліджено ні процеси їх ущільнення при пресуванні заготовок, ні закономірності формування структури і властивостей при їх спіканні. Все це не дозволяє науково обґрунтувати ефективну технологію виготовлення деталей пар тертя і визначити ефективні умови роботи пар тертя з них. Тому дослідження закономірностей фор-

мування структури і властивостей пористих триботехнічних композитів з надкрупнозернистих порошків високомодульних карбідів зі зв'язками з пластичних металів і сплавів є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору.

На основі проведеного аналізу визначено напрямки дослідження, а також представлено структуру роботи.

У другому розділі описано методи, які були використані при виконанні дисертаційної роботи. Покриття з Со чи Ні на зерна SiC, WC наносили методом хімічного відновлення, за методикою, розробленою в ІНМ ім. В. М. Бакуля НАНУ. Нанесення WC на частинки SiC здійснювали методом накатки. Суміш ВН65 у кількості 5, 10, 20, 30 % (за масою) додавали до порошку SiC, покритого WC, методом механічного змішування. Пресування брикетів проводили в сталевій прес-формі на гідравлічному пресі, брикети спікалися в прохідній печі в середовищі водню. Металографічне дослідження проводили на електронному («Zeiss EVO 50 XVP») та оптичному (МИМ-10) мікроскопах при різних збільшеннях. Рентгенофазовий та мікрорентгеноспектральний аналізи виконували на дифрактометрі «ДРОН-3». Випробування міцності під час стискання проведено згідно з ГОСТ 473.6-81, а міцності під час згинання згідно з ГОСТ 473.8-81. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} оцінювали згідно з ISO 23146:2012. Триботехнічні випробування проводили в НАУ МОН України на модернізованій трибометричній машині 2070 СМТ-1 при граничному змащуванні пари тертя водою або гасом ТС-1 при тисках до 100 МПа та швидкості обертання контртіла 2 м/с. Натурні випробування проводили в умовах ДП «Завод № 410 ЦА» при режимах, що відповідають нормальним та екстремальним умовам (швидкість обертання 2–10 м/с та навантаження 5–50 МПа) експлуатації паливного насоса агрегату 934 двигуна Д 36, при нормальному та обмеженому змащуванні гасом ТС-1.

У третьому розділі досліджено закономірності ущільнення при пресуванні надкрупнозернистих порошків карбідів WC і SiC без покриття та з покриттями кобальтом чи нікелем при тисках пресування від 30 до 300 МПа.

Для встановлення товщини покриття, при якій частинки твердих крихких карбідів ущільнюються при пресуванні як пластичні матеріали, визначали відповідність експериментальних результатів першому і другому рівнянням М. Ю. Бальшина та Г. М. Ждановича, які були виведені для пресування пластичних матеріалів. Теоретичні рівняння пресування М. Ю. Бальшина і Г. М. Ждановича були перетворені таким чином, щоб характер пресування описувався прямою лінією (табл. 1).

Таблиця 1 – Вихідні і перетворені вирази рівнянь М. Ю. Бальшина та Г. М. Ждановича

Рівняння	Первинний вигляд	Після перетворення
1 Перше рівняння М. Ю. Бальшина	$\lg P = -L'(\beta - 1) + \lg \sigma_{кр}$	$(\beta - 1) = f(\lg \sigma_{кр} - \lg P) \cdot 1/L'$
2 Рівняння Г. М. Ждановича, перетворене Г. А. Меерсоном	$P = P_k \frac{\left[\left(\frac{\beta_0}{\beta}\right)^n - 1\right]}{[\beta_0^n - 1]}, n \approx 4$	$\left[\frac{\left(\frac{\beta_0}{\beta}\right)^n - 1}{\beta_0^n - 1}\right] = f(P)$

В результаті дослідження (рис. 1 та 2) вперше встановлено, що процес пресування порошків з пластичними покриттями при товщині покриття δ до 3 мкм не описується рівняннями, виведеними для пресування порошків пластичних металів, а при $\delta \geq 3$ мкм, не зважаючи на тверде високомодульне ядро з карбідів вольфраму чи кремнію,

процес пресування описується рівняннями М. Ю. Бальшина і Г. М. Ждановича у вигляді прямих, що характерно лише для пластичних матеріалів. Види покриття і ядра не значно впливають на характер процесу пресування: у всіх випадках при товщинах покриття 3 мкм і більше процес ущільнення в координатах рівнянь М. Ю. Бальшина і Г. М. Ждановича описується прямими лініями.

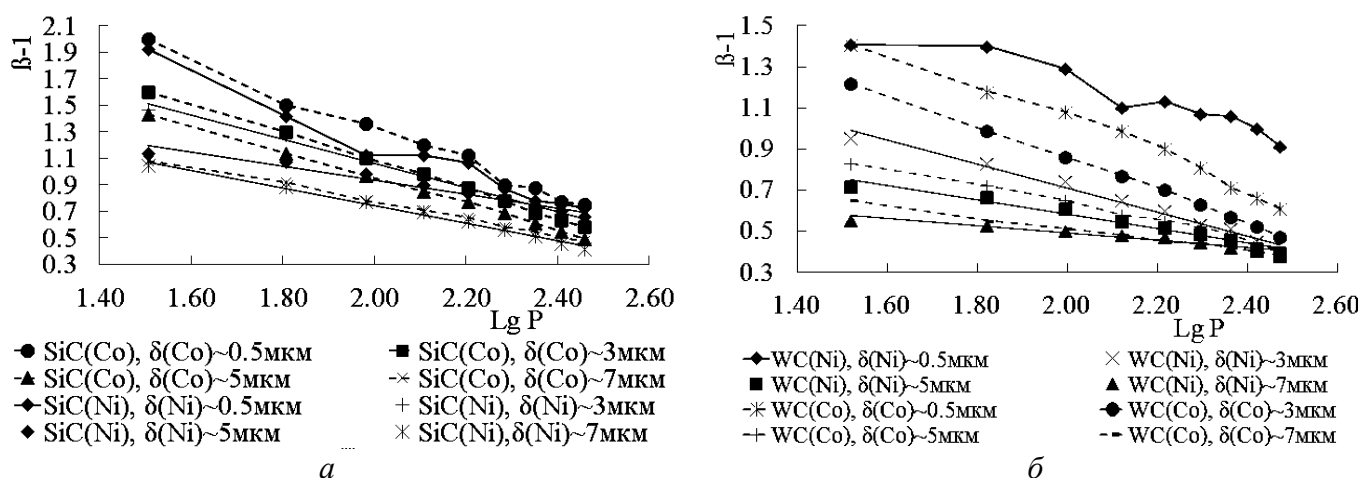


Рисунок 1 – Графіки відповідності першому рівнянню М. Ю. Бальшина експериментальних даних ущільнення порошків на основі SiC (а) чи WC (б) фракції 80/40 мкм з різною товщиною (0,5–7 мкм) покриття Ni чи Co

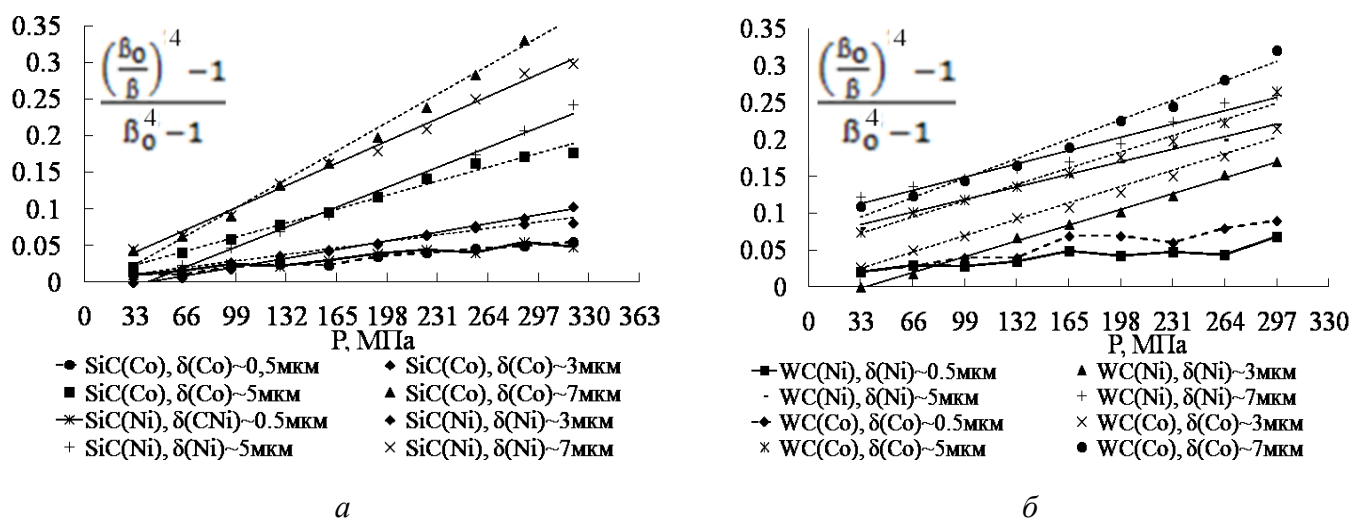
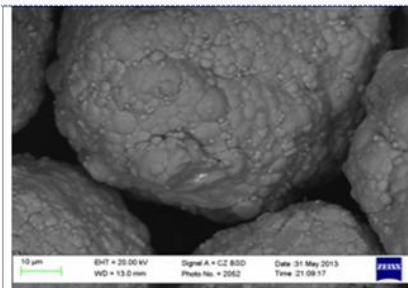


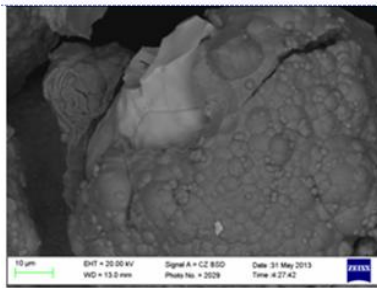
Рисунок 2 – Графіки відповідності рівнянню Г. М. Ждановича експериментальних даних ущільнення на основі SiC (а) чи WC (б) фракції 80/40 мкм з різною товщиною (0,5–7 мкм) покриття Ni чи Co

Процес пресування зразків з порошків на основі WC з пластичними покриттями проходить більш активно, ніж з порошків на основі SiC (див. рис. 1 та 2). Пористість зразків на основі WC становила 38–24 %, а для зразків на основі SiC 42–27 %, зменшуючись при збільшенні тиску пресування. Таке явище обумовлено тим, що карбід кремнію у порівнянні з карбідом вольфраму має більшу твердість, а частинки його порошку мають форму менш подібну до сферичної.

Зі збільшенням тиску пресування покриття на частинках карбідів починають руйнуватися при 300 МПа включно, а в подальшому інтенсивність їх руйнування збільшується (рис. 3). Встановлені закономірності дозволяють розраховувати тиск, необхідний для забезпечення заданої пористості пресовки лише після пресування при 2-х тисках.



a



б

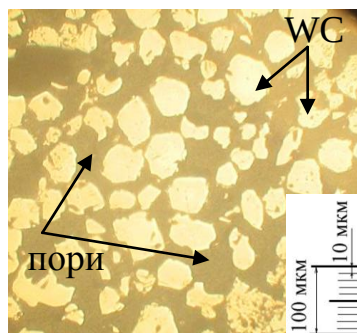
Рисунок 3 – Вигляд частинок WC(Ni) після пресування під різними тисками: *a* – 250 МПа; *б* – 300 МПа

Згідно з аналізом процесу пресування надалі дослідження процесу спікання проводили на зразках з товщиною покриття Co чи Ni 3 мкм, спресованих при тисках 30–250 МПа з пористістю 45–20 %.

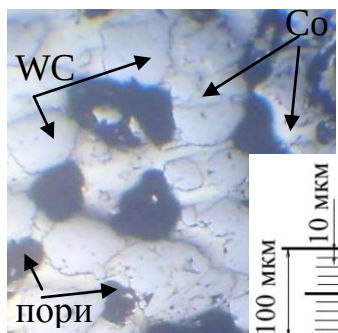
У четвертому розділі досліджено закономірності

ущільнення пресовок з надкрупнозернистих порошків високомодульних карбідів WC і SiC з покриттями (WC(Co) та WC(Ni)) при твердофазному та рідкофазному спіканнях.

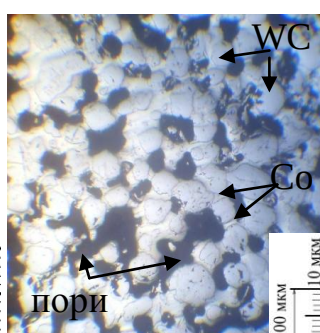
Вперше показано, що при твердофазному (1050 °C) спіканні зразків WC(Co) та WC(Ni) стохастична структура пресовок зберігається (рис. 4 а), а при рідкофазному (1340 °C) спіканні відбувається самочинна структуризація матеріалу з утворенням довгих ланцюжків, зв'язаних між собою місточками (рис. 4 б, в, г).



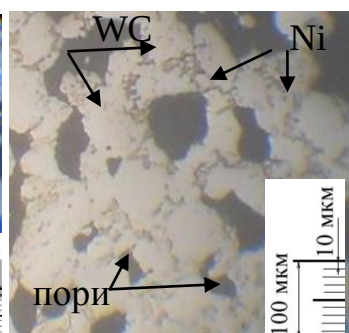
a



б



в



г

Рисунок 4 – Мікроструктури зразків, спечених:
a – WC(Co) при 1050 °C; *б, в* – WC(Co) при 1340 °C; *г* – WC(Ni) при 1340 °C

Розплавлений нікель або кобальт стягує частинки одна до одної за рахунок поверхневого натягнення, формуючи пористу скелетну структуру, і частково проникає в частинки по границях блоків. Усадка зразків при покритті як Co, так і Ni незначна і знаходиться в межах 4–8 % (по об'єму), бо утворюється скелетна структура.

Крім WC і металу зв'язки в композитах з надкрупнозернистих частинок WC інших фаз не виявлено, тобто вони, як і сплави з дрібними частинками WC, відповідають квазібінарному розрізу WC–Me, де Me є Co чи Ni, трикомпонентної системи W–C–Me. Ми назвали цей процес структуруванням, а композити структурованими. В таких композитах чітко видно, що пори не є міжчастинковими (див. рис. 4 б, в, г), а формуються ланцюжками і місточками. Всередині ланцюжків частинки щільно зв'язані одна з одною манжетами, а всередині частинок на деяких границях блоків розташовується зв'язка (Co або Ni). Було досліджено вплив тиску пресування на структуру композиту після спікання. При тиску пресування від 30 до 150 МПа пори сильно розгалужені. Зі збільшенням тиску пресування кількість та розмір пор зменшується. При тисках пресування 200–250 МПа більшість пор має розмір 20–40 мкм. Густина спечених у присутності рідкої фази зразків WC(Co або Ni) в залежності від тиску пресування в межах 200–250 МПа становить 8–10,5 г/см³, а

пористість 25–20 %. При спіканні зразків на основі SiC з покриттям Co чи Ni відбувається взаємодія Co і Ni з SiC, утворюючи крихкі силіциди навіть при твердофазному спіканні, що підтверджують рентгенограми спечених зразків (рис. 5). Незалежно від температури і середовища спікання (вакум, водень) на зразках після спікання помічено краплі пластичного сплаву, що свідчить про те, що рідка фаза є евтектичною, а кут змочування SiC нею більший ніж 90°. Густина зразків після спікання в залежності від тиску пресування становила: SiC(Co) 3,50–4,50 г/см³; SiC(Ni) 3,0–4,0 г/см³, а пористість 20–22 %.

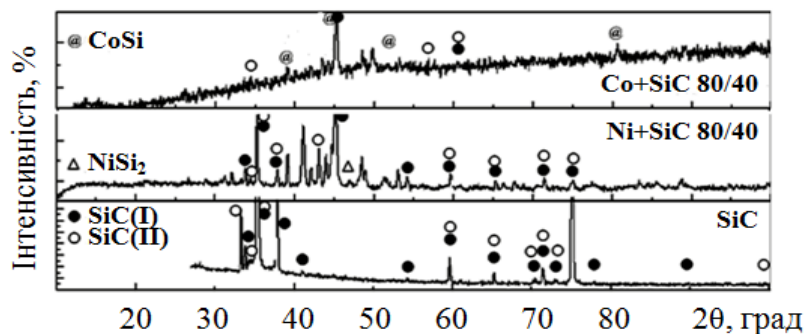


Рисунок 5 – Рентгенограми зразків вихідного SiC та зразків на основі SiC, покритого Co чи Ni, після спікання при 980 °C у водні

Для запобігання хімічної взаємодії між SiC та Co чи Ni, збільшення адгезії та утримання крупних зерен карбіду кремнію в композиті вирішено нанести на зерна SiC проміжне захисне покриття. На основі термодинамічного розрахунку в якості проміжного покриття було обрано карбід вольфраму, оскільки він хімічно не взаємодіє з карбідом кремнію і, як відомо, добре змочується кобальтом та нікелем (кут змочування дорівнює нулю). Покриття з WC повинно було мати невелику пористість, тому частинки SiC покривалися дрібнозернистим порошком WC (≤ 1 мкм) методом накатки. Товщина шару покриття становила 5 мкм. Отриманий порошок SiC з накатаним шаром WC пресували при тисках від 30 до 300 МПа. З рис. 6 (криві SiC(WC)) видно, що порошок SiC, покритий WC, пресується як крихкий матеріал, бо експериментальні дані не лежать на прямих лініях у відповідних координатах рівнянь М. Ю. Бальшина і Г. М. Ждановича.

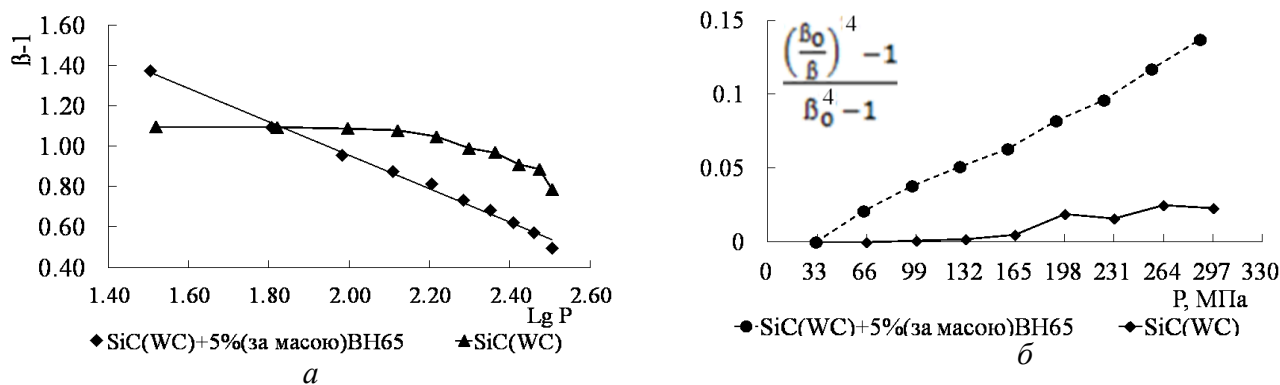


Рисунок 6 – Графіки відповідності рівнянням пресування :
а – М. Ю. Бальшина; б – Г. М. Ждановича

Добавка порошкової суміші BH65 надає порошку SiC(WC) поведінки пластичного матеріалу. Закономірність ущільнення при пресуванні SiC(WC) вже з додаванням 5 % (за масою) BH65 при тисках до 300 МПа, тобто до руйнування частинок SiC описується прямою лінією (див. рис. 6), тобто відповідає пресуванню пластичних матеріалів. Ці результати вказують на те, що не тільки покриття пластичним металом, а й добавка пластичного матеріалу, надають порошку крихкого матеріалу пластичної поведінки при пресуванні.

Дослідження показали, що при тисках більше 300 МПа покриття з WC на частинках SiC руйнуються, тому пресування дослідних зразків виконували при 200 МПа. Спінання зразків проводили при температурах 1370 °C і 1470 °C у середовищі водню. Металографічним аналізом встановлено, що температура спінання 1370 °C зразків із SiC(WC) є недостатньою для формування міцних зв'язків між частинками SiC(WC). Зерна SiC у процесі шліфування композиту частково випали з поверхні шліфа, що призвело до нерівномірного розподілу пористості на поверхні шліфа. У зразках, спечених при 1470 °C, у процесі шліфування лише поодинокі зерна SiC випадали з поверхні зразка. Рентгенографічним аналізом було встановлено, що нові фази в зразках SiC(WC) при температурах спінання 1370–1470 °C у водні не утворюються.

Для надання пластичних властивостей спеченому матеріалу, підвищення його міцності, тріщиностійкості та для покращення триботехнічних властивостей було виготовлено дослідну партію зразків на основі SiC(WC) з додаванням 5, 10, 20, 30 % (за масою) BN65. Спінання таких зразків проводили при температурі 1470 °C у водні, витримка становила 1 годину.

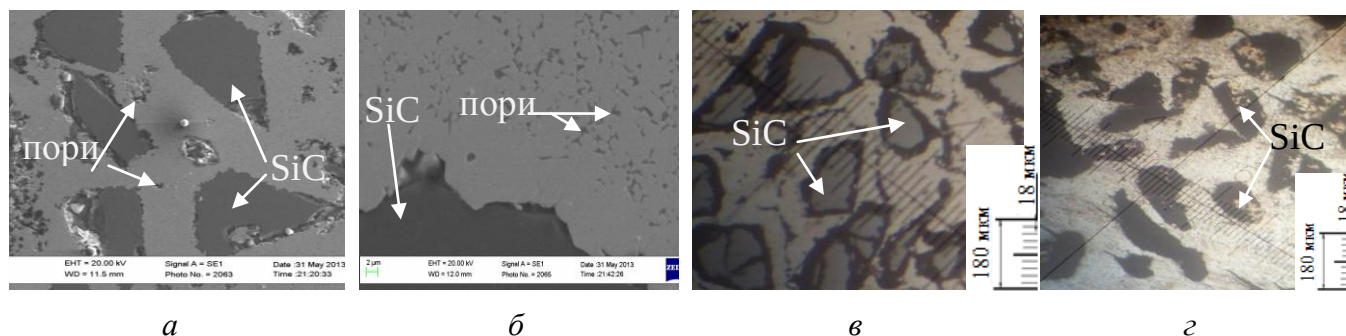


Рисунок 7 – Структури SiC(WC) з вмістом зв'язки BN65: а та б – 5 %; в – 10 %; г – 20 %

Густина зразків SiC(WC) зі зв'язкою BN65 від 5 до 30 % (за масою) збільшується від 5,5–9,8 г/см³ в залежності від кількості зв'язки. Об'ємна усадка після спінання для зразків SiC(WC) та SiC(WC) з 5 % та 10 % BN65 становила не більше 5 %, а для зразків з BN65 від 20 до 30 % (за масою) збільшувалася до 7 % (по об'єму). Із структури зразків SiC(WC) з 5 % BN65 (рис. 7 а, б) видно, що зерна SiC міцно зафіксовані в матриці матеріалу і в процесі шліфування не виламуються з поверхні шліфа. При збільшенні до х5000 (рис. 7 б) видно, що навколо зерен SiC, як і в зразках SiC(WC) без BN65, утворюється щільна оболонка з дрібних зерен WC, яка міцно фіксує зерна SiC (див. рис. 7 а, б). Пористість оболонки WC становить 2 %.

З рентгенограми (рис. 8) видно, що в зразках SiC(WC) з 5 % BN65 після спінання при 1470 °C у водні не утворилося жодних нових фаз, тобто покриття з WC ефективно захищає зерна SiC від взаємодії з нікелем. Такий же результат було отримано на зразках з 10 % BN65. При збільшенні BN65 до 20 та 30 % спостерігається утворення нової фази-силіциду нікелю Ni₃₁Si₁₂ (рис. 8), тобто збільшення концентрації BN65 до 20 % достатньо, щоб нікель мігрував до SiC крізь покриття з WC. Утворення крихкого силіциду нікелю призводить до зменшення міцності фіксації зерен SiC і підвищення крихкості композиту в цілому.

Згідно з металографічним та рентгенофазним аналізами можна зробити висновок, що кращим є матеріал з додавання зв'язки BN65 не більше 10 %, оскільки саме така пропорція гарантує ефективність захисного покриття з карбіду вольфраму. Досліджено розподіл та розмір пор в зразках і встановлено, що в даному матеріалі розмір пор складає 1–15 мкм, при цьому домінують дрібні пори. Пористість рівномірна

та складає 20–28 %. Для встановлення впливу структури на механічні характеристики, зразки з розроблених матеріалів було випробувано на міцність під час стискання, згинання та визначено коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} .

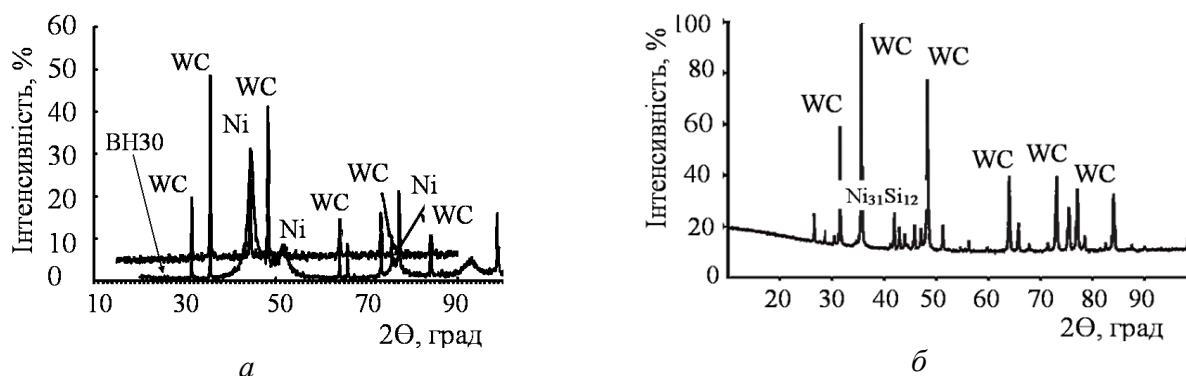


Рисунок 8 – Рентгенограми зразків на основі SiC(WC) з пластичною зв'язкою BN65 після спікання при 1470 °C у водні: *а* – 5 % (за масою) BN65; *б* – 30 % (за масою) BN65

У п'ятому розділі досліджено фізико-механічні властивості пористих композитів з надкрупнозернистих порошків карбідів WC і SiC. Наведені результати випробувань зразків з WC(Ni), WC(Co) та SiC(WC) зі зв'язкою BN65 після рідкофазного спікання були випробувані на міцність під час згинання, стискання та визначено критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (рис. 9–11). В матеріалах з пористою скелетною структурою на основі WC(Co) та WC(Ni) ($T_{сп} = 1340$ °C) міцність під час стискання була практично однаковою 723 МПа та 719 МПа відповідно (рис. 9 а). Основними факторами, що впливають на міцність такого композиту, є міцність крупних зерен WC і пористість.

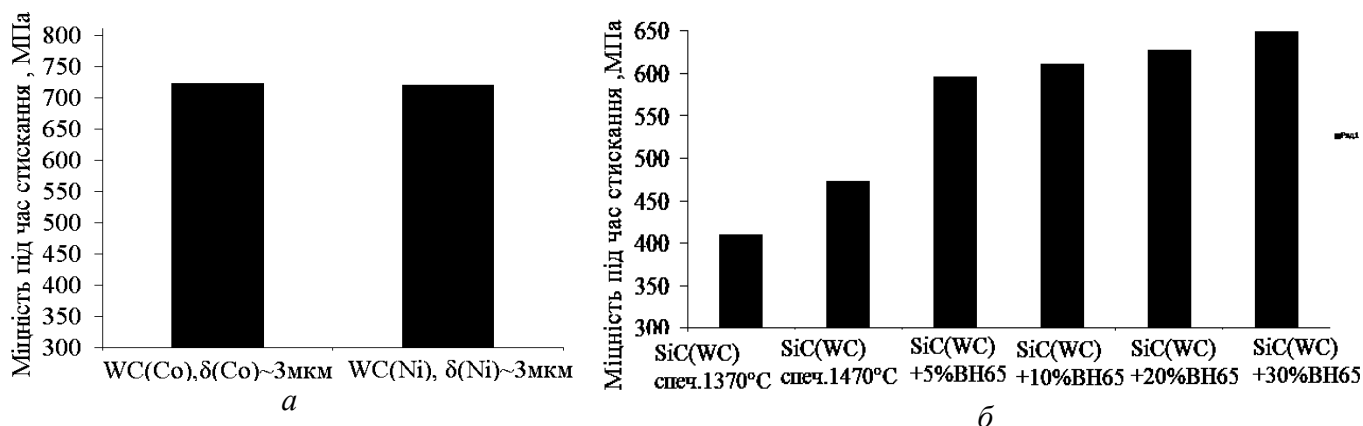


Рисунок 9 – Міцність під час стискання зразків на основі WC та SiC від типу і кількості пластичної зв'язки: *а* – WC зернистістю 80/40 мкм з покриттям з Ni та Co, де товщини покриття з Co і Ni ~3 мкм; *б* – SiC(WC) без та з пластичною зв'язкою BN65

Згідно з рис. 10 *а* композити на основі WC(Co) мають більший коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , ніж композит на основі WC(Ni). K_{IC} у розроблених матеріалів менший у порівнянні з відомим сплавом BK30, де K_{IC} становить до 14,4, проте густина BK30 на 20 % більша від густини розроблених матеріалів на основі WC(Co) і WC(Ni), через наявність у останніх пористості.

Для зразків на основі карбіду кремнію міцність під час стискання і згинання та K_{IC} при додаванні зв'язки BN65 різко зростають (див. рис. 9 б, 10 б, 11 б). При цьому міцність під час стискання наближається до міцності композитів на основі WC (див. рис. 9), але кількість зв'язки BN65 мало впливає на міцність при стиску. Коефіцієнт

інтенсивності напружень K_{IC} вже при додаванні 5 % (за масою) ВН65 зростає до 5,4, що вище ніж коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} у самозв'язаного карбіду кремнію, який становить приблизно 4,4.

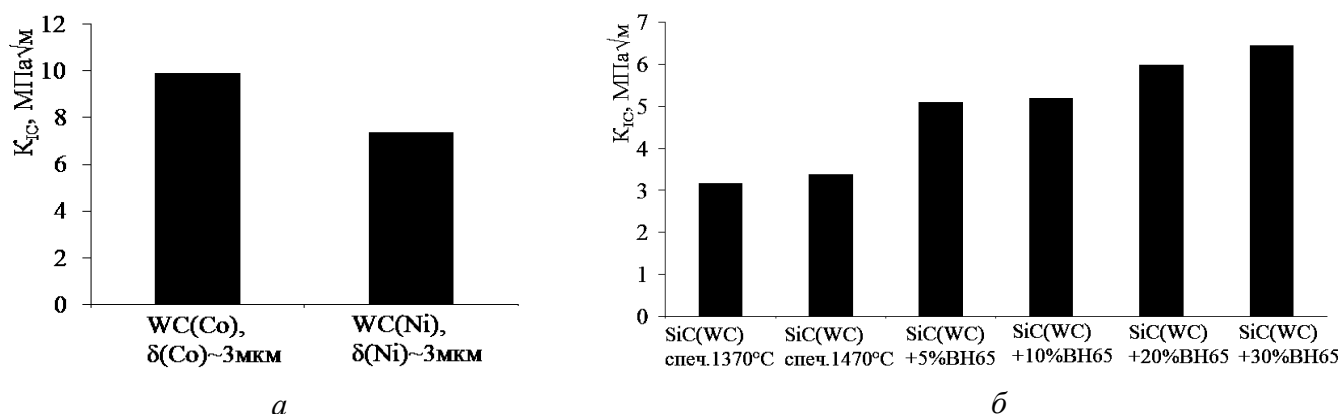


Рисунок 10 – Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} для зразків на основі: а – WC зернистістю 80/40 мкм з пластичним покриттям з Co та Ni, товщина покриття Co чи Ni складає 3 мкм; б – SiC(WC) без та зі зв'язкою ВН65

Міцність під час згинання (див. рис. 11 б) зростає в 1,16 рази зі збільшенням вмісту зв'язки з ВН65, майже досягаючи міцності під час згинання композитів на основі WC(Co) і WC(Ni). Тобто міцність під час згинання при збільшенні ВН65 збільшується інтенсивніше, ніж міцність під час стискання. Для зразків SiC(WC) без зв'язки ВН65 міцність під час згинання не була визначена, оскільки вони мали значну крихкість.

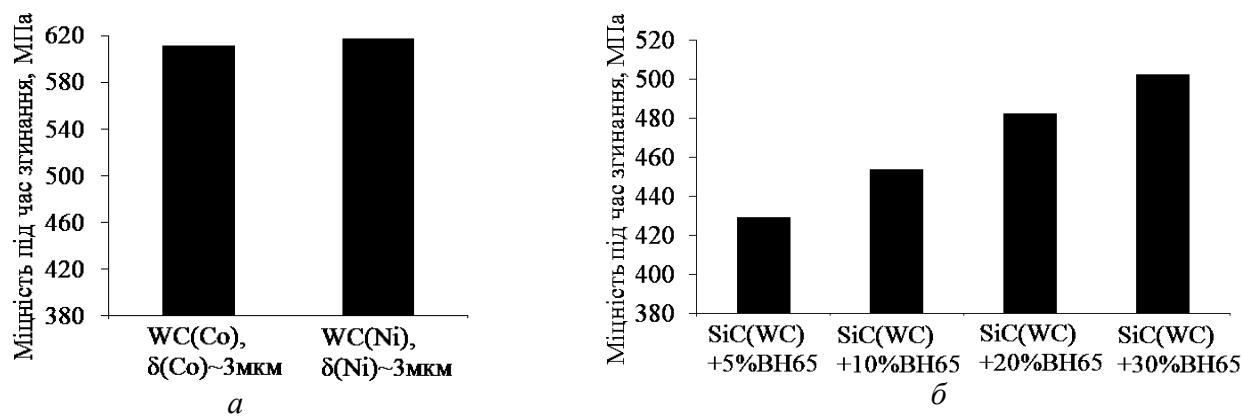
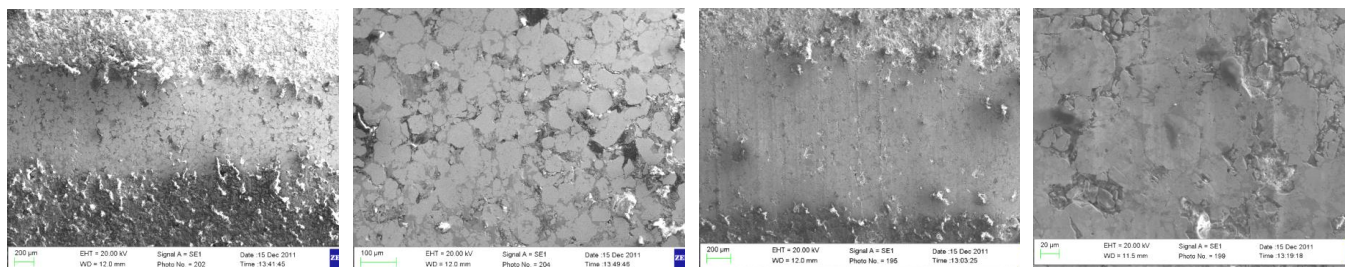


Рисунок 11 – Міцність під час згинання зразків на основі: а – WC зернистістю 80/40 мкм з пластичним покриттям з Co та Ni, товщина покриття Co чи Ni складає 3 мкм; б – SiC(WC) без та зі зв'язкою ВН65

У шостому розділі наведено результати випробувань отриманих композитів на тертя. Випробували зразки, які мали оптимальну структуру і міцність. Шлях тертя становив 10 км, швидкість 2 м/с, тиск від 15 до 100 МПа, середовище – водопровідна вода. Зразки, отримані спіканням пресовок з WC, покритого Ni і Co товщиною 3 мкм, мали пористість 25–20 %.

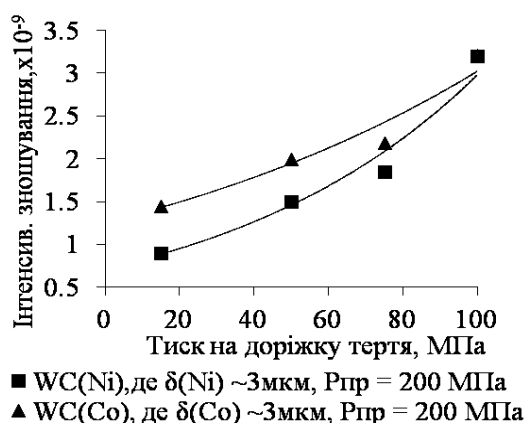
Для випробувань було обрано контртіло із стандартного сплаву ВН20, оскільки саме він найчастіше використовується у важко навантажених парах тертя. Етап припрацювання становив 1 км на швидкості 2 м/с та навантаженні 25 Н.



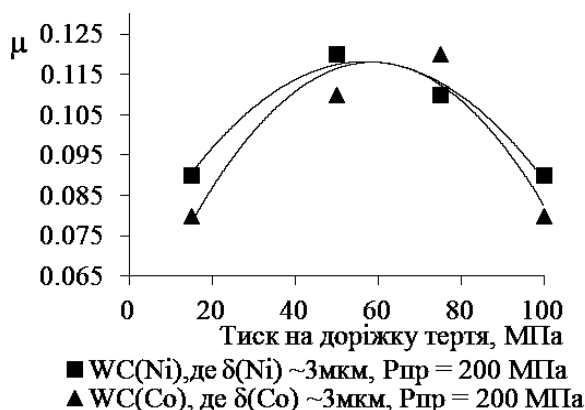
а б в з

Рисунок 12 – Доріжки тертя зразків на основі WC з покриттями пластичних металів Co чи Ni товщиною ~ 3 мкм, при різних збільшеннях: *а* та *б* – WC(Ni); *в* та *з* – WC(Co)

З рисунку 12 видно, що на поверхні доріжок тертя після завершення випробувань відсутні тріщини, раковини, місця схоплення.



а



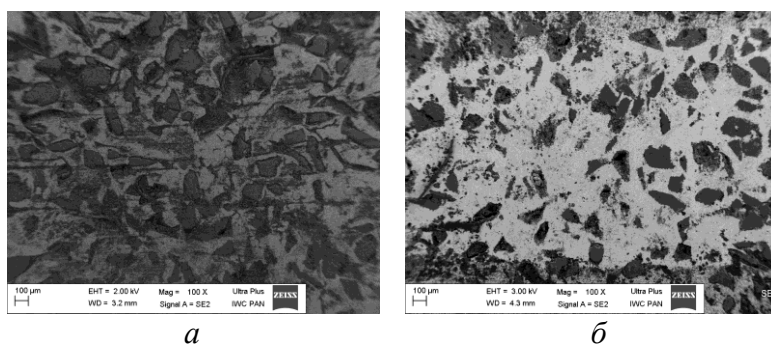
б

Рисунок 13 – Порівняння триботехнічних характеристик матеріалів на основі WC(Co) та WC(Ni): *а* – інтенсивності зношування зразків; *б* – коефіцієнта граничного тертя

З графіків залежностей інтенсивностей зношування від тиску на доріжку тертя видно, що для матеріалів на основі WC вид покриття на частинках і його вміст у композиті (до 28 % (за масою)) майже не впливають на триботехнічні властивості композиту (рис. 13 *а* та *б*). Зі збільшенням тиску інтенсивність зношування не значно зростає (від $1,0 \cdot 10^{-9}$ до $3,3 \cdot 10^{-9}$). Значення коефіцієнта тертя зі збільшенням тиску проходить через максимум, що ймовірно, пов'язано з формуванням на поверхні тертя тонких оксидних плівок, які не виявляються методами дослідження.

Зразки на основі SiC(WC) без та з додаванням різної кількості зв'язки BN65 (5, 10, 20, 30 %) були спресовані при 200 МПа та спечені при 1370 та 1470 °C у водні, витримка становила 1 годину.

З рисунку 14 видно, що на поверхні зразка SiC(WC), спеченого при 1370 °C, виникло безліч рисок та нерівностей, з поверхні доріжки тертя деякі зерна SiC випали. Набагато краще виглядає доріжка тертя SiC(WC), спеченого



а

б

Рисунок 14 – Зразки після триботехнічних випробувань при навантаженні 100 МПа, середовище водопровідна вода:

а – SiC(WC), спечений при 1370 °C, x500;

б – SiC(WC), спечений при 1470 °C, x500.

при 1470 °С, поверхня виглядає гладкою, лише поодинокі зерна SiC випали з поверхні зразка. Необхідна пористість, завдяки якій робоча рідина затримується на поверхні матеріалу, змашуючи та охолоджує її в процесі тертя, залишилася, і складає 10–20 %.

Коефіцієнт тертя зростає при збільшенні тиску на доріжку тертя (рис. 15). Для матеріалу, температура спікання якого становила 1470 °С, такі показники майже в 2 рази менші. Інтенсивність зношування (рис. 16) до 60 МПа майже не залежить від температури спікання, з поверхонь тертя видно, що при спіканні матеріалу при 1370 °С механізм зносу абразивний, тому що є подряпини. Деяка частина зерен SiC випала з поверхні. Для матеріалу, який спікався при 1470 °С, поверхня тертя гладка, механізм зносу втомний (механічний), тому кращою необхідно вважати температуру спікання 1470 °С.

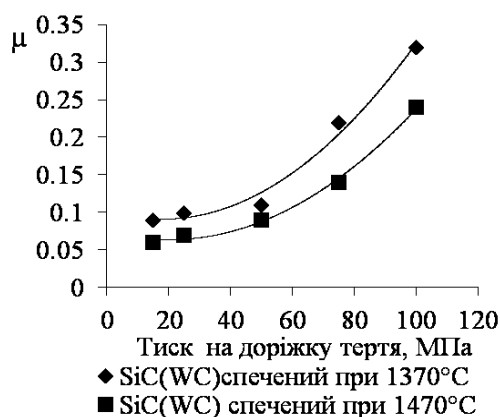


Рисунок 15 – Графік залежності коефіцієнта тертя від тиску на доріжку тертя

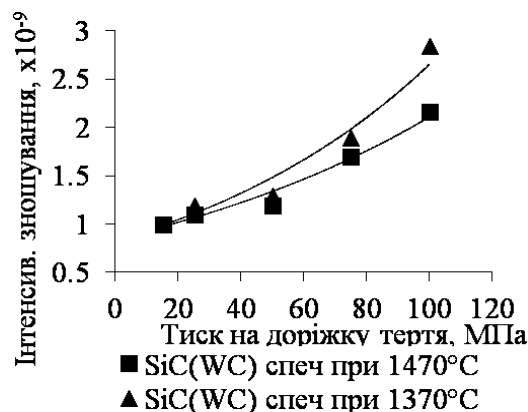


Рисунок 16 – Порівняння інтенсивності зношування зразків на основі SiC

Для матеріалів на основі SiC(WC) з різним вмістом зв'язки ВН65 (рис. 17 а, б) видно, що триботехнічні характеристики значно залежать від вмісту зв'язки. Найкращі характеристики має матеріал на основі SiC(WC) з 5 % (за масою) ВН65. Зі збільшенням кількості зв'язки коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу зростають, ймовірно за рахунок розвитку процесу мікросхоплення з пластичною зв'язкою ВН65. Зерна SiC міцно зафіксовані на поверхні матеріалу. При збільшенні навантаження в процесі випробування коефіцієнт тертя зменшується (див. рис. 17 а), що характерно для твердосплавних матеріалів, які добре витримують високі навантаження. Пластична складова зв'язки ВН65 частково розмазується по поверхні тертя, відіграючи роль мастила. Завдяки наявності пор у матеріалах на поверхні тертя залишається робоча рідина (вода, керосин), що зменшує знос матеріалу та охолоджує його. Температура при терті для матеріалів з 5, 10, 20 % ВН65 складала до 40 °С, для матеріалу з 30 % ВН65 зростала до 70 °С.

З поверхонь зразків SiC(WC) зі зв'язкою ВН65 (рис. 18) видно, що зі збільшенням пластичної зв'язки, починаючи з 10 % на поверхні матеріалу після випробування з'являються тріщини, поверхня крупних зерен SiC роздрібнена, через високий коефіцієнт тертя, лише матеріал з 5 % ВН65 має гладку поверхню. З результатів рентгеноспектрального аналізу вказаних поверхонь тертя можна зробити висновок, що в процесі тертя жодних вторинних структур не утворюється. Окрім основних компонентів матеріалу, таких як Si, C, W, Ni, було виявлено у невеликій кількості Fe, Co, Ca, що входять до складу водопровідної води і залишилися на доріжці тертя після висихання. Отже можна зробити висновок, що механізм зносу даного матеріалу – механічний. Зі збільшенням навантаження в процесі тертя пластична складова з ВН65 розмазується по поверхні доріжки тертя, зменшуючи таким чином коефі-

цієнт тертя та знос матеріалу. У всіх випадках на поверхні матеріалів залишаються відкриті мікропори, завдяки яким утримується робоча рідина.

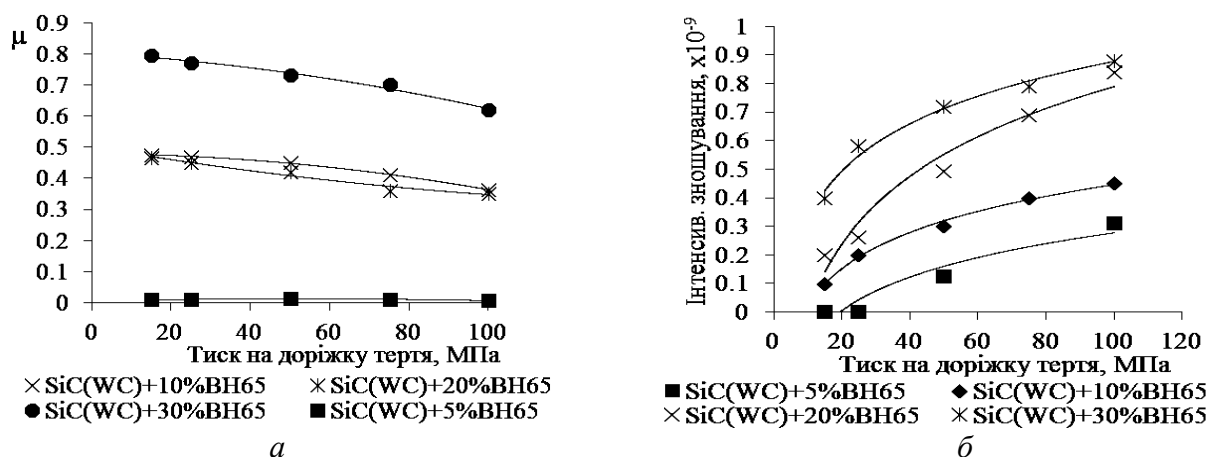


Рисунок 17 – Графік залежності триботехнічних показників від тиску для зразків на основі SiC(WC) з різним вмістом BN65: *а* – коефіцієнта тертя; *б* – інтенсивності зношування

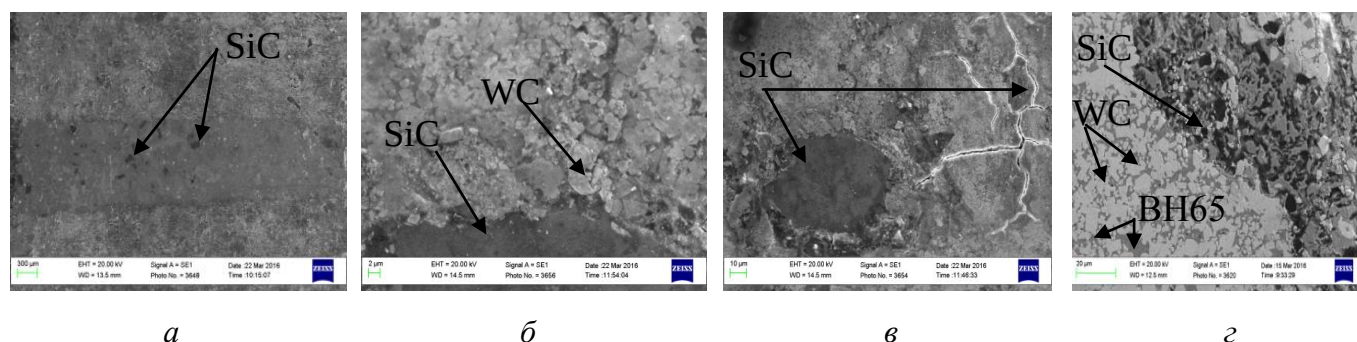


Рисунок 18 – Поверхня зразків після триботехнічних випробувань при навантаженні 100 МПа, середовище водопровідна вода: *а* – SiC(WC)+5 % BN65; *б* – SiC(WC)+10 % BN65; *в* – SiC(WC)+20 % BN65; *г* – SiC(WC)+30 % BN65.

Аналізуючи графіки залежностей інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя від тиску (див. рис. 17 *а*, *б*), можна зробити висновок, що кращим є матеріал на основі SiC(WC) з 5 % зв'язки BN65. При номінальних тисках від 15 до 100 МПа та швидкості обертання контртіла 2 м/с коефіцієнт тертя становить $\mu=0,007\text{--}0,009$, інтенсивність зношування $I=1,0\text{--}4,5 \cdot 10^{-10}$, хоча його міцність під час згинання дещо (в 1,16 рази) менша від композиту з 30 % зв'язки BN65.

При дослідженні контртіла з BN20 після триботехнічних випробувань було виявлено деякі нерівності поверхні, проте тріщин та задирів не було зафіксовано. Шлях тертя становив більше 70 км при зміні тиску від 15 до 100 МПа.

За результатами дисертаційної роботи розроблено технологічну інструкцію по виготовленню матеріалу на основі SiC(WC) з 5 % зв'язки BN65 та проведено дослідно-виробничу перевірку деталей пар тертя підп'ятників з розробленого матеріалу в умовах ДП «Завод № 410 ЦА» при режимах, що відповідають нормальним та екстремальним умовам експлуатації паливного насоса агрегату 934 двигуна Д36 при нормальному та обмеженому змащуванні гасом ТС-1. Випробування показали, що коефіцієнт граничного тертя становить 0,0001, а інтенсивність зношування $2 \cdot 10^{-4}$ мкм/км, що перевищує зносостійкість серійного підп'ятника з олов'янистої бронзи в 3–3,5 разів, який використовується в паливному насосі агрегату 934 двигуна Д 36.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень в рамках дисертаційної роботи вирішено важливе науково-технічне завдання по одержанню високоефективних триботехнічних композитів з надкрупнозернистих порошків високомодульних карбідів шляхом встановлення закономірностей формування структури і властивостей пористих композитів з надкрупнозернистих порошків карбідів WC і SiC зі зв'язками з пластичних металів і сплавів, що дозволило розробити ефективну технологію виготовлення деталей пар тертя і визначити ефективні умови їх роботи.

1. Встановлено, що порошки з високомодульних надкрупнозернистих карбідів WC та SiC, покритих пластичними Co, Ni, та з додаванням зв'язки BN65 ведуть себе в процесі пресування як пластичні матеріали вже при товщині покриття пластичним металом ≥ 3 мкм і вмісту зв'язки BN65 з 5 % (за масою), а закономірності їх ущільнення при пресуванні описуються рівняннями пресування М. Ю. Бальшина і Г. М. Ждановича, які були теоретично виведені для опису процесу пресування порошків пластичних металів.

2. Критичним тиском пресування є 300 МПа, оскільки вже при 300 МПа починається руйнація пластичного покриття на частинках зерен SiC і WC. Зі збільшенням розміру зерен основи SiC відносний об'єм пресовок та вплив товщини покриття зменшуються. Пористість пресовок зі збільшенням тиску зменшується від 45 до 20 %.

3. Спінання деталей з розроблених матеріалів на основі WC(Co чи Ni) необхідно проводити при рідкофазному спіканні при температурі 1340 °C для досягнення скелетної структури матеріалу та міцного зв'язку між частинками. Залишкова пористість після спікання становить 25–20 %.

4. Спінання деталей матеріалів на основі SiC(WC) з BN65 необхідно проводити при рідкофазному спіканні при температурі 1470 °C для досягнення міцного зв'язку між частинками, при цьому залишкова пористість після спікання становить 28–20 %.

5. Покриття з пластичних металів Co чи Ni на частинках SiC є не ефективним, оскільки в процесі спікання утворюються крихкі силіциди металів. Для ліквідації взаємодії SiC з розплавленим металом зв'язки необхідно покривати частинки SiC тонким (5 мкм) шаром WC.

6. Зі збільшенням кількості зв'язки BN65 від 5 до 30 % (за масою) механічні характеристики, такі як коефіцієнт інтенсивності напружень, міцність під час згинання та стискання, збільшуються, а триботехнічні (коефіцієнт тертя та інтенсивність зносу) погіршуються. Найкращі механічні та триботехнічні характеристики має композит SiC(WC) з 5 % (за масою) BN65. При тиску від 15 до 100 МПа та швидкості обертання контртіла 2 м/с коефіцієнт тертя становить $\mu=0,007-0,009$, інтенсивність зносу $I=1,0-4,5 \cdot 10^{-10}$, міцність під час згинання 430 МПа, а під час стискання 600 МПа, $K_{IC}=5,4 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

7. Завдяки пористій структурі розробленого матеріалу робоча рідина утримується на поверхні тертя, змащуючи і охолоджуючи трибопару в процесі експлуатації, тому температура в зоні тертя не перевищує 70 °C.

8. Результати дисертаційної роботи пройшли дослідно-виробничу перевірку в умовах ДП «Завод № 410 ЦА». В результаті досліджень вирішено задачу щодо розробки зносостійких композиційних матеріалів для підп'ятників, насосу високого тиску агрегату 934 авіадвигуна Д36. Розроблений матеріал рекомендовано для роботи при нормальних та аварійних (відказ у подачі палива, підвищення тиску)

умовах паливного насосу агрегату 934 двигуна ДЗ6. Зносостійкість деталей пар тертя з розробленого матеріалу в 3–3,5 рази перевищує зносостійкість серійних підп'ятників з олов'янистої бронзи.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Видання, що внесені до переліку наукометричних баз:

1. Bondarenko V. P. Recent researches on the metal-ceramic composites based on the decamicron-grained WC / V. P. Bondarenko, I. V. Andreyev, I. V. Savchuk, O. O. Matviichuk, **O. V. Ievdokymova**, A. V. Galkov// International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2013. – V. 39. – P. 18–31. *Автором було проведено дослідження поверхні декамікронних частинок WC без покриття та з покриттями пластичних металів. Досліджено вплив покриття з пластичних металів на частинках WC на процес пресування, спікання та механічні властивості композиту.*

2. Бондаренко В. П. Влияние вида покрытия на удержание частиц SiC в композите в процессе его шлифования / Бондаренко В. П., **Евдокимова О. В.**, Матвийчук А. А., Дуда Т. М. // Порошковая металлургия. – 2016. – № 5/6. – С. 147–160. *Дисертантом було досліджено вплив виду покриття та виду спікання композиту на основі SiC на структуроутворення в процесі спікання композиту та на утримання зерен SiC при шліфуванні виробів.*

Фахові видання:

1. Евдокимова О. В. Влияние количества связки из ВН65 на триботехнические свойства композита на основе SiC(WC) / **Евдокимова О. В.**, Данилов А. П. // Сучасна спеціальна техніка. – 2016. – № 2 (45). – С. 109–114. *Дисертантом було проведено системне дослідження та обґрунтовано оптимальну кількість зв'язки з ВН65 для композиту на основі SiC(WC).*

2. Бондаренко В. П. Влияние количества связки из ВН65 на удержание частиц SiC в композите при шлифовании / Бондаренко В. П., **Евдокимова О. В.**, Матвийчук А. А. // Порошковая металлургия и металлообработка: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2016. – Вып. 19. – С. 391–395. *Автором було досліджено вплив кількості зв'язки з ВН65 на надійність захисного покриття з дрібнозернистого WC на частинках SiC.*

3. Новіков М. В. Патент України на винахід № 104670. Спосіб виготовлення самоструктурованого металокерамічного матеріалу триботехнічного призначення / Новіков М. В., Бондаренко В. П., **Євдокимова О. В.**, Матвійчук О. О. // Бюл. № 4 від 25.02.2014. *Автором було розроблено, випробувано та описано новий високоефективний триботехнічний матеріал. Рішенням спецради Д 26.230.01 (протокол № 13 від 16.11.2016) відповідно до п. 2.2 наказу МОН України № 1112 від 17.10.12 про опублікування результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата та доктора технічних наук, патент включено до списку фахових публікацій, оскільки він стосується безпосередньо результатів дисертаційної роботи.*

Патенти:

1. Новіков М. В. Патент України на корисну модель № 78298. Спосіб виготовлення самоструктурованого металокерамічного матеріалу триботехнічного призначення / Новіков М. В., Бондаренко В. П., **Євдокимова О. В.**, Матвійчук О. О. // Бюл. № 5 від 11.03.2013. *Автором було розроблено, випробувано та описано новий високоефективний триботехнічний матеріал.*

Роботи апробаційного характеру:

1. Новіков Н. В. Влияние толщины пластичных покрытий на закономерности уплотнения при прессовании крупных порошков карбидов вольфрама и кремния /

Новиков Н. В., Бондаренко В. П., **Евдокимова О. В.**, Матвейчук А. А., Верзун С. Н. // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 12–14 сент. 2012 г.). – Минск: Беларусь. Навука, 2012. – С. 97–100). *Автором було проаналізовано вплив товщини пластичного покриття на закономірності пресування.*

2. Бондаренко В. П. Триботехнические характеристики пористых композитов на основе частиц крупнозернистого карбида вольфрама / В. П. Бондаренко, М. В. Кідрачук, **О. В. Евдокимова**, А. А. Матвейчук, А. П. Данилов // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования. II Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых ИММС НАН Беларуси, Гомель 2–4 октября 2012 г. – С. 93–95. *Автором було розроблено та виготовлено дослідну партію зразків з нового матеріалу триботехнічного призначення, проаналізовано вплив складу і структури композитів на триботехнічні характеристики матеріалу.*

3. Новиков Н. В. Структурированные пористые композиционные материалы из крупнозернистых частиц карбида вольфрама WC, покрытых упругопластическими прослойками / Новиков Н. В., Бондаренко В. П., Головчан В. Т., **Машкова О. В. (Евдокимова О. В.)**, Матвейчук А. А., Данилов А. П. // Порошковая металлургия. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2012. – № 35. – С. 126–135. *Дисертантом було досліджено процес структуроутворення розробленого композиційного матеріалу в процесі пресування та спікання.*

4. Новиков Н. В. Новые композиты триботехнического назначения / Н. В. Новиков, В. П. Бондаренко, **О. В. Машкова**, А. А. Матвейчук // Сучасні проблеми трибології: Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 19–21 травня 2010 року). – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2010. – С. 24. *Автором було виготовлено дослідну партію зразків, проаналізовано та досліджено оптимальний склад розробленого матеріалу.*

5. Машкова О. В. (Євдокимова О. В.). Триботехнические характеристики порошковых материалов системы WC / **Машкова О. В.**, Данилов А. П. // Політ: матеріали XII Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених. – К.: НАУ, 2012. *Дисертантом було виготовлено дослідну партію зразків та досліджено вплив виду спікання на триботехнічні властивості матеріалу на основі WC з пластичними покриттями з Co, Ni.*

АНОТАЦІЯ

Євдокимова О. В. Закономірності формування структури і властивостей високоефективних триботехнічних композитів з надкрупнозернистих порошків високомодульних карбідів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ, 2016 р.

Дисертація присвячена вирішенню важливого науково-технічного завдання по одержанню високоефективних триботехнічних композитів з надкрупнозернистих порошків високомодульних карбідів шляхом встановлення закономірностей формування структури і властивостей пористих композитів з надкрупнозернистих порошків карбідів WC і SiC зі зв'язками з пластичних металів і сплавів, що дозволило розробити ефективну технологію виготовлення деталей пар тертя і визначити ефективні умови їх роботи.

Встановлено, що покриття надкрупнозернистих WC і SiC кобальтом чи нікелем дозволяє забезпечувати тиск пресування брикетів без руйнування частинок WC і SiC від 30 до 250 МПа і отримувати пресовки з пористістю від 45 до 20 % відповідно. Для ліквідації хімічної взаємодії розплавленого металу зв'язки з SiC частинки SiC необхідно покривати тонким (5 мкм) шаром WC та для збільшення міцнісних зв'язків між частинками необхідно додавати зв'язку BN65 у кількості від 5 до 10 % (за масою). Вперше встановлено явище самочинної структуризації композиту при рідкофазному спіканні надкрупнозернистого WC, покритого Co чи Ni, при якому утворюється міцна пориста скелетна структура, придатна для ефективного використання в якості високонавантаженого антифрикційного матеріалу.

Випробування деталей пар тертя з розробленого матеріалу на основі SiC(WC) з 5 % (за масою) BN65 проводили в умовах ДП «Завод № 410 ЦА», які засвідчили, що зносостійкість деталей з розробленого матеріалу перевищують зносостійкість серійного під'ятника з олов'янистої бронзи в 3–3,5 разів, яка використовується в паливному насосі агрегату 934 двигуна Д36.

Ключові слова: структура композиту, триботехнічний композит, порошки високомодульних карбідів, пористі композити, покриття.

АННОТАЦИЯ

Евдокимова О. В. Закономерности формирования структуры и свойств высокоэффективных триботехнических композитов из надкрупнозернистых порошков высокомодульных карбидов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев, 2016 г.

Диссертация посвящена решению важного научно-технического задания по получению высокоэффективных триботехнических композитов из надкрупнозернистых порошков высокомодульных карбидов путем установления закономерностей формирования структуры и свойств пористых композитов с надкрупнозернистых порошков карбидов WC и SiC со связками с пластичных металлов и сплавов, что позволило разработать эффективную технологию изготовления деталей пар трения и определить эффективные условия их работы.

Установлено, что порошки из высокомодульных надкрупнозернистых карбидов WC и SiC, покрытых пластическими Co, Ni, и с добавлением связки BN65 ведут себя в процессе прессования как пластические материалы уже при толщине покрытия пластичным металлом ≥ 3 мкм и содержании связки BN65 – 5 % (по массе), а закономерность их уплотнения при прессовании описывается уравнениями прессования М. Ю. Бальшина и Г. М. Ждановича, которые были теоретически выведены для описания процесса прессования порошков пластичных металлов.

Показано, что покрытие надкрупнозернистых WC и SiC кобальтом или никелем позволяет обеспечивать давление прессования брикетов без разрушения частиц WC и SiC от 30 до 250 МПа и получать пресовки с пористостью от 45 до 20 % соответственно. Покрытие из пластичных металлов Co или Ni на частицах SiC является не эффективным, поскольку в процессе спекания образуются хрупкие силициды металлов. Для ликвидации взаимодействия расплавленного металла связки с SiC, частицы SiC необходимо покрывать тонким (5 мкм) слоем WC и для увеличения прочностных

связей между частицами необходимо добавлять связку ВН65 в количестве от 5 до 10 % (по массе).

Впервые установлено явление самовольной структуризации композита при жидкофазной спекании надкрупнозернистого WC, покрытого Co или Ni, при котором образуется прочная пористая скелетная структура, пригодная для эффективного использования в качестве высоконагруженного антифрикционного материала. Благодаря пористой структуре разработанного материала рабочая жидкость удерживается на поверхности трения, смазывая и охлаждая трибопару в процессе эксплуатации.

Испытания деталей пар трения из разработанного материала проводились в условиях ГП «Завод № 410 ЦА» при режимах, соответствующих нормальным и экстремальным условиям эксплуатации топливного насоса агрегата 934, при нормальном и ограниченном смазывании керосином ТС-1. Испытания показали, что коэффициент граничного трения превышает износостойкость серийного подпятника с оловянистой бронзы в 3–3,5 раза, используемой в топливном насосе агрегата 934 двигателя Д 36.

Ключевые слова: структура композита, триботехнический композит, порошки высокомодульных карбидов, пористые композиты, покрытия.

THE SUMMARY

Ievdokymova O. V. Regularities of formation of structure and properties of highly efficient tribotechnical composites from super coarse-grained high-modulus carbide powders. – The manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, speciality 05.02.01 – material sciences. V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The dissertation is devoted to solving important scientific and technical problem in obtaining highly efficient tribotechnical composites from super coarse-grained high-modulus carbide powders by identification of structure and properties of porous composites from super coarse-grained carbides WC, SiC powders with relations of plastic metals and alloys, which allowed to develop an effective manufacturing technology of the friction pairs parts and identify effective conditions of their work.

It was found that covering the super coarse-grained WC and SiC by cobalt or nickel can provide pressing of pressed samples without destroying of the WC and SiC particles at 30 to 250 MPa and get pressed samples with porosity between 45 and 20 % respectively. To eliminate chemical interaction of molten metal the links with WC the particles of SiC should be covered with a thin (5 mkm) layer of WC and to increase strength of bonds between the particles the bunch TN65 in amount of 5 to 10 % (by weight) must be added in.

The first time the phenomenon of spontaneous structuring of composite at the liquid phase sintering of super coarse-grained WC, coated with Co or Ni, in which the porous strong skeletal structure is formed suitable for use as an effective high-loaded antifriction material.

Tests of friction pairs parts from the developed material based on SiC (WC) 5 % (by weight) TN65 was carried out at the conditions of SE "Plant number CA 410" which have shown that the wear resistance of parts of the developed material exceeds the wear resistance of serial bearing made from tin bronze in 3–3.5 times which is used in the fuel pump unit 934 of the motor D36.

Keywords: composite structure, tribotechnical composite, powders of high-modulus carbide, porous composites, coatings.

Підписано до друку 13.12.2016 р. Формат 60х90/16. Папір офсет № 1.
Друк офсет. Ум. друк. арк. 1,2. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100. Зам. 3365.

Друк «ІВЦ АЛКОН»
04074, м. Київ-74, вул. Автозаводська 2, тел./факс: (044) 430-82-47
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 987 від 22.07.2002 р.