

**В. А. Мечник¹, М. О. Бондаренко¹, доктори технічних наук;
В. М. Колодніцький, канд. фіз.-мат. наук;
Д. Л. Коростишевський, Н. Ф. Пошванюк¹, інженери**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ,
e-mail: bond@ism.kiev.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СПЛАВІВ WC-Co і WC-Co-ZrO₂, СФОРМОВАНИХ МЕТОДОМ ІСКРО-ПЛАЗМОВОГО СПІКАННЯ

Представлено порівняльне дослідження зносостійкості трьох різних зразків композиційних матеріалів: 94WC-6Co, 90,24WC-5,76Co-4ZrO₂ та 84,60WC-5,4Co-10ZrO₂. Композити виготовлено методом іскро-плазмового спікання. Експерименти з вивчення зносостійкості проведено за кімнатної температури на випробувальному стенді фірми Optimol Instruments Prüftechnik GmbH в режимі зворотно-поступального тесту за ковзного сухого контакту кулькою з Al₂O₃, що коливається з частотою 50 Гц під навантаженням 20 Н. Виявлено значні відмінності між трьома композитами, причому зразок композита з високою концентрацією ZrO₂ має більш високу зносостійкість порівняно з композитами з меншою концентрацією ZrO₂ і з композитом без ZrO₂. Показано, що композити 90,24WC-5,76Co-4ZrO₂ і 84,60WC-5,4Co-10ZrO₂, виміряні за навантаження 20 Н, демонструють значно нижчі швидкості зносу ($3,772 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1}/(\text{Н} \cdot \text{м})$ і $1,485 \pm 0,149 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1}/(\text{Н} \cdot \text{м})$ відповідно), ніж композит 94WC-6Co ($0,92$ і $7,344 \pm 0,808 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1}/(\text{Н} \cdot \text{м})$).

Ключові слова: композит, карбід вольфраму, кобальт, діоксид цирконію, концентрація, зносостійкість, іскро-плазмове спікання.

Вступ

Композиційні матеріали на основі WC-Co-сплавів завдяки високим механічним та експлуатаційним властивостям застосовуються у різних галузях промисловості і техніки. Їхні пружний стан і трибологічні характеристики є предметом фундаментальних досліджень, спрямованих на розуміння їхньої продуктивності в різних умовах. Забезпечення довговічності, міцності та надійності інструментів, виготовлених на основі WC-Co-сплавів, досягаються насамперед вирішенням питань, пов'язаних з дослідженням залежності цих характеристик від фізико-механічних і трибологічних властивостей, способу та умов випробування [1]. Дослідженню фізико-механічних властивостей цих сплавів присвячені чисельні роботи. В [2] показано, що зі збільшенням вмісту ультрадисперсного WC середній розмір зерна твердих сплавів 94 % WC-6 % Co (тут і далі по тексту склад сплаву наведено у % (за масою)) спочатку збільшується, а потім зменшується. Там само було показано, що коефіцієнт тертя і швидкість зносу твердих сплавів досягають найменших значень, коли вміст ультрадисперсного WC становить 15 %. Виявлено [3], що збільшення вмісту Cr₃C₂ і VC у складі композита WC-6Co привело до зменшення зерна з одночасним підвищенням його твердості. В [4] встановлено, що додавання наноксиду алюмінію (Al₂O₃) у кількості 0,5 % до складу композита WC-8Co, спеченого методом порошкової металургії, забезпечило зменшення зерна WC з одночасним збільшенням його твердості та в'язкості руйнування. В [5] показано, що значення твердості, в'язкості руйнування і міцності наноструктурних композитів WC-Co значно перевищують аналогічні показники мікроструктурних композитів. Досліджено [6] вплив методу приготування порошку та температури спікання на властивості твердих сплавів WC-8Co. Там було виявлено, що за температури спікання 1250 °C твердий сплав, спечений з порошку, змішаного методом ультразвукової вібрації, демонстрував однорідну мікроструктуру та підвищені механічні властивості. В [7] досліджено трибологічні характеристики композита WC-Co в умовах

зворотно-поступального тертя в залежності від концентрації Co і розмірів WC. Було виявлено кореляцію між зносостійкістю та коефіцієнтом тертя, з одного боку, та розмірами вихідних речовин і параметрами випробувань, з іншого. Встановлено [8], що максимальні значення щільності (~ 99,6 %) і твердості за Віккерсом (~ 1400) композита 94WC–6Co, сформованого методом іскро-плазмового спікання (ІСП), досягаються за температури 1200 °C.

Враховуючи чудові (підвищені в'язкість руйнування, міцність, твердість, корозійну стійкість, температуру плавлення) властивості діоксиду цирконію ZrO_2 за високих температур [9], в останні роки його широко використовують як зміцнюючу добавку у виробництві композиційних матеріалів. Крім того, діоксиду цирконію властивий трансформаційний механізм зміцнення [10], обумовлений фазовим переходом тетрагональної фази $t-ZrO_2$ (метастабільної за кімнатної температури) в термодинамічно стійку моноклінну фазу $m-ZrO_2$. Такий перехід супроводжується зміною питомого обсягу зазначених фаз і виникненням стискаючих механічних напруг, що гальмують поширення тріщин. Для стабілізації тетрагональної фази $t-ZrO_2$ за кімнатної температури використовують Y_2O_3 [11]. Додавання в невеликій кількості Y_2O_3 до композита WC–Co дозволило подрібнити зерна WC з одночасним підвищенням його твердості та в'язкості руйнування [12].

В [13] досліджено вплив добавки мікропорошку ZrO_2 на фазоутворення і структуру композита 94WC–6Co, сформованого методом іскро-плазмового спікання. Там було встановлено, що сформований композит 94WC–6Co складається з гексагональної фази WC з параметрами решітки $a = 0,2906$ нм, $c = 0,2837$ нм, фази Co_3W_3C ($a = 1,1112$ нм), гексагональної фази графіту ($a = 0,2464$ нм, $c = 0,6711$ нм). Після додавання нанопорошка ZrO_2 композит містив структурні фази WC, Co_3W_3C , аморфний вуглець і тетрагональну фазу $t-ZrO_2$ ($a = 0,36019$ нм, $c = 0,5174$ нм). Ці структурні зміни після додавання 6% ZrO_2 привели до підвищення в'язкості руйнування K_{Ic} на 20 % до $K_{Ic} = 16,9 \pm 0,78$ МПа·м^{0,5} при незначному зменшенні твердості. Крім того, за допомогою методу Вільямсона-Холла з кутових положень і напівширини рефлексів показано, що зі збільшенням вмісту ZrO_2 в композиті 94WC–6Co відбувається більш інтенсивне подрібнювання фазових складових і зменшення середніх значень мікрореформацій (ϵ) в напрямках c і a . Це дозволяє їх використовувати в бурових інструментах та інших елементах конструкцій, що працюють при підвищених навантаженнях за кімнатної температури. Що стосується трибологічних випробувань композитів WC–Co– ZrO_2 , сформованих методом ІПС, тут інформація обмежена, що також можна відзначити і для алмазовмісних композитів. В зв'язку з цим необхідно провести дослідження зміни зносостійкості композитів WC–Co залежно від вмісту в них добавки мікропорошку ZrO_2 в умовах сухого ковзання під прикладеним навантаженням.

Метою даної роботи є дослідження зносостійкості (швидкості зношування) трьох різних сплавів, а саме 94WC–6Co, 90,24WC–5,76Co–4 ZrO_2 та 84,60WC–5,4Co–10 ZrO_2 , сформованих методом іскро-плазмового спікання в інтервалі температури 20–1350 °C за тиску 30 МПа впродовж 3 хв, в умовах сухого зворотно-поступального ковзання.

Спікання зразків та матеріали і методи

Зразки композитів виготовляли з використанням порошків карбіду вольфраму WC марки WC 1750 H (Global Tungsten & Powders spol. s.r.o. Bruntal Czech Republic) із середнім розміром частинок порошка 2,0–4,0 мкм, кобальту (standard GOST 9721–79) із середнім розміром частинок порошка 2,0–3,0 мкм і діоксиду цирконію ZrO_2 частково стабілізованого 3 % Y_2O_3 (NANO E Ballainvilliers, Франція) із середнім розміром частинок порошка 20–100 нм. Суміші порошків 94WC–6Co (зразок 1), 90,24WC–5,76Co–4 ZrO_2 (зразок 2) і 84,6WC–5,4Co–10 ZrO_2 (зразок 3) диспергували ультразвуком у дистильованій воді. Потім проводили помел у планетарному млині Pulverisette (Fritsch) впродовж 20 хв кульками діаметром 1,5 мм з прискоренням руху куль 640 м/с². Приготовлену суміш сушили в печі за температури $T_0 =$

80 °С впродовж 24 годин. Зразки композитів у вигляді таблеток діаметром 25 мм і завтовшки 5 мм спікали за допомогою інноваційної енергозберігаючої установки (рис. 1) в графітових прес-формах за температури витримки $T_2 = 1350$ °С і тиску 30 МПа впродовж 3 хв, що згідно з [14] забезпечує збереження більш дрібного середнього розміру зерна і високої щільності.



Рис. 1. Установка для спікання композиційних матеріалів [14]

Електричний струм становив 5000 А, напруга – 5 В, швидкість нагріву – 500 град/хв. Спікання здійснювали у вакуумі (6 Па).

Спечені зразки композитів піддавалися шліфуванню алмазним диском (1A1–200×20×51 D213 (K50) G). Потім їх полірували на автоматичному полірувальному верстаті ATM Saphir 550 платиновими і срібними дисками з алмазною суспензією до досягнення шорсткості R_a менше 0,1 мкм згідно з ISO 4287.

Питому швидкість зносу I вимірювали за допомогою машини тертя фірми «Optimol Instruments Prüftechnik GmbH» (Німеччина) в режимі зворотно-поступального тесту (reciprocating test) сухим ковзанням (рис. 2). Використовували модель «кулька на площині» (sphere-on-flat). Тести проводились за навантаження 20 Н впродовж 3600 с на контртіло. В якості контртіла використовувалася кулька з Al_2O_3 діаметром 10 мм.

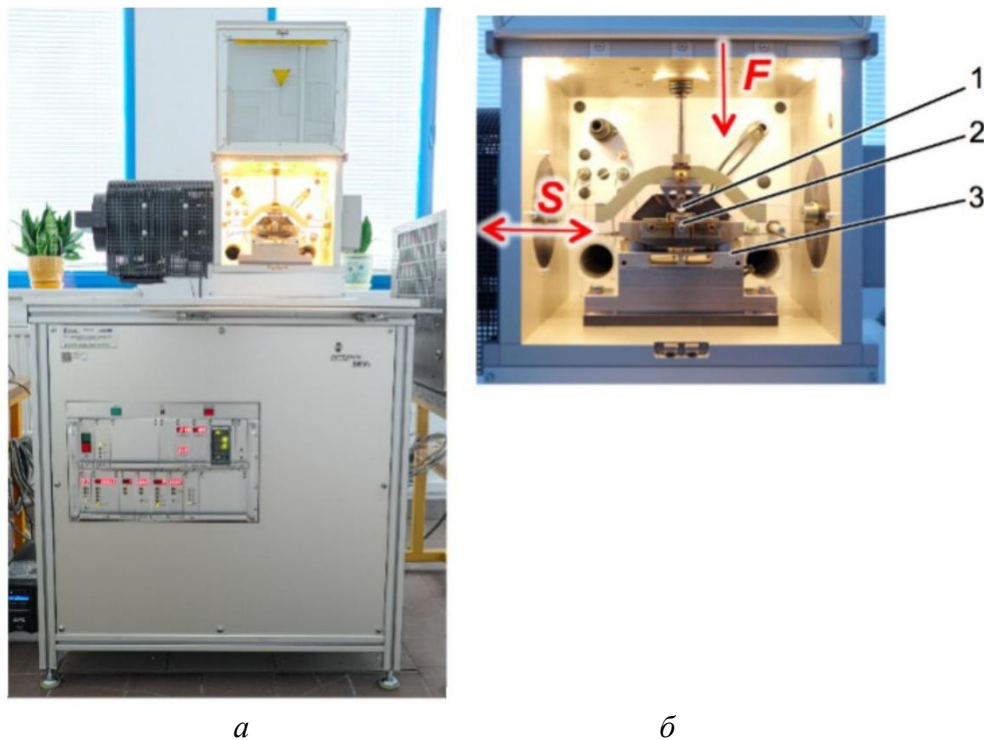


Рис. 2. Установка для дослідження трибологічних властивостей: а – загальний вигляд, б – випробувальна камера: 1 – кулька, 2 – зразок, 3 – стіл.

Для дослідження топографії поверхонь і одержання геометрії слідів зносу, отриманих у результаті триботесту, використовували скануючий електронний мікроскоп Hitachi SU-70

EDS із рентгенівським мікроаналізатором Thermo Scientific. Для дослідження об'єму зносу, отриманого в результаті триботесту, використовували інтерференційний профілометр CCI фірми Taylor Hobson. Кожне вимірювання охоплювало площу $2,5 \times 1,4$ мм, що дозволило охопити весь слід зносу і стандартизувати вимірювання для кожного наступного сліду. Отримана 3D топографія сліду зносу дозволила розрахувати об'єм зносу за допомогою програмного забезпечення компанії Taylor Hobson. Середні значення різниці діаметра контртіла від зносу кулькою були розраховані на основі середнього арифметичного значення вимірювань з кожного випробування для даного матеріалу.

На основі даних про об'ємний знос і шлях тертя розраховували швидкість зносу зразків за формулою [15]

$$W = \frac{\Delta V}{P_N L}$$

де V – знос об'єму (втрата об'єму зносу зразка), мм^3 ; P_N – прикладена нормальна сила, Н; $L = v \cdot l \cdot t$ – довжина шляху тертя, мм; v – частота, Гц; l – довжина доріжки тертя одного ходу, мм; t – тривалість випробування (300 с). Всі експерименти проводили за нормальних атмосферних умов і відносної вологості 40 %. Випробування відповідають міжнародним стандартам ASTM G99-959, DIN50324 і ISO 20808 [16, 17].

Результати дослідження та обговорення

Дослідження впливу добавки ZrO_2 на морфологічні та структурні зміни спечених зразків наведено на рис. 3.

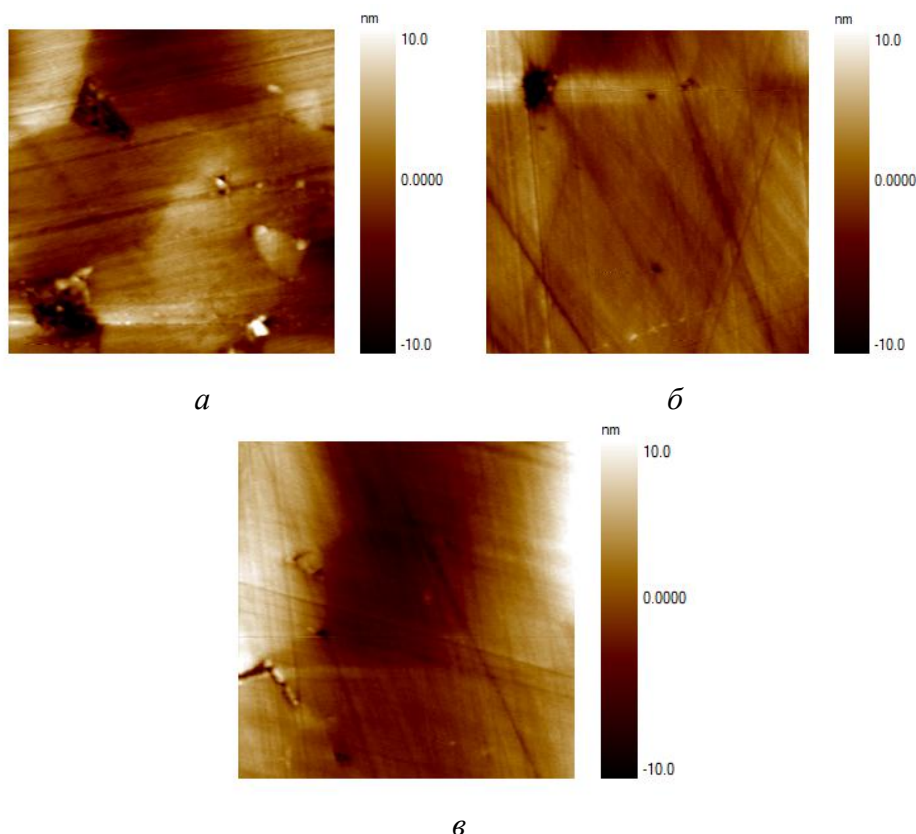


Рис. 3. Мікрофотографії поверхні спечених зразків композитів: а – $94\text{WC}-6\text{Co}$ (зразок 1), б – $90,24\text{WC}-5,76\text{Co}-4\text{ZrO}_2$ (зразок 2); в – $84,60\text{WC}-5,4\text{Co}-10\text{ZrO}_2$ (зразок 3)

За відсутності добавки ZrO_2 поверхня зразка 94WC–6Co (зразок 1) після полірування рівна. Поверхня зразків, що містять 4 і 10 % ZrO_2 (зразки 2 і 3 відповідно), після полірування виключно рівна.

У табл. 1 наведено результати випробувань шорсткості зразків до і після шліфування на лабораторному шліфувально-полірувальному верстаті. Обробка дозволила отримати подібні шорсткості поверхні для зразків досліджуваних матеріалів.

Таблиця 1. Шорсткість поверхні спечених зразків

Зразок	Шорсткість <i>Ra</i> , мкм			
	Після шліфовки		Після 3 годин і 20 хв поліровка диском Silver+ вода	
	Виміряна на ділянках	Середня	Виміряна на ділянках	Середня
94WC–6Co (зразок 1)	1,356	1,454	0,007	0,010
	1,294		0,010	
	1,516			
	1,661			
	1,399			
	1,501			
90,24WC–5,76Co–4ZrO ₂ (зразок 2)	1,259	1,111	0,008	0,008
			0,010	
			0,008	
84,60WC–5,4Co–10ZrO ₂ (зразок 3)	1,008	1,076	0,008	0,008

З цієї таблиці видно, що за відсутності добавки ZrO_2 поверхня композита 94WC–6Co (зразок 1) після полірування рівна. Середньоквадратичне значення шорсткості поверхні цього зразка становило $Ra = 10$ нм.

Додавання ZrO_2 у кількості 4 і 10 % до складу композита 94WC–6Co (зразки 2 і 3 відповідно) супроводжується зменшенням середньоквадратичного значення шорсткості поверхні ($Ra = 8$ нм). При цьому поверхня цих зразків виключно рівна.

Результати вимірювань трибологічних випробувань (тривалість випробувань, шлях тертя, зміна діаметра контртіла до і після зносу з урахуванням продуктів зносу, середні значення різниці діаметра контртіла, зношений об'єм і середні значення коефіцієнта тертя) спечених зразків наведено в табл. 2.

У цій таблиці також приведені значення коефіцієнта тертя, виміряні за такої тривалості випробування, яка відповідає встановленому характеру зміни μ з часом.

В табл. 3 наведені дані швидкості зносу для досліджуваних зразків композитів. Значення швидкості зносу для зразка 94WC–6Co (зразок 1) становлять $7,344 \pm 0,808 \cdot 10^{-8}$ мм³/(Н·м), а для зразка 90,24WC–5,76Co–4ZrO₂ (зразок 2) – $3,772 \pm 0,339 \cdot 10^{-8}$ мм³Н⁻¹/(Н·м). Як видно з наведених даних, швидкість зносу зразка 2 майже в 2 рази нижча, ніж у зразка 1. Швидкість зносу для зразка 84,60WC–5,4Co–10ZrO₂ (зразок 3) була мінімальною $1,485 \pm 0,149 \cdot 10^{-8}$ мм³·Н⁻¹/(Н·м), що в 5 разів нижче, ніж у зразка 1.

Таблиця 2. Характеристики умов і результати трибологічних випробувань зразків за навантаження 20 Н

Зразок	Тривалість випробувань, t , с	Шлях тертя, L , м	Зміна діаметра контртіла до Δd_1 і після Δd_2 зносу з урахуванням налипання продуктів зносу, мм		Середнє значення різниці діаметра контртіла $\Delta d_{sr} = \frac{\Delta d_1 + \Delta d_2}{2}$, мм	Зношений об'єм, ΔV , мм ³ , 10^{-5}	Середнє значення коефіцієнта тертя, μ
			Δd_1	Δd_2			
1	3600	36	0,478	0,378	0,428	5,288±0,482	0,910±0,09
2	3600	36	0,460	0,362	0,411	2,713±0,271	0,680±0,08
3	3600	36	0,406	0,339	0,373	1,069±0,107	0,360±0,04

Таблиця 3. Значення швидкості зношування спечених зразків, одержаних після випробування кулькою з Al_2O_3 за навантаження 20 Н

Зразок	Склад, %	Швидкість зношування, W , $\cdot 10^{-8}$ мм ³ ·Н ⁻¹ /(Н·м)
1	94%WC–6%Co	7,344±0,808
2	90,24%WC–5,76%Co–4%ZrO ₂	3,772±0,339
3	84,60%WC–5,4%Co–10%ZrO ₂	1,485±0,149

Трибологічні випробування досліджуваних зразків призводили до зношування контртіла (зменшення діаметрів кульок Al_2O_3) і утворення на кульці великої кількості продуктів зносу. З табл. 2 видно, що середнє значення різниці діаметрів кульки Δd_{sr} для зразка 1 становило 0,428 мм, а зношений об'єм ΔV становив $5,2877 \cdot 10^{-5}$ мм³. Середнє значення різниці діаметрів кульки Δd_{sr} для зразка 2 становило 0,411 мм, а зношений об'єм ΔV становив $2,7126 \cdot 10^{-5}$ мм³. Середні значення Δd_{sr} і зношеного об'єму ΔV для зразка 3 були мінімальними – 0,373 мм і $1,0699 \cdot 10^{-5}$ мм³ (табл. 2). Виходячи з цих фактів, можна ще раз стверджувати, що композиту 84,60WC–5,4Co–10ZrO₂ (зразок 3) притаманна висока ступень зносостійкості.

Таким чином, представлені вище дані дозволяють стверджувати, що зносостійкість досліджуваних композитів визначається головним чином кількістю добавки ZrO₂, морфологією і розміром фазових складових зразків.

Висновки

У результаті трибологічних випробувань композитів 94WC–6Co, 90,24WC–5,76Co–4ZrO₂ і 84,60WC–5,4Co–10ZrO₂, сформованих методом іскро-плазмового спікання, у парі з контртілом з Al_2O_3 було встановлено:

1. Вимірювання за навантаження 20 Н показали, що композити 90,24WC–5,76Co–4ZrO₂ і 84,60WC–5,4Co–10ZrO₂ мають значно нижчі швидкості зносу ($3,772 \cdot 10^{-8}$ мм³·Н⁻¹/(Н·м) і $1,485 \pm 0,149 \cdot 10^{-8}$ мм³·Н⁻¹/(Н·м) відповідно), ніж композит 94WC–6Co ($0,92$ і $7,344 \pm 0,808 \cdot 10^{-8}$ мм³/(Н·м)).

2. Більш висока зносостійкість композитів, що містять добавки ZrO₂, обумовлені більш однорідною дрібнозернистою структурою та меншою шорсткістю поверхні, а також тим, що ZrO₂ функціонує як сухий мастильний матеріал.

V.A. Mechnik, N.A. Bondarenko, V.M. Kolodnitskyi, D.L. Korostyshevskyi, N.F. Poshvanyk

¹Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 04074

INVESTIGATION OF THE WEAR RESISTANCE OF WC-Co AND WC-Co-ZrO₂ ALLOYS FORMED BY SPARK-PLASMA SINTERING

A comparative study of the wear resistance of three different samples of composite materials is presented: 94%WC-6%Co, 90.24%WC-5.76%Co-4%ZrO₂, and 84.60%WC-5.4%Co-10%ZrO₂. The composites were made by spark-plasma sintering. Wear resistance experiments were carried out at room temperature on the test machine of Optimol Instruments Prüftechnik GmbH in the reciprocating ball test mode with an Al₂O₃ ball in sliding dry contact oscillating at a frequency of 50 Hz under a load of 20 N. Significant differences between the three composites were found, with the sample of the composite with a high ZrO₂ concentration having higher wear resistance compared to composites with a lower ZrO₂ concentration and a composite without ZrO₂. It is shown that the 90.24WC-5.76Co-4ZrO₂ and 84.60WC-5.4Co-10ZrO₂ composites measured at a load of 20 N show significantly lower wear rates ($3.772 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{H}^{-1}/(\text{N} \cdot \text{m})$ and $1.485 \pm 0.149 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{H}^{-1}/(\text{N} \cdot \text{m})$, respectively) than the 94WC-6Co composite (0.92 and $7.344 \pm 0.808 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{H}^{-1}/(\text{N} \cdot \text{m})$).

Key words: composite, tungsten carbide, cobalt, zirconium dioxide, concentration, wear resistance, spark-plasma sintering.

Література

1. Wang X., Hwang K.S., Koopman M., Fang Z.Z., Zhang L. Mechanical properties and wear resistance of functionally graded WC-Co. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2013. Vol. 36. P. 46–51.
2. Lu Z., Du J., Sun Y., Su G., Zhang C., Kong X., Kong X. Effect of ultrafine WC contents on the microstructures, mechanical properties and wear resistances of regenerated coarse grained WC-10Co cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2021. Vol. 97, art. 105516.
3. Yin C., Peng Y., Ruan J., Zhao L., Zhang R., Du Y. Influence of Cr₃C₂ and VC content on WC grain size, WC shape and mechanical properties of WC-6.0Co wt.% Co cemented carbides. *Materials*. 2021. Vol. 14, art. 1551.
4. Sirota V.V., Gevorkyan É.S., Kovaleva M.G., Ivanisenko V.V. Structure and properties of nanoporous ceramic Al₂O₃ obtained by isostatic pressing. *Glass and Ceram.* 2013. Vol. 69, nos. 9–10. P. 342–345.
5. Zhao S.X., Song X.Y., Zhang J.X., Liu X.M. Effects of scale combination and contact condition of raw powders on SPS sintered near-nano crystalline WC-Co alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2008. Vol. 473. P. 323–329.
6. Liu K., Wang Z., Yin Z., Cao L., Yuan J. Effect of Co content on microstructure and mechanical properties of ultrafine grained WC-Co cemented carbide sintered by spark plasma sintering. *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44, no. 15. P. 18711–18718.
7. Bonny K., Baets P.D., Perez Y., Vleugels J., Lauwers B. Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact. *Wear*. 2010. Vol. 268, nos. 11–12. P. 1504–1517.
8. Lihui Z., Kun L., Zhilin L. Study on the hardening and toughening mechanisms of WC-Co cemented carbides with plate-like WC grains. *Rare Metal Mater. Eng.* 2011. Vol. 40. P. 443–446.
9. Borik M.A., Bublik V.T., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Osiko V.V., Seryakov S.V., Tabachkova N.Y. Change in the phase composition, structure and mechanical properties of directed melt crystallized partially stabilized zirconia crystals depending on the concentration of Y₂O₃. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. P. 1889–1894.
10. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 2000. Vol. 83, no. 3. P. 461–487.

11. Gaillard Y., Jiménez-Piqué E., Soldera F., Mücklich F., Anglada M. Quantification of hydrothermal degradation in zirconia by nanoindentation. *Acta Mater.* 2008. Vol. 56, no 16. P. 4206–4217.
12. Yang Y., Luo L.M., Zan X., Zhu X.Y., Zhu L., Wu Y.C. Synthesis of Y₂O₃-doped WC–Co powders by wet chemical method and its effect on the properties of WC–Co cemented carbide alloy. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2020. Vol. 92, art. 105324.
13. Ratov B., Mechnik V., Hevorkian E., Rucki M., Pieniak D., Bondarenko M., Kolodnitsky V., Starik S., Bilorusets V., Chishkala V., Sundetova P., Bektilevov A., Shukmanova A., Seidaliyev A. Wear resistance of the refractory WC–Co diamond-reinforced composite with zirconia additive. *Materials.* 2024. Vol. 17, no. 2, art 2852.
14. Rucki M., Hevorkian E., Latosińska J.N., Kolodnitskyi V., Chalko L., Morozow D., Samociuk W., Matijosius J., Masař M., Ryba T. Reproducibility assessment of zirconia-based ceramics fabricated out of nanopowders by electroconsolidation method. *Appl. Sci.* 2025. Vol. 15, art. 4955.
15. Fuertes V., Cabrera M.J., Seores J., Muñoz D., Fernández J.F., Enríquez E. Enhanced wear resistance of engineered glass-ceramic by nanostructured self-lubrication. *Mater. Des.* 2019. Vol. 168. art. 107623.
16. ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
17. ASTM G171-03, Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

Надійшла 08.07.25

References

1. Wang, X., Hwang, K.S., Koopman, M., Fang, Z.Z., Zhang, L. (2013). Mechanical properties and wear resistance of functionally graded WC–Co. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 36, 46–51.
2. Lu, Z., Du, J., Sun, Y., Su, G., Zhang, C., Kong, X., Kong, X. (2021). Effect of ultrafine WC contents on the microstructures, mechanical properties and wear resistances of regenerated coarse grained WC–10Co cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 97, 105516.
3. Yin, C., Peng, Y., Ruan, J., Zhao, L., Zhang, R., Du, Y. (2021). Influence of Cr₃C₂ and VC content on WC grain size, WC shape and mechanical properties of WC–6.0Co wt.% Co cemenred carbides. *Materials.* 14, 1551.
4. Sirota, V.V., Gevorkyan, É.S., Kovaleva, M.G., Ivanisenko, V.V. (2013). Structure and properties of nanoporous ceramic Al₂O₃ obtained by isostatic pressing. *Glass and Ceram.* 69, 9–10, 342–345.
5. Zhao, S.X., Song, X.Y., Zhang, J.X., Liu, X.M. (2008). Effects of scale combination and contact condition of raw powders on SPS sintered near-nano crystalline WC-Co alloy. *Mater. Sci. Eng. A.* 473, 323–329.
6. Liu, K., Wang, Z., Yin, Z., Cao, L., Yuan, J. (2018). Effect of Co content on microstructure and mechanical properties of ultrafine grained WC–Co cemented carbide sintered by spark plasma sintering. *Ceram. Int.* 44(15), 18711–18718.
7. Bonny, K., Baets, P.D., Perez, Y., Vleugels, J., Lauwers, B. (2010). Friction and wear characteristics of WC–Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact. *Wear.* 268 (11–12), 1504–1517.
8. Lihui, Z., Kun, L., Zhilin, L. (2011). Study on the hardening and toughening mechnisms of WC–Co cemented carbides with plate-like WC grains. *Rare Metal Mater. Eng.* 40, 443–446.

9. Borik, M.A., Bublik, V.T., Kulebyakin, A.V., Lomonova, E.E., Milovich, F.O., Myzina, V.A., Osiko, V.V., Seryakov, S.V., Tabachkova, N.Y. (2015). Change in the phase composition, structure and mechanical properties of directed melt crystallized partially stabilized zirconia crystals depending on the concentration of Y_2O_3 . *J. Eur. Ceram. Soc.* 35, 1889–1894.
10. Hannink, R.H.J., Kelly, P.M., Muddle, B.C. (2000). Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 83(3), 461–487.
11. Gaillard, Y., Jiménez-Piqué, E., Soldera, F., Mücklich, F., Anglada, M. (2008). Quantification of hydrothermal degradation in zirconia by nanoindentation. *Acta Mater.* 56(16), 4206–4217.
12. Yang, Y., Luo, L.M., Zan, X., Zhu, X.Y., Zhu, L., Wu, Y.C. (2020). Synthesis of Y_2O_3 -doped WC-Co powders by wet chemical method and its effect on the properties of WC-Co cemented carbide alloy. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 92, 105324.
13. Ratov, B., Mechnik, V., Hevorkian, E., Rucki, M., Pieniak, D., Bondarenko, M., Kolodnitsky, V., Starik, S., Bilorusets, V., Chishkala, V., Sundetova, P., Bektilevov, A., Shukmanova, A., Seidaliyev, A. (2024). Wear resistance of the refractory WC-Co diamond-reinforced 3 composite with zirconia additive. *Materials*. 17(2), 2852.
14. Rucki, M., Hevorkian, E., Latosińska, J.N., Kolodnitskyi, V., Chalko, L., Morozow, D., Samociuk, W., Matijosius, J., Masař, M., Ryba, T. (2025) Reproducibility assessment of zirconia-based ceramics fabricated out of nanopowders by electroconsolidation method. *Appl. Sci.* 15, 4955.
15. Fuertes, V., Cabrera, M. J., Seores, J., Muñoz, D., Fernández, J. F., Enríquez, E. (2019). Enhanced wear resistance of engineered glass-ceramic by nanostructured self-lubrication. *Mater. Des.* 168, 107623.
16. ASTM G99-17 (2017). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA.
17. ASTM G171-03 (2017). Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. ASTM International, West Conshohocken, PA.

УДК 622.248.3

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-21-27

М.Є. Чернова, доктор технічних наук

Івано-Франківський Національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ, e-mail: myroslava.chernova@nung.edu.ua

РОЗРАХУНОК РАЦІОНАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЗГВИНЧУВАННЯ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ БТ ТА ОБТ ЗАДЛЯ БУРІННЯ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

У роботі розглядається одна з проблем безаварійного будівництва глибоких свердловин, яка пов'язана з надійністю різьбового з'єднання елементів бурильної колони. Надійність замкових різьбових з'єднань, у своїй більшості, залежить від величини обертового моменту згвинчування, яким має бути оптимальним.

Дослідження оптимального обертового моменту згвинчування досліджувались на натурних зразках різьбових з'єднань, які піддавалися циклічним навантаженням на спеціальному лабораторному обладнанні, при цьому застосовувались тензодавачі, що фіксували величини навантажень не лише на самому різьбовому з'єднанні, а й на найближчих ділянках тіла труби. Таким чином враховувались статичні міцнісні характеристики тіла труби, якими здебільшого завжди науковці нехтували.

На основі лабораторних досліджень, які потребують промислового підтвердження, встановлено межі максимально-допустимих величин обертового моменту згвинчування для різних