

## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КАРБІДОКРЕМНІЄВОЇ КЕРАМІКИ В ГАЗОАБРАЗИВНОМУ ПОТОЦІ

А.О.Криль, П.М.Присяженюк, Я.А.Криль

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,  
e-mail: zvd@nuing.edu.ua

*Досліджено зносостійкість самозв'язаного карбїду кремнію в умовах газоабразивного зношування при зміні кута атаки абразивних частинок. Установлено, що за великих кутів атаки ( $\alpha > 60^\circ$ ) карбїд кремнію характеризується меншою зносостійкістю ніж твердий сплав, проте за малих кутів атаки ( $\alpha < 60^\circ$ ) SiC показав кращі результати. Таким чином, самозв'язаний карбїд кремнію можна рекомендувати для виробництва аероабразивних сопел, що застосовуються для очищення труб у процесі відновлення нафто- і газопроводів.*

Ключові слова: зносостійкість, газоабразивне зношування, кут атаки, карбїд кремнію, сопло.

*Исследовано износостойкость самосвязанного карбида кремния в условиях газоабразивного изнашивания при изменении угла атаки абразивных частиц. Установлено, что при больших углах атаки ( $\alpha > 60^\circ$ ) карбид кремния характеризуется меньшей износостойкостью, чем твердый сплав, однако при малых углах атаки ( $\alpha < 60^\circ$ ) SiC показал лучшие результаты. Таким образом, самозвязанный карбид кремния можно рекомендовать для производства аэроабразивных сопел, использующихся для очистки труб при восстановлении нефте- и газопроводов.*

Ключевые слова: износостойкость, газоабразивное изнашивание, угол атаки, карбид кремния, сопло.

*It is investigated wear resistance of self-connected silicon carbide in conditions of gasabrasive wear at the change of an angle of attack of abrasive particles. It is set, that though at greater angles of attack ( $\alpha > 60^\circ$ ) the silicon carbide is characterized by smaller wear resistance than hard metal, however at small angles of attack of SiC ( $\alpha < 60^\circ$ ) demonstrated the best results. Thus, self-connected silicon carbide can be recommended for production of aeroabrasive nozzles that are used for cleaning of pipes at renewal oil- and gas pipelines.*

Keywords: wear resistance, gasabrasive wear, impact angle, silicon carbide, nozzle.

В умовах дефіциту вуглеводневої сировини в Україні є актуальною проблема збільшення власного видобутку нафти, газу і конденсату, їх транспортування та зберігання. У зв'язку з цим першочерговими завданнями є відновлення старих та будівництво нових нафто- і газопроводів, а також сховищ нафтопродуктів. Велике значення під час ремонту та будівництва нафтогазопроводів та нафтогазосховищ має проведення антикорозійних робіт – очищення поверхонь до необхідної якості і покриття їх антикорозійними покриттями. Очищення цих поверхонь проводиться різними абразивами, починаючи з піску і закінчуючи електрокорундом.

Найважливішим елементом обладнання для очищення є аероабразивоструменеві сопла. Сопла призначені для прискорення абразивно-повітряної струмини до надзвукової швидкості. Ресурс їх роботи визначає ефективність роботи обладнання.

Стальні сопла підлягають швидкому зношуванню, що вимагає їх часті заміни. Провідні закордонні фірми-виробники виготовляють сопла із твердих сплавів і матеріалів на основі карбїдів бору і кремнію. Імпорتنі сопла відзначаються високими експлуатаційними характеристиками, але є відносно дорогими.

Вітчизняні виробники сопел на ринку України представлені мало, хоча постійно зростаючий попит на сопла дає підстави для збільшення їх випуску. Важливим завданням є роз-

роблення та організація виробництва вітчизняних сопел із зносостійких матеріалів (кераміки, керметів, твердих сплавів) з необхідним ресурсом роботи, які б за якістю не поступалися імпортним і були б дешевшими. Ця проблема для України є вельми актуальною, а її вирішення потребує проведення наукових досліджень, дослідно-конструкторських та технологічних робіт для розробки промислової технології та серійного випуску вітчизняних сопел.

Як свідчить аналіз літературних джерел та Internet за останні 20 років кількість фірм виробників та фірм споживачів аероабразивних сопел зростає (рис. 1). Розробка та освоєння виробництва конкурентноспроможних вітчизняних сопел уможливить їх постачання не тільки на внутрішній, але і на світовий ринок. Результати досліджень проведені із залученням рекламних матеріалів багатьох закордонних фірм (Clemco, Airblast, Sintec, Kelko) та Internet свідчать, що застосування зазначених сопел підвищить продуктивність праці підприємств на 40%, знизить використання сталених сопел у 80 разів, енерговитрати під час процесу обробки поверхні – на 30% і підвищить продуктивність праці у 1,7 рази. Собівартість виробів при цьому може бути знижена на 15-20%.

За рахунок використання зносостійких керамічних матеріалів можна підвищити довговічність не тільки абразивоструменевих сопел, але й деталей запірної та регулюючої арматури. Найбільш перспективним керамічним матеріа-

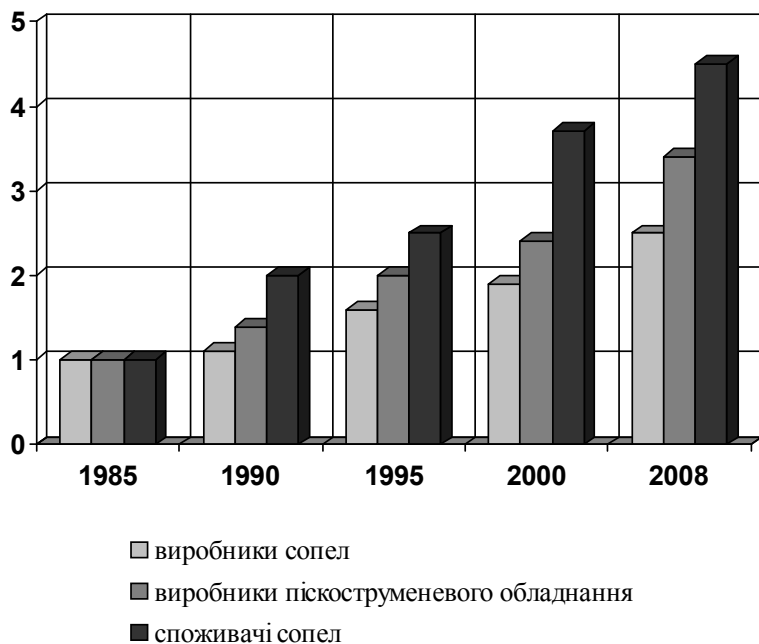


Рисунок 1 – Зростання відносної кількості фірм (порівняно з 1985 р.) виробників і споживачів сопел

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів

Матеріал	Питома маса $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердість HV, ГПа	Коефіцієнт тріщиностійкості $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>(1/2)</sup>	Модуль пружності E, ГПа	Міцність на згин $\sigma$ , МПа
Твердий сплав BK8	14,4 - 14,8	1350 - 1400	11 - 13	590 - 600	1700
Самозв'язаний SiC	3,1	2700	3,5 - 4,0	240 - 260	350 - 450

лом для деталей нафтогазового обладнання, що працюють в умовах інтенсивного газоабразивного зношування є, зокрема, карбід кремнію (SiC), що зумовлено його високою зносостійкістю, твердістю, і хімічною стійкістю. Це забезпечує перевагу карбіду кремнію перед металевими аналогами. Аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних даних свідчить, що вивченню закономірностей і механізму газоабразивного зношування карбідокремнієвої кераміки для деталей нафтогазового обладнання присвячено порівняно незначна кількість робіт [1].

Нами досліджувалась газоабразивна стійкість керамічного матеріалу на основі самозв'язаного карбіду кремнію (SiC) порівняно з твердим сплавом BK8 за різних кутів атаки абразивних частинок. Твердосплавні зразки BK8 були виготовлені в Інституті надтвердих матеріалів НАН України. Зразки з самозв'язаного карбіду кремнію виготовлялися у лабораторії керамічних конструкційних матеріалів ФНТУНГ.

Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів наведені у табл. 1 [1, 2].

Зносостійкість при газоабразивному зношуванні досліджуваних матеріалів визначалась за методикою, передбаченою ГОСТ 23.201-78, на відцентровому прискорювачі твердих частин конструкції І. Клейса [3].

Дослідні і еталонні зразки виготовлялися розмірами 20 × 15 × 4(5) мм, шорсткостю робочої поверхні Ra=0,16 – 0,32, без гострих країв. Еталонні взірці виготовлялися зі сталі 45 за ГОСТ 1050-74 у відпаленому стані з твердістю 48-56 HRC.

Абразивний матеріал – пісок Рогатинського родовища з розміром зерен  $d_r = 0,4-1,0$  мм. Маса абразиву – 5 кг. Зношування матеріалів здійснювалось за кутів атаки абразивних частинок 30, 60 і 90°, та швидкості частинок  $V_p = 76$  м/с.

Перед проведенням випробовувань зразки маркувались, знежирювались в бензині та ацетоні згідно з ГОСТом 2603-71 і просушувались на повітрі.

На досліджувальній установці одночасно встановлювали 12 зразків у положеннях, які відповідають різним кутам атаки абразивних частинок. При цьому одночасно встановлювали

Таблиця 2 – Результати випробовувань зразків на газоабразивне зношування

Матеріал зразка	Кут атаки $\alpha$ , град	Початкова маса $m_0$ , г	Маса після випробувань $m_1$ , г	Втрата маси $\Delta m = m_1 - m_0$ , г	Середня втрата маси $\Delta m$ , г
Сталь 45	30	9,0785	9,0537	0,0248	0,0248
	60	8,9844	8,9526	0,0318	0,0318
	90	9,0544	9,0332	0,0202	0,0202
BK8	30	22,7292	22,7270	0,0022	0,0022
	60	23,1862	23,1809	0,0053	0,0053
	90	23,0039	23,0008	0,0031	0,0031
SiC	30	2,3355	2,3350	0,0005	0,0005
	30	2,2299	2,2294	0,0005	
	60	2,3296	2,3271	0,0025	0,0062
	60	2,4319	2,4220	0,0099	
	90	2,2646	2,2298	0,0348	
	90	2,3205	2,3003	0,0202	

з однаковими кутами атаки не менше трьох дослідних і трьох еталонних зразків. Розміщення цих зразків довкола ротора було рівномірним.

Попередньо всі зразки припрацьовувались, після чого проводились основні дослідження. Відомо, що на початковій стадії процес зношування протікає зі змінною інтенсивністю. Припрацювання потрібне для стабілізації інтенсивності процесу зношування. Режими припрацювання були ті ж, що й при основних випробуваннях. Для швидкості абразивних частинок 76 м/с період припрацювання склав 3 хв.

Величину зношування досліджуваних і еталонних зразків визначали шляхом зважування на аналітичній вазі ВЛР-200 з похибкою не більше 1% до і після випробувань. Результати дослідження зносостійкості вибраних матеріалів порівняно з покращеною сталлю 45 під дією газоабразивного потоку наведені у табл. 2.

Відносну зносостійкість  $\epsilon$  (табл. 3) оцінювали шляхом порівняння величин зношування досліджуваного і еталонного зразків за формулою [3]:

$$\epsilon = \frac{\Delta m_e \cdot \rho_d}{\Delta m_d \cdot \rho_e},$$

де:  $\Delta m_e$  і  $\Delta m_d$  – втрати маси еталонного і досліджуваного зразків;  $\rho_e$  і  $\rho_d$  – питома маса еталонного і досліджуваного матеріалу відповідно, г/см<sup>3</sup>.

Таблиця 3 – Відносна зносостійкість  $\epsilon$  матеріалів за різних кутів атаки (швидкість потоку 76 м/с, еталонний матеріал – сталь 45)

Матеріал	Відносна зносостійкість $\epsilon$		
	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=90^\circ$
Сталь 45	1	1	1
SiC	20,7	2,04	0,29
BK8	19,8	11,15	15,65

На рис. 2 зображена залежність інтенсивності зношування випробовуваних матеріалів від кута атаки абразивних частинок.

Після випробувань характер руйнування зношених поверхонь зразків досліджувались із застосуванням металографічного аналізу з використанням оптичного та растрового електронного мікроскопа. Поверхня зношування самозв'язаного SiC під ковзаючою дією газоабразивного потоку представлена на рис. 3, 4. На поверхні спостерігається безліч невеликих вириків, що вказує на наявність бокових тріщин. Через те, що абразивні частинки м'якші, ніж SiC, бокові тріщини зароджувались за рахунок втомного руйнування. Проконзування частинок спричинило також згладжування поверхні між вириками. Поверхневі радіальні тріщини призводять до звичайного відколювання частинок матеріалу від поверхні, що добре видно на шліфі. Внутрішні тріщини, очевидно, не впливають на зношування, оскільки їх сполучення не відбулося. Зносостійкість самозв'язаного SiC визначається, здебільшого, особливостями його мікроструктури і фазового складу. Найбільш стійкою до впливу абразивних частинок є фази первинного і вторинного карбиду кремнію, тому ідеальною здатністю цього матеріалу можна вважати 100%-ний вміст в ньому карбиду кремнію. Наявність в матеріалі вільного кремнію (неминуче за технологічних причин), надто висока крихкість і низька мікротвердість якого знецінює матеріал і знижує опір до газоабразивного зношування.

Результати досліджень вказали на стабільно високу зносостійкість у твердого сплаву BK8, що пояснюється його оптимальним структурним складом і властивостями, зокрема зв'язка кобальтова зв'язка добре утримує карбиди від викришування. Процес руйнування сплаву BK8 відбувається за рахунок "вимивання" кобальтової зв'язки з міжкарбідного простору і викришування самих карбідів [5].

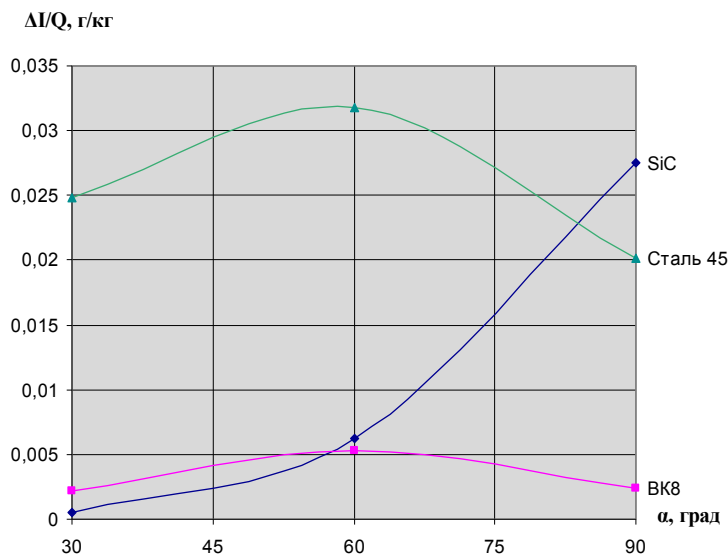


Рисунок 2 – Залежність інтенсивності зношування різних матеріалів від кута атаки при  $V_{п} = 76\text{м/с}$ ,  $d_r = 0,4...1,0\text{ мм}$

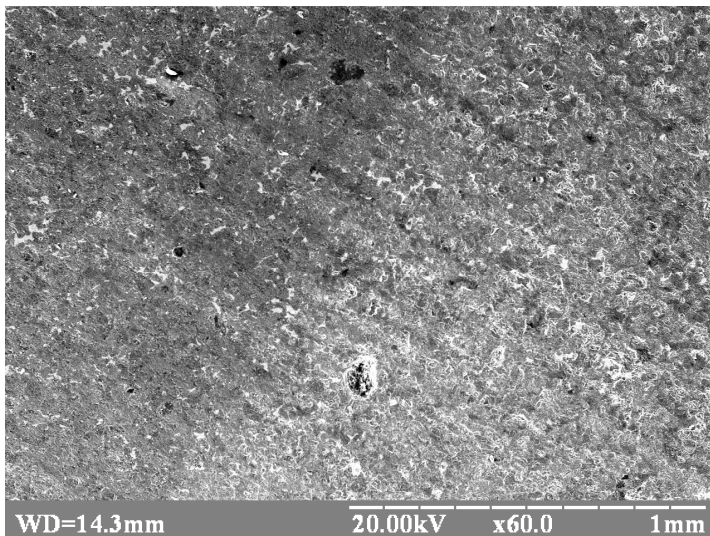


Рисунок 3 – Поверхня зношування самозв'язаного SiC при  $\alpha = 30^\circ$ ,  $V_{п} = 76\text{м/с}$ ,  $d_r = 0,4...1,0\text{ мм}$

Встановлено, що за малих кутів дії абразивних частинок ( $\alpha < 30^\circ$ ) інтенсивність зношування самозв'язаного SiC менша, ніж за аналогічних умов сплаву BK8, проте за кутів  $60^\circ$  і  $90^\circ$  твердий сплав показав значно кращий результат (рис. 2).

### Висновки

1. Як і всі крихкі матеріали, SiC найбільш зносостійкий за малих кутів атаки, а при  $\alpha = 90^\circ$  відбувається максимальне зношування та крихке руйнування поверхні зразка.

2. Враховуючи те, що карбід кремнію показав вищий показник зносостійкості порівняно з твердим сплавом за малих кутів атаки, самозв'язаний SiC можна широко застосовувати як зносостійкий матеріал для виготовлення сопел піскоструменевих чи шротоструменевих установок для очищення поверхонь нафтогазопроводів від продуктів корозії, шарової окалини, старих багатшарових покриттів.

3. Здатність протистояти газоабразивному зношуванню дає змогу також використовувати карбід кремнію у вузлах регулюючої та запірної арматури в нафтогазопромисловому і хіміч-

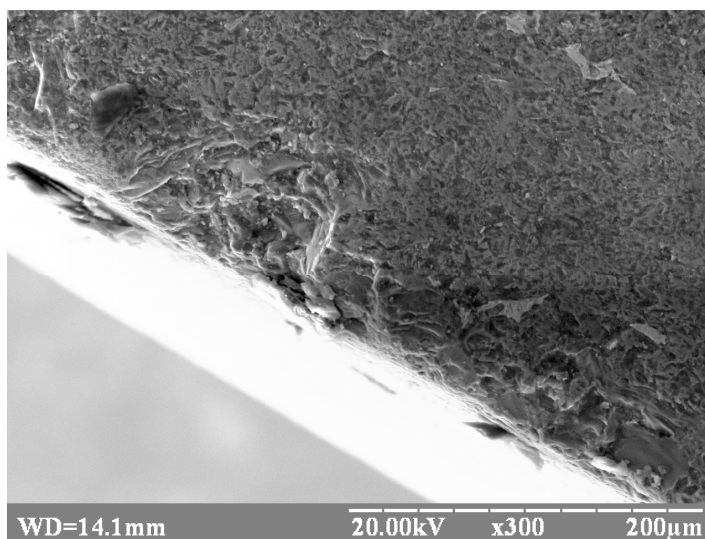


Рисунок 4 – Фрактограма зламу поверхні зношування самозв’язаного SiC при  $\alpha = 30^\circ$ ,  $V_p = 76 \text{ м/с}$ ,  $d_r = 0,4 \dots 1,0 \text{ мм}$

ному обладнанні у газоподібних агресивних і абразивних середовищах. Високотемпературні і зносостійкі кульові крани з вузлами затвора із карбідокремнєвої кераміки – дуже перспективний, надійний і ефективний вид запірної арматури.

Результати проведених досліджень свідчать, що застосування карбиду кремнію і матеріалів на його основі для абразивоструменевих сопел та деталей запірно-регулюючої арматури є доцільним і перспективним.

#### Література

1 Гнесин Г.Г. Бескислородные керамические материалы / Г.Г. Гнесин. – К.: Техніка, 1987. – 150 с.

2 Киффер Р. Твердые сплавы / Р. Киффер, Ф. Бенезовський. – М.: Металлургия, 1971. – 391 с.

3 Клейс И.Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И.Р. Клейс, Х.Х. Ууэмыйс. – М.: Машиностроение, 1986. – 160 с.

4 Pinar Kleis, Priit Kulu. Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control / London : Springer, 2008, P. 207.

5 Клейс И.Р. Исследование ударного износа металлокерамических твердых сплавов разной твердости / И.Р. Клейс // Труды ТПИ, 1965. – № 219. – С. 11-16.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
10.02.10*

*Рекомендована до друку  
за результатами Міжнародної конференції  
професором Петриною Ю.Д.*