

УДК 620.108

**С. Воденніков**

Доцент, канд. техн. наук,  
Запорізька державна  
інженерна академія,  
м. Запоріжжя

**Г. Слинько**

Професор, д-р техн. наук,  
Запорізький національний  
технічний університет,  
м. Запоріжжя

## ОСОБЛИВОСТІ МІКРОМЕХАНІЗМІВ РУЙНУВАННЯ ВУГЛЕЦЕМІСТКИХ МАТЕРІАЛІВ З КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ

*Розглянуто мікромеханізми руйнування вуглецемістких матеріалів з композиційними покриттями на основі SiC-WC за допомогою фрактографічного аналізу в умовах механічних навантажень.*

**покриття, згин, руйнування, міцність**

Пришвидшення науково-технічного прогресу ставить завдання розроблення графітованих матеріалів зі зниженою окислюваністю, підвищеною термостійкістю та інертних до різних середовищ і розплавів. При цьому важливо досягти максимальної ефективності використання матеріальних і паливноенергетичних ресурсів та зниження техногенного впливу на довкілля. Слід особливо наголосити, що сьогодні в Україні витрати на електроенергію і електроди складають до 25 % собівартості металу, виплавленого в дугових електродних печах. Причому підвищена витрата графітованих електродів пов'язана з їхньою якістю. Через високу відкриту пористість електродів (20...25 %), малу щільність (до 2,2 г/см<sup>3</sup>) і низьку міцність при згині (7...10 МПа) вони піддаються інтенсивному поверхневому окисленню (до 37,8 %), термомеханічному руйнуванню і спрацюванню (до 35 %) [1 — 3].

Розв'язанню проблеми підвищення експлуатаційної стійкості вуглецемістких матеріалів присвячено багато праць вітчизняних та іноземних вчених [4 — 6]. Найперспективнішим напрямом вважається електролітичне осадження термостійких композиційних покриттів на основі SiC-WC з іонних розплавів [7].

**Постановка задачі.** У цій статті пропонується спосіб дослідження мікромеханізмів руйнування вуглецемістких матеріалів з композиційними покриттями за допомогою

фрактографічного аналізу в умовах механічних навантажень, що дає можливість визначити потрібну товщину захисних зміцнювальних покриттів для забезпечення заданих функціональних властивостей та їх експлуатаційної надійності.

**Методика випробування.** Фрактографічний аналіз досліджених графітованих матеріалів з покриттями на основі SiC-WC виконували на растровому електронному мікроскопі фірми YEOL «YSMT 300» при пришвидшувальному потенціалі 15 кВ і діаметрі електронного зонда 100 нм. Для проведення фрактографічного аналізу зразки розміром 10×10×25, вирізані з досліджених матеріалів з покриттями, руйнували безпосередньо перед розміщенням їх в камері мікроскопа. Механічну міцність зразків без покриттів і з покриттями визначали за допомогою гідравлічної випробувальної машини ЗІМ Р10, ГОСТ 7855-83 з найбільшим навантаженням 50 кН. Випробування на згин циліндричних зразків діаметром 40 мм і завдовжки 340 мм при віддалі між центрами опор 300 мм проводили на машині УММ.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Дослідження впливу мікроструктури на міцність при згині графітованих зразків показало, що в початковому стані межа міцності при згині графіту не перевищувала 10 МПа (рис. 1).



Рис. 1. Вплив пористості на міцність при згині графітізованого матеріалу з SiC-WC покриттям

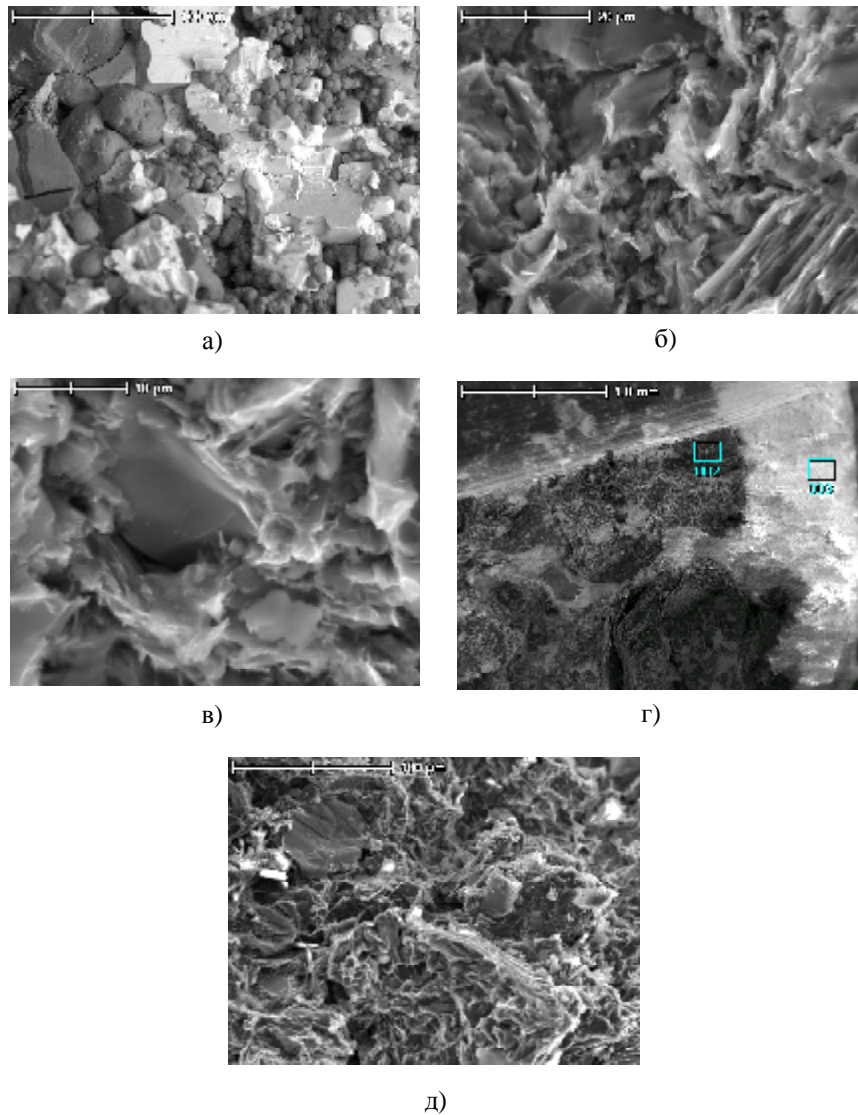


Рис. 2. Мікрофрактограми зміцнених кремнієм графітізованих зразків після випробувань на згин: а — необроблений зразок; б — зразок з дифузійним шаром до 200 мкм; в — зразок з дифузійним шаром до 450 мкм; г — зразок із зовнішнім карбідним шаром; д — в'язко-крихке внутрішньозеренне руйнування

Після дифузійного насичення поверхневих шарів кремнієм з домішками вольфраму на глибину до 450 мкм, при якій пористість складала близько 5 %, межа міцності при згині дослідженого графітізованого матеріалу

збільшилася до 18 МПа. Таке збільшення пов'язане зі структурними змінами в поверхневих шарах випробуваних зразків (рис. 2). Так, у початковому стані пористість зразків досягала 11% при розмірі пор близько 4 мкм.

Руйнування при згині проходило по крихких крупних зернах графіту (див. рис. 2,а) і по межах між зернами, переважно по порах (рис. 2,а,б).

Дифузія кремнію на глибину графіту до 200 мкм сприяла зменшенню пористості до 7,8 % при розмірі пор до 1,5 мкм. При такій структурі та глибині поверхневого зміцненого шару межа міцності при згині графітизованого зразка збільшилася до 11,8 МПа. Частка міжзеренного руйнування графіту істотно зменшилася. За наявності чистого графіту відбувалося внутрішньозеренне руйнування і часткове руйнування по порах (рис. 2,в). Основна частина зруйнованої поверхні зразка характеризувалася в'язкокрихким зламом. Істотне підвищення межі міцності при згині (до 18 МПа) викликано наявністю в структурі міцних з'єднань карбїду кремнію, розташованих у порах на глибині до 450 мкм. При цьому пористість знизилася до 5,2 %, розмір пор — до 1,21 мкм. На поверхні зразка утворився міцний карбїдокремнієвий шар (рис. 2,г), який поступово переходив углиб графіту. При навантаженні всередині зразків, де було відсутнє покриття, відбувалося, переважно, в'язко-крихке внутрішньозеренне руйнування (рис. 2,д).

**Висновки.** Таким чином, створення дифузійних карбїдо-кремнієвих шарів на графіті завглибшки до 450 мкм сприяє його структурному зміцненню і міцності при згині в 2,16 раза за рахунок перенесення характеру руйнувань при навантаженні від внутрішньозеренного руйнування і частково по порах у приповерхневих шарах до, переважно, в'язко-крихкого внутрішньозеренного руйнування безпосередньо в поверхневих шарах.

## Література

1. Лисин В.С. Тенденции реструктуризации черной металлургии / Лисин В.С. // Сталь. — 1999. — №10. — С. 1 — 5.

2. Тарасов В.К. Повышение стойкости графитированных электродов руднотермических печей / В.К. Тарасов, А.Я. Жук // Состояние, проблемы и направления развития производства цветных металлов в Украине: сб. науч. тр. — Запорожье: ЗГИА, 1997. — С. 387—390.

3. Проектирование и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов: [учеб. для студ. вузов.] / В.А. Гладких, М.И. Гасик, А.Н. Овчарук, Ю.С. Проїдак. — Днепропетровск: Системные технологии, 2004. — С. 14—20.

4. Герцик С.И. Пути снижения расхода электродов при выплавке стали в дуговых печах / Герцик С.И. // Черная металлургия. — 1989. — Вып. 2. — С. 16—24.

5. Дзяди́кевич Ю.В. Шляхи захисту графітових матеріалів від окислення (Огляд) / Ю.В. Дзяди́кевич, В.Є. Олейник // Порошковая металлургия. — 1996. — №11—12. — С. 41—44.

6. Токович М. Пути снижения расхода графитированных электродов в электросталеплавильном производстве / Токович М. // Hutnik. — 1986. — №9. — С. 243—245.

7. Воденников С.А. Повышение термостойкости графитовых электродов / С.А. Воденников, В.К. Тарасов, О.С. Воденникова // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2005. — №2. — С. 43—44.

Отримана 27.05.09

S. Vodennikov<sup>1</sup>, G. Slynko<sup>2</sup>

**Features of micromechanisms of graphite materials with composition coverages fracture**

<sup>1</sup>Zaporozhya State Engineering Academy, Zaporozhyya;

<sup>2</sup>Zaporozhyya National Technical University, Zaporozhyya

*The mikromexanisms of destruction of graphite materials are considered with composition coverages on the basis of SiC-WC by means of a fractography analysis in the conditions of the mechanical loadings.*

²í ôî òì àö³ü

МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ**

(до 70-річчя кафедри механіки  
ЛНУ ім. І. Франка)

7 — 9 грудня 2009 р.

**Адреса оргкомітету:**

Кафедра механіки, Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Університетська, 1, 79000, м. Львів, Україна.

Тел.: (032)-2394370

E-mail: [kafmech@franko.lviv.ua](mailto:kafmech@franko.lviv.ua)

[sulym@franko.lviv.ua](mailto:sulym@franko.lviv.ua)