

УДК 622.646.023:536.24

Скачков Віктор Олексійович, професор, доктор технічних наук
Іванов Віктор Ілліч, старший науковий співробітник
Нестеренко Тетяна Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук
Бережна Ольга Русланівна, доцент, кандидат технічних наук

ДЕЯКІ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТА ОБ'ЄМНОГО ПІРОГРАФІТУ

Запорізька державна інженерна академія

Вивчено низку фізико-технічних характеристик об'ємного та пластинчастого пірографіту. Встановлено вплив швидкості потоку реакційних газів під час осадження пірографіту на швидкість його зростання, міжплощинну відстань і висоту кристалітів, а також вплив мікроструктурних деформацій, міжплощинної відстані та висоти кристалітів на межу міцності на вигин пірографіту.

Ключові слова: пластинчастий та об'ємний пірографіт, мікроструктурна деформація, міжплощинна відстань, висота кристалітів, межа міцності на вигин, коефіцієнт тертя

Вступ. Пірографіт різної структури, одержаний осадженням з газової фази за температури 2200-2400 °С, є матеріалом, найбільш стійким до зовнішніх умов експлуатації. За підвищенням температури міцність пірографіту в площині осадження зростає, досягаючи максимального значення за температури 2800 °С і становить 320-350 МПа, в той час як модуль його пружності у зазначеній площині характеризується незначним зниженням за температур вище 1500 °С [1].

Під час осадження пластинчастого пірографіту атомні площини вуглецю розташовуються паралельно до поверхні осадження [2-4]. У площині осадження його властивості є ізотропними, а за напрямком, перпендикулярним до зазначеної площини, значно відрізняються, що дозволяє відносити такий матеріал до трансверсально-ізотропного середовища [5].

Структура та властивості пірографіту залежать від технологічних параметрів газофазних процесів його одержання, що реалізують у термохімічних реакторах проточного типу [6,7].

В роботі [8] досліджено залишкові термоструктурні мікронапруження у пластинчастому пірографіту та встановлено залежність його механічних характеристик від залишкових мікронапружень.

Постановка завдання. Завдання дослідження – оцінити кінетичні параметри процесу осадження пірографіту, вивчити його рентгеноструктурні характеристики та їх вплив на механічні й триботехнічні параметри.

Відомо, що структури пластинчастого й об'ємного пірографіту значно відрізняється одна від одної [10]. Якщо, пластинчастий пірографіт

складено плоскими вуглецевими шарами, що мають низькі характеристики міцності у напрямку, перпендикулярному до зазначених шарів, то для об'ємного пірографіту характерні чіткі конуси зростання, в яких атомні вуглецеві площини мають конусоподібний вигляд. Така структура має меншу ступінь текстури та меншу схильність до розтріскування.

Дослідний режим осадження пірографіту реалізовано за температури 2200 °С в умовах лінійної швидкості руху реакційних газів у межах $(80-220) \cdot 10^{-4}$ м/с та їх концентрації $(0,1-3,2) \cdot 10^{-6}$ моль/л.

Методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-2У (мідне K_{α} -випромінювання, довжина хвилі $\lambda = 0,154 \cdot 10^{-9}$ м) визначено міжплощинну відстань d_{002} , висоту кристалітів L_a і L_c , а також рівень залишкових мікроструктурних деформацій $\varepsilon_{\text{зал}}$.

Міжплощинну відстань d_{002} обчислено з використанням кута дифракції θ за формулою Брегга-Вульфа

$$d_{002} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

Розміри кристалітів пірографіту визначено за шириною дифракційних ліній з використанням формули Селякова-Шеррера:

$$L_a = \frac{\lambda \cdot A_a}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

$$L_c = \frac{\lambda \cdot A_c}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

де L_a, L_c – розміри кристалітів у площинах 002 і 004 відповідно; A_a, A_c – постійні коефіцієнти, $A_a = 1,84$; $A_c = 0,89$; β – ширина дифракційних ліній на піввисоті максимуму рентгенограми.

Межу міцності на вигин зразків для пірографіту визначали, використовуючи метод три-точкового вигину на машині FP-100.

У табл. 1 подано залежність межі міцності на вигин σ_B об'ємного пірографіту від висоти його кристалітів L_c для міжплощинної відстані $d_{002} = 3,425$.

Таблиця 1 – Вплив висоти кристалітів L_c пірографіту на його межу міцності на вигин σ_B

$L_c, \text{Å}$	75	80	85	90	93	95	100	105	110
$\sigma_B, \text{МПа}$	20,0	22,3	23,7	24,3	24,5	24,4	24,1	23,4	21,5

За даними табл. 1 встановлено, що межа міцності на вигин σ_B має чіткий максимум, який складає 24,5 МПа за висоти кристалітів $L_c = 93 \text{ Å}$. Подальшими експериментами визначено, що межа міцності на вигин пірографіту практично

лінійно залежить від мікроструктурної деформації та зростає зі збільшенням зазначеного параметра (табл. 2). Зростання міжплощинної відстані пірографіту супроводжується незначним зниженням межі міцності на вигин σ_B (табл. 3).

Таблиця 2 – Вплив мікроструктурної деформації $\varepsilon_{\text{зал}}$ на межу міцності на вигин пірографіту σ_B

$\varepsilon_{\text{зал}} \cdot 10^{-2}, \%$	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
$\sigma_B, \text{МПа}$	6,90	9,80	12,70	15,60	18,50	21,40	24,30

Таблиця 3 – Вплив міжплощинної відстані d_{002} на межу міцності на вигин пірографіту σ_B

$d_{002}, 10^{10} \text{ м}$	3,400	3,405	3,410	3,415	3,420	3,425	3,430
$\sigma_B, \text{МПа}$	22,0	21,8	21,7	21,5	21,4	21,3	21,0

Залежність висоти кристалітів пірографіту L_a від швидкості руху потоку реакційних газів \mathcal{Q} (табл. 4): підпорядковується параболічному закону: максимальне значення зазначеного параметра відповідає величині $266 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ за швидкості руху потоку реакційних газів $140 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$. Одночасно висота кристалітів пірографіту збільшується від $210 \cdot 10^{-10}$ до $255 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ у діапазоні концентрації метану від $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $2,1 \cdot 10^{-6}$ моль/л.

Слід зазначити наявність досить складного характеру залежності змінювання міжплощинної відстані пірографіту d_{002} від швидкості руху потоку реакційних газів \mathcal{Q} (табл. 4). Так, у інтервалі значень параметра $\mathcal{Q} = (120-160) \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$ зафіксовано збільшення міжплощинної відстані пірографіту на $0,55 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, а в інтервалі його значень $(160-200) \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$ – її пониження на $0,8 \cdot 10^{10} \text{ м}$.

Таблиця 4 – Вплив швидкості руху потоку реакційних газів \mathcal{Q} на висоту кристалітів L_c , міжплощинну відстань d_{002} і швидкість осадження пірографіту $V_{\text{ос}}$

$\mathcal{Q} \cdot 10^{-4}, \text{ м/с}$	80	100	120	140	160	180	190	200
$L_c, 10^{-10} \text{ м}$	220	240	256	266	257	248	236	210
$d_{002}, 10^{-10} \text{ м}$	3,4244	3,4252	3,4265	3,4305	3,4324	3,4275	3,4257	3,4246
$V_{\text{ос}} \cdot 10^{-10}, \text{ м/с}$	-	0,010	0,016	0,031	0,062	0,205	0,409	0,595

Зафіксовано наявність нелінійного зростання швидкості осадження пірографіту $V_{\text{ос}}$ від $0,03 \cdot 10^{-10}$ до $0,19 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$ у інтервалі значень $\mathcal{Q} = (80-180) \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$. Під час подальшого збільшення параметра \mathcal{Q} відбувається практично лінійне зростання швидкості осадження пірографіту.

Методами математичної статистики [11] отримано рівняння регресії залежності межі міцності на вигин пірографіту σ_B від рентгеноструктурних і механічних характеристик:

$$\sigma_u = -150,41 + 4,42L_c + 48,37d_{002} +$$

$$+22,36 \varepsilon_{\text{зал}} - 17,92 d_{002}^2 - 10,06 \varepsilon_{\text{зал}}^2 - 0,02L_c^2. \quad (4)$$

На значення фізико-технічних характеристик пірографіту значно впливає рівень залишкових мікроструктурних деформацій $\varepsilon_{\text{зал}}$. В свою чергу, параметр $\varepsilon_{\text{зал}}$ залежить від висоти кристалітів L_c , міжплощинної відстані d_{002} та товщини об'ємного пірографіту [12].

Регресійне рівняння, яке визначає рівень залишкових мікроструктурних деформацій $\varepsilon_{\text{зал}}$, можна подати як квадратичний поліном:

$$\varepsilon_{\text{зал}} = 1,7615 + 0,0013L_c + 0,3300d_{002} - 0,0666h + 0,5160 \cdot 10^{-5}L_c^2 - 0,1360d_{002}^2 + 0,7110 \cdot 10^{-3}h^2 - 0,0014L_c \cdot d_{002} + 0,520 \cdot 10^{-4}L_c \cdot h + 0,0081h \cdot d_{002}, \quad (5)$$

де h – товщина пірографіту.

Дослідження триботехнічних характеристик пірографіту в умовах сухого тертя здійснювали за схемою «диск-колодка». Диск діаметром 50 мм виготовляли із сірого чавуну, зразки обох видів пірографіту виконували, з урахуванням їх анізотропії, у вигляді колодки розмірами 16x10x11 мм. Напрямок площини тертя відносно поверхні осадження складав 0, 45 і 90 кутових градусів.

Випробування зразків здійснювали на машині тертя СМТ-1М за стандартною методикою. Коефіцієнти тертя визначали за вимірним моментом тертя та заданим навантаженням на зразок.

Одержаних значень коефіцієнта тертя об'ємного та пластинчатих пірографіту наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Коефіцієнти тертя об'ємного та пластинчастого пірографіту

Вид зразка пірографіту	Питомий тиск, МПа	Коефіцієнт тертя пірографіту залежно від кута нахилу напрямку площини тертя:		
		0	45	90
Об'ємний	0,55	0,070	0,075	0,217
	0,80	0,192	0,200	0,500
	1,50	0,150	0,180	0,400
Пластинчастий	0,55	0,070	0,080	0,270
	0,80	0,192	0,225	0,360
	1,50	0,120	0,210	0,296

З аналізу одержаних результатів (табл. 5) виходить, що зі збільшенням питомого тиску коефіцієнт тертя змінюється суттєво нелінійно. Найбільше значення зазначеного параметра відповідає питомому тиску 0,80 МПа, збільшення якого до 1,50 МПа зумовлює зниження коефіцієнта тертя на 21-37 % у площині осадження, на 6-10 % під кутом 45° і на 18-20 % під кутом 90°.

Максимальне значення коефіцієнта тертя відповідає площині ковзання, що спрямована перпендикулярно до поверхні осадження. У цьому напрямі пірографіт не має самозмашувальної спроможності, що спричинено зрушенням базових вуглецевих площин одна до одної.

Для площин ковзання, що розташовано під кутом 45°, з'являється можливість для зрушення окремих базових вуглецевих поверхонь. Міжплощинна міцність у пірографіту практично порівнюється з рівнем залишкових напружень. Поява сили тертя, що спрямована паралельно або під невеликим кутом до базових вуглецевих

шарів, створює умови їх відривання на окремих мікроділянках, а також зумовлює появу явища самозмашування та зниження коефіцієнта тертя практично у 2,0-2,5 разів.

У разі збігання площини ковзання з поверхнею осадження пірографіту реалізується механізм самозмашування та коефіцієнт тертя має мінімальне значення.

Висновки. Виявлено відмінності у структурі конусів зростання та їх розташування для пластинчастого й об'ємного пірографіту. Вивчено залежності межі міцності на вигин пірографіту від його рентгеноструктурних характеристик. Встановлено вплив швидкості руху потоку реакційних газів під час осадження пірографіту на швидкість його осадження, міжплощинну відстань і висоту кристалітів. Визначено коефіцієнти тертя для об'ємного та пластинчатого пірографіту залежно від нахилу поверхні тертя до площини осадження.

Бібліографічний перелік

1. **Свойства конструкционных материалов на основе углерода** [Текст] : справочник; под ред. В. М. Соседова. – М. : Машиностроение, 1975. – 335 с.
2. **Федосеев, Д. В.** Гетерогенная кристаллизация из газовой фазы [Текст] / Д. В. Федосеев, Р. К. Жучков, А. Г. Гривцов. – М. : Наука, 1978. – 100 с.
3. **Марьясин, И. А.** Кинетика роста углеродной поверхности в интервале температур 1400-1700 °С [Текст] / И. А. Марьясин, П. А. Теснер // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 140, № 6. – С. 1121-1124.
4. **Городецкий, А. Е.** Структура тонких пленок пироуглерода, полученных из метана [Текст] / А. Е. Городецкий, П. А. Теснер // Доклады АН СССР. – 1972. – Т. 203, № 6. – С. 1336-1338.

5. **Лехницький, С. Г.** Теория упругости анизотропного тела [Текст] / С. Г. Лехницький. – М. : Наука, 1977. – 415 с.
6. **Гурин, В. А.** Кристаллическая структура пирографита и каталитически осажденного углерода [Текст] / В. А. Гурин, Н. С. Полтавцев, И. В. Гурин // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – № 4. – С. 195-199.
7. **Гурин, И. В.** Исследование особенностей термоградиентного газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред с использованием сжиженных углеводородных газов [Текст] / И. В. Гурин, О. Г. Капленко, В. В. Колосенков // Вопросы атомной науки и техники. – 2004. – № 3. – С. 127-129.
8. **Скачков, В. А.** Исследование остаточного напряженного состояния в пластинчатом пирографите [Текст] / В. А. Скачков, В. И. Иванов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании. – Одесса : ИМФ Украины. – 2008. – Т. 4. – С. 43-45.
9. **Скачков, В. А.** Анализ методов газофазного уплотнения пористых углеродных композитов [Текст] / В. А. Скачков // Металлургия : научные труды Запорожской государственной инженерной академии. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2003. – Вып. 7. – С. 70-77.
10. **Румшинский, Л. З.** Математическая обработка результатов экспериментов [Текст] / Л. З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
11. **Скачков, В. О.** Про структурно-механічні характеристики пирографіту [Текст] / В. О. Скачков, В. І. Иванов, О. Р. Бережна, Т. М. Нестеренко // Wykzstalcenie i nauka bez granici-2018. Materials of XIV International research and practice conference. – 07.12-15.12.2018. – Przemysl, 2018. – Vol. 19. – P. 18-19.

Скачков Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: vaskachkov@ukr.net

Иванов Виктор Ильич, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: vitas1850@gmail.com

Нестеренко Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). tan-nesterenko@ukr.net

Бережная Ольга Руслановна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: belargor@ukr.net

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИРОГРАФИТА

Выполнен комплекс экспериментов по изучению физико-технических характеристик объемного и пластинчатого пирографита. Установлено влияние скоростей потока реакционных газов в процессе осаждения пирографита на скорость его роста, межплоскостное расстояние и высоту кристаллитов, а также влияние микроструктурных деформаций, межплоскостного расстояния и высоты кристаллитов на предел прочности на изгиб пирографита.

Ключевые слова: пластинчатый и объемный пирографит, микроструктурная деформация, межплоскостное расстояние, высота кристаллитов, предел прочности на изгиб, коэффициент трения

Skachkov Victor, doctor of technical sciences, Professor of Metallurgy Department, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: vaskachkov@ukr.net

Ivanov Victor, Senior Staff Scientist of the Department of Automated Control by Technological Process, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: vitas1850@gmail.com

Nesterenko Tatiana, candidate of technical sciences, Associate Professor of Metallurgy Department, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: tan-nesterenko@ukr.net

Berezhnaya Ol'ga, candidate of technical sciences, Associate Professor of Metallurgy Department, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: belargor@ukr.net

SOME PHYSICAL AND TECHNICAL PARAMETERS OF PYROGRAPHITE

The row of physical and technical parameters for volume and laminar pyrographite is studied. Influence of flowrates of reaction gases in the deposition process for pyrographite on speed of its height, interplanar spacing and height of crystallines is set, and also influence microstructure deformations, interplanar spacing and height of crystallines on tensile of pyrographite strength on a bend is set.

Keywords: laminar and volume pyrographite, microstructure deformation, interplanar spacing, height of crystallines, tensile strength on a bend, coefficients of friction

Стаття надійшла до редакції 16.01.2019 р.

Рецензент, проф. Г.О. Колобов

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука