

## ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ГАЗОВИХ ПОТОКАХ

**к.т.н., доц. В.О. Скачков, к.т.н., доц. О.Р. Бережна**

*Запорізька державна інженерна академія*

*E-mail: vaskachkov@ukr.net*

*Розроблена методика визначення термокавітаційного зносу вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів у високоенергетичних потоках газів в умовах відновного, окислювального і нейтрального середовища. Проведено експериментальне дослідження ерозійної стійкості карбонізованих, піроушільнених і силіційованих ВВКМ при температурах від  $1650 \pm 50^\circ\text{C}$  до  $1900 \pm 50^\circ\text{C}$  і швидкостях газового потоку від 15,6 м/с до 19,1 м/с.*

**КАРБОНІЗОВАНІ, ПІРОУЩІЛЬНЕНІ, СИЛІЦІЙОВАНІ ВУГЛЕЦЬ - ВУГЛЕЦЕВІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ЕРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ, МАСОВИЙ ЗНОС, ШВИДКІСТЬ ПОТОКУ ГАЗІВ**

**Вступ.** Вуглецеві композиційні матеріали знаходять широке застосування в вузлах та елементах сучасної техніки [1-3].

Основною характеристикою вуглецевих композиційних матеріалів, які застосовують в вузлах аерокосмічних конструкціях, є стійкість до впливу високих температур [4,5]. Найбільший інтерес впливу високих температур представляє їх циклічний вплив. Цикл таких досліджень представлено в роботі [6].

Високоенергетичні характеристики газу забезпечуються величинами температури і швидкості потоку. Швидкість потоку визначається об'ємною витратою кожного компонента газового потоку з урахуванням хімічних реакцій і температурної дії.

Температура потоку визначається тепловиділенням при хімічній взаємодії компонентів газу з урахуванням їх пайового вмісту.

Окислювально-відновний потенціал газового потоку визначається перевищенням стехіометричного співвідношення за вмістом компонентів з окислювальною або відновною характеристикою.

Основні методичні матеріали по визначенню стійкості до горіння викладено в [7].

**Мета роботи.** Розробити методику оцінки стійкості ВВКМ у високоенергетичних потоках газу та провести експериментальне дослідження стійкості карбонізованих, піроушільнених та силіційованих ВВКМ.

**Методика проведення дослідження.** Склад газового потоку складається з кисню, пропану і продуктів їх хімічної взаємодії :



З рівняння (1) виходить, що на окислення 52 г пропану необхідно витратити 160 г кисню. В результаті реакції виходить 132 г  $\text{CO}_2$  і 80 г пари води.

Стехіометричне співвідношення  $\text{C}_3\text{H}_8 - \text{O}_2$  в об'ємних витратах складе:

$$\frac{Q_{\text{C}_3\text{H}_8}}{Q_{\text{O}_2}} = 0,2, \quad (2)$$

де  $Q_{\text{C}_3\text{H}_8}$  та  $Q_{\text{O}_2}$  - об'ємна витрата пропану та кисню.

Вважаючи, що при температурі згорання пропану в середовищі кисню, пари води досить близькі до ідеального газу, можна отримати з урахуванням (1) та (2):

$$Q_{\text{пр}} = \frac{7}{5} Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{C}_3\text{H}_8} \quad (3)$$

де  $Q_{\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}}$  - об'єм продуктів реакції (1).

В результаті температурного розширення при горінні (1) відбувається збільшення об'єму продуктів реакції :

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{пр}} \frac{T_2}{T_1} \quad (4)$$

де  $T_1$  - температура подачі  $\text{C}_3\text{H}_8$  та  $\text{O}_2$  в пальник;

$T_2$  - температура полум'я.

Відновний потенціал газового потоку визначається надлишковим вмістом  $\text{C}_3\text{H}_8$  по відношенню до стехіометричного складу. В цьому випадку об'ємний вміст  $\text{C}_3\text{H}_8$  в продуктах реакції (1) визначиться за формулою:

$$\phi_{\text{C}_3\text{H}_8} = \left( \frac{Q_{\text{C}_3\text{H}_8}}{Q_{\text{пр}}} - \frac{1}{5} \right) \frac{T_2}{T_1} \quad (5)$$

Загальний об'ємний потік продуктів реакції визначиться за формулою:

$$Q_{\text{пр}} = \left( \frac{Q_{\text{C}_3\text{H}_8}}{\phi_{\text{C}_3\text{H}_8}} + \frac{6}{5} Q_{\text{O}_2} \right) \frac{T_2}{T_1} \quad (6)$$

Лінійна швидкість продуктів реакції окислення пропана в середовищі кисню в умовах відновного полум'я визначиться за формулою:

$$V_{\text{пр}}^{\text{B}} = \frac{Q_{\text{C}_3\text{H}_8}^{\text{S}}}{S}, \quad (7)$$

де  $S$  - площа поперечного перерізу витікання продуктів реакції.

Окислювальний потенціал газового потоку визначається надлишковим вмістом  $\text{O}_2$  по відношенню до стехіометричного значення.

В цьому випадку об'ємна витрата  $\text{O}_2$  визначиться за формулою:

$$Q_{\text{O}_2} = \left( \frac{Q_{\text{пр}}}{\phi_{\text{O}_2}} - \frac{6}{5} Q_{\text{C}_3\text{H}_8} \right) \frac{T_2}{T_1} \quad (8)$$

Загальний об'ємний потік продуктів реакції в умовах окислювального потенціалу визначиться за формулою:

$$Q_{\text{пр}} = \left( \frac{Q_{\text{O}_2}}{\phi_{\text{O}_2}} + \frac{1}{5} Q_{\text{C}_3\text{H}_8} \right) \frac{T_2}{T_1} \quad (9)$$

Лінійна швидкість потоку в умовах окислювального полум'я визначиться за формулою:

$$V_{\text{пр}}^{\text{O}} = \frac{Q_{\text{прO}_2}^{\text{S}}}{S}. \quad (10)$$

Співвідношення (6) визначає потужність відновного потенціалу, а співвідношення (9) - потужність окислювального потенціалу.

Відносний відновний потенціал визначиться за формулою:

$$N^{\text{B}} = \frac{Q_{\text{C}_3\text{H}_8} - \frac{1}{5} Q_{\text{O}_2}}{Q_{\text{C}_3\text{H}_8} + \frac{6}{5} Q_{\text{O}_2}} \quad (11)$$

Відносний окислювальний потенціал визначиться за формулою:

$$N^{\text{O}} = \frac{Q_{\text{O}_2} - \frac{1}{5} Q_{\text{C}_3\text{H}_8}}{2 Q_{\text{O}_2} + Q_{\text{C}_3\text{H}_8}} \quad (12)$$

Із співвідношення (11) слідує витрата  $C_3H_8$  для відновного потенціалу  $N^B$  при витраті  $Q_{O_2}$ :

$$Q_{C_3H_8} = \frac{(6V + 1)Q_{O_2}}{(6 - N^B)} \quad (13)$$

Витрата кисню для  $N^0$  при витраті  $Q_{C_3H_8}$  визначиться:

$$Q_{O_2} = \frac{(2V + 5)Q_{C_3H_8}}{1 - N^0} \quad (14)$$

На рис. 1 представлено витрати кисню і пропану для різних значень потенціалу відновного.

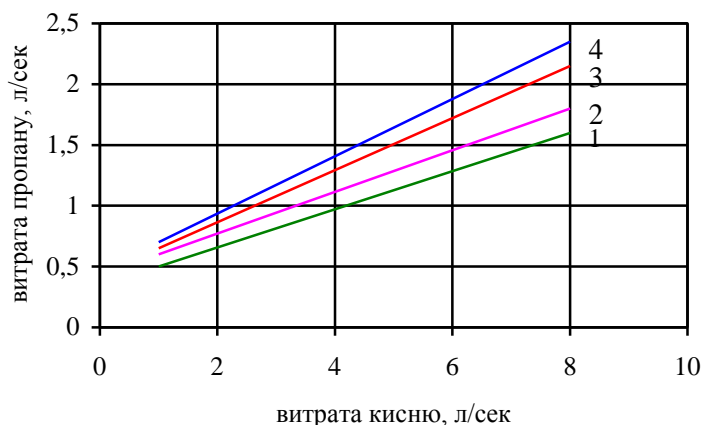


Рис. 1. Витрати кисню і пропану для різних значень відновного потенціалу (1 –  $N^B = 0$ ; 2 –  $N^B = 0,05$ ; 3 –  $N^B = 0,10$ ; 4 –  $N^B = 0,15$ ).

На рис. 2 представлено витрати пропану і кисню для різних значень окислювального потенціалу

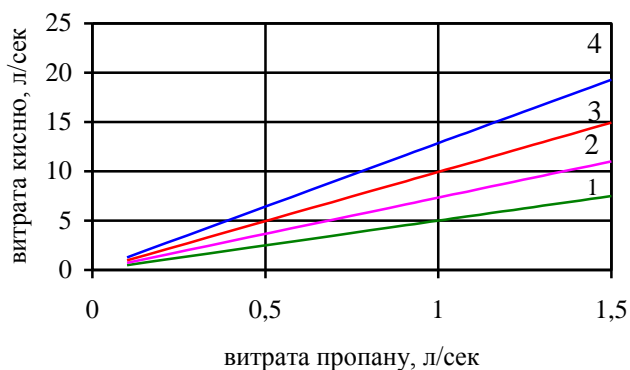


Рис. 2. Витрати пропану і кисню для різних значень окислювального потенціалу (1 –  $N^O = 0$ ; 2 –  $N^O = 0,05$ ; 3 –  $N^O = 0,10$ ; 4 –  $N^O = 0,15$ ).

Схема установки для експериментального визначення величини зносу у високотемпературних потоках газу представлена на рис. 3.

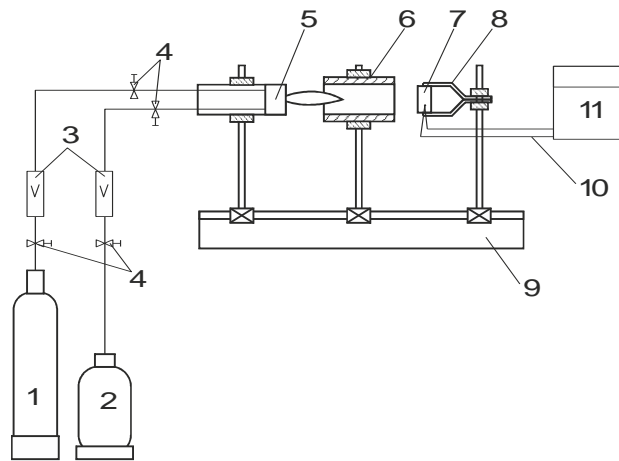


Рис. 3. Схема установки для визначення термоокислювального зносу у високотемпературних потоках газу (1 - балон з киснем; 2 - балон з пропаном; 3 - ротаметри; 4 - вентилі; 5 - пальник; 6 - керамічний екран; 7 - зразок; 8 - фіксатор зразка; 9 - основа; 10 - термопара ВР5/20; 11 - КСП- 10).

**Експериментальне дослідження.** Установка працює таким чином. На редукторах балонів з киснем і пропаном встановлюється робочий тиск. Відкривається вентиль 4 (рис. 3) перед ротаметром пропана, а вентилем 4 після ротаметра встановлюється витрата пропана на рівні 0,1 л/с і підпалюється факел на пальнику 5. Потім встановлюється вибрана витрата пропана і встановлюється витрата кисню, відповідна вибраному відносному відновному потенціалу (рис. 1) або відносному окислювальному потенціалу (рис. 2).

У фіксаторі 8 (рис. 3) встановлюється зразок досліджуваного матеріалу 7. Зразок поміщається на заданій відстані від зрізу керамічного екрану. Із зворотного боку зразка фіксується термопара 10, підключена до приладу КСП, що записує температуру (поз. 11, рис. 3).

Після закінчення режиму зразок витягається з фіксатора 8 (рис. 3) і охолоджується в ексикаторі в середовищі аргону.

Зразки досліджуваного матеріалу виготовляються у вигляді прямокутника з розмірами  $(30 \pm 5) \times (45 \pm 5)$  і завтовшки, відповідною досліджуваного матеріалу.

Із зворотного боку зразка формується отвір під установку термопари діаметром  $5 \pm 1$  мм завглибшки  $3 \pm 1$  мм.

Геометричні розміри зразка вимірюються з точністю 0,1 мм. Визначається маса зразка з точністю  $0,05 \pm 0,01$  г. Заміряні характеристики заносяться в журнал випробувань.

Виготовляється не менше трьох зразків для визначення термоокислювального зносу для кожного режиму, що задається призначеним відносним потенціалом окислювального або відновного типу. Витрата пропану та витрата кисню визначаються по графікам рис. 1 і рис. 2.

Масовий термоокислювальний знос визначається за формулою:

$$I_M = \frac{m_0 - m_k}{F \cdot \tau}, \quad (15)$$

де  $I_M$  - масовий знос, г/мм<sup>2</sup>·с;  
 $m_0, m_k$  - маса зразка до і після випробувань, г;  
 $F$  - площа зразка, мм<sup>2</sup>;  
 $\tau$  - тривалість режиму, с.

Ерозійна стійкість у високоенергетичних потоках газу визначалася на наступних матеріалах:

- карбонізований ВВКМ;
- піроушільнений ВВКМ;
- силіційований ВВКМ.

Результати випробувань представлені в табл. 1, 2, 3.

Таблиця 1

**Ерозійна стійкість карбонізованих ВВКМ**

№ з/п	Площа поверхні, $\text{см}^2$	Маса, г		Напрямок потоку, кут.град	Швидкість потоку, м/с	Час випробувань, с	Потенціал, %			Віднесення маси, $10^4 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$
		до випробування	після випробування				Відновний	Стехіометричний	Окислювальний	
1	9,0	22,22	22,19	90	15,6	120	-	0	-	0,276
2	10,6	8,27	8,26	45	17,7	120	10	-	-	0,078
3	8,0	6,30	6,29	90	18,1	120	15	-	-	0,105
4	10,6	3,96	3,93	45	18,2	120	-	-	10	0,236
5	13,3	9,18	9,15	90	18,2	120	-	-	10	0,187

Таблиця 2

**Ерозійна стійкість піроушільнених ВВКМ**

№ з/п	Площа поверхні, $\text{см}^2$	Маса, г		Напрямок потоку, кут.град	Швидкість потоку, м/с	Час випробувань, с	Потенціал, %			Віднесення маси, $10^4 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$
		до випробування	після випробування				Відновний	Стехіометричний	Окислювальний	
1	9,2	16,40	16,37	45	18,2	180	-	-	10	0,177
2	9,4	16,86	16,83	90	15,6	180	-	0	-	0,176
3	10,8	18,76	18,71	90	19,1	180	-	-	15	0,205
4	7,8	14,11	14,14	45	18,1	180	15	-	-	-0,21
5	10,2	18,13	18,10	90	17,7	180	10	-	-	0,163
6	9,2	16,43	16,41	45	17,7	120	10	-	-	0,160

Таблиця 3

**Ерозійна стійкість силіційованих ВВКМ**

№ з/п	Площа поверхні, $\text{см}^2$	Маса, г		Напрямок потоку, кут.град	Швидкість потоку, м/с	Час випробувань, с	Потенціал, %			Віднесення маси, $10^4 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$
		до випробування	після випробування				Відновний	Стехіометричний	Окислювальний	
1	12,8	22,94	22,92	90	15,6	180	-	0	-	0,077
2	15,2	23,31	23,30	45	17,7	180	10	-	-	0,067
3	13,7	19,53	19,58	90	18,1	180	15	-	-	-0,02
4	11,7	14,16	14,14	45	15,6	180	-	0	-	0,081
5	19,6	26,51	26,49	90	18,2	180	-	-	10	0,057
6	18,9	27,56	27,52	45	19,1	180	-	-	15	0,117

Температура газового потоку визначається повнотою згорання пропана. Для згорання в стехіометричних умовах температура знаходиться в межах  $1900 \pm 20^\circ\text{C}$ .

Для згорання в умовах відновного потенціалу температура полум'я знижується до температури  $1650 \pm 50^\circ\text{C}$ .

В умовах окислювального потенціалу температура полум'я знижується до  $1750 \pm 50^\circ\text{C}$ . Проте при окислювальному потенціалі температура поверхні зразка, омиваної газовим потоком, збільшується.

В умовах окислювального потенціалу ерозійна стійкість знаходиться в межах  $0,07...0,117 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$  для силіційованих ВВКМ,  $0,276 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$  – для карбонізованих ВВКМ і для піроушільнених ВВКМ –  $0,177...0,205 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ .

В умовах відновного потенціалу на робочій поверхні зразків осідає технічний вуглець. Для зразка №3 табл.2 та №3 табл. 3 в умовах відновного потенціалу 15 % спостерігається приріст маси, обумовлений технічним вуглецем.

Найбільш стійкий в умовах окислювального потенціалу являється силіційований ВВКМ, менш стійким являється карбонізований ВВКМ.

### ВИСНОВКИ

1 Розроблена методика оцінки термокавітаційного зносу у високоенергетичних потоках газу в умовах відновного, окислювального та нейтрального оточуючого середовища.

2 Визначена відносна зміна маси в умовах дії окислювального, відновного і нейтрального середовища для карбонізованих, піроушільнених і силіційованих ВВКМ.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Павлов С.В., Результаты разработки и исследований работоспособности камер сгорания ЖРДМТ из УУКМ / С.В. Павлов, В.Д. Грачев, А.С. Токарев // Ракетно-космическая техника, вып. 3 (136).- НИИ тепловых процессов.- 1992.- 30-33 с.

2. Черненко Н.М. Технологические аспекты получения жаропрочных углерод-углекерамических композиционных материалов / Н.М. Черненко, Н.Ю. Бейлина, Д.Н. Черненко // 3-я международная научно-практическая конференция «Композиционные материалы: производство, применение, тенденции рынка» «Препреги, премиксы, SMC/BMC/CIC. Материалы. Технологии. Применение». – Москва. – 2009. - С.2 – 8.

3. Потапов А.М. Перспективы использования углерод-углеродных композиционных материалов на основе вискозных углеродных волокон для потребностей ракетно-космической техники // Вопросы атомной науки и техники. -2015.- №5(99) .-С. 152 – 156. ISSN 1562-6016.

4. Буланов, И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст]: учебник для вузов / И. М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана.-1998. – 516 с.

5. Кошляков В.В. Перспективы применения композиционных материалов в ракетных двигателях / В.В. Кошляков, В.В. Миронов // Ракетно-космические двигательные установки: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана .- 2008. – С. 10-11.

6. Грачева Л.И. Тепловое деформирование углерод-углеродных композиционных материалов с различными схемами армирования при термоциклировании // Проблемы прочности.- 2007.- № 3.- С. 118 – 133. ISSN 0556-171X.

7. ГОСТ 28157-89. Методы определения стойкости к горению.