

УДК 620.22:661.666

DOI:10.26661/2071-3789-2019-2-42-07

Карпенко Ганна Володимирівна ⁽¹⁾, кандидат технічних наук
Щербакова Олена Петрівна ⁽²⁾, доцент, кандидат технічних наук
Прохорова Анастасія Дмитрівна ⁽²⁾, магістрант

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КАРБОНІЗАЦІЇ НИЗЬКОЩІЛЬНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТІВ З ТЕРМОХІМІЧНИМ ЗМІНЮВАННЯМ КОМПОНЕНТІВ

⁽¹⁾ Інженерний інститут Запорізького національного університету
⁽²⁾ Карагандинський державний технічний університет, Казахстан

Розроблено математичну модель процесу карбонізації вуглецевих композитів з термохімічним змінюванням компонентів. Виконано дослідження фізико-механічних характеристик, а також термоструктурних функцій для зазначених композитів.

Ключові слова: вуглецеві композити, карбонізація, математична модель, фізико-механічні характеристики, термоструктурні функції.

Вступ. Проблема формування карбонізованих вуглецевих композитів із заданою структурою та фізико-механічними властивостями є актуальною, а методи розрахунків технологічних режимів одержання таких матеріалів мають безперечний науковий інтерес [1-3].

Одним з ефективних методів створення в об'ємі карбонізованих вуглецевих матеріалів заданої поруватості з регульованою формою є уведення пороутворювачів, які повинні мати низький коксовий залишок, а також характеризуватися певним розміром, формою та розташуванням в об'ємі вуглецевих композитів. Під час сокарбонізації вуглецевих волокон, феноло-формальдегідної матриці та пороутворювачів формують необхідну структуру карбонізованих вуглецевих композитів [4-5].

Технологія виробництва вуглецевих композитів припускає реалізацію процесів формування та затвердіння вуглепластикових заготовок, їх подальшої карбонізації та піролітичного ущільнення. Двокомпонентні вуглецеві композити формують на основі вуглецевих волокон і полімерних матриць. Як полімерну матрицю застосовують феноло-формальдегідні смоли, які піддають твердненню за температури 433-373 К. Виконання вище перелічених процесів досягають створенням необхідного реакційного середовища, а також точного виконання заданих температурних режимів обробки.

Підтримка на заданому рівні температурних режимів тверднення вуглепластикових заготовок в автоклаві аеродинамічного типу потребує створення спеціальних алгоритмів управління, що враховують темп нагрівання або охолодження на попередні моменти часу. В роботі [6] описано регресійно-аналітичну модель процесу нагрівання вуглепластикової заготовки під час ав-

токлавного затвердіння, що враховує передісторію нагрівання автоклава, поточну температуру в його робочому об'ємі, залежить від тиску робочого газу (азоту) та дозволяє визначити температуру автоклава за заданою кривою змінювання температури заготовки, що піддають твердненню. В роботі [7] запропоновано алгоритм адаптивного управління автоклавним твердненням вуглепластикової заготовки, який засновано на методі уточнення коефіцієнтів математичної моделі.

Ущільнення поруватих вуглецевих композитів піровуглецем з газової фази реалізують у термохімічних реакторах проточного типу. Можливі схеми ущільнення припускають створення ізотермічних умов процесу або реалізацію градієнта температури за об'ємом матеріалу, якого ущільнюють. Математичні моделі таких схем ущільнення з урахуванням гомогенно-гетерогенного процесу розкладання реакційного газу (метану) подано у роботах [8,9].

Постановка завдання. Метою роботи є розробка математичної моделі карбонізації вуглепластикової заготовки, яка характеризується структурним і фізико-механічним змінюванням компонентів композиту (волокон, утворювачів пор і матриці).

Головна частина досліджень. Під час карбонізації вуглецевих композитів відбуваються складні фізико-хімічні перетворення в об'ємі полімерної матриці. Одночасно виділяються летючі газоподібні речовини різного складу та реалізуються процеси термохімічної усадки й температурного поширення. Таке різноманіття процесів зумовлює створення мікротріщин, мікропор і формування полю структурних напружень.

Для розрахунків процесів, яких досліджують, можливо використання статистичних методів мікромеханіки композитів [10]. У такому разі класичні підходи мікромеханіки допов-

нують урахуванням процесів руйнування та змінювання властивостей компонентів як результат механічних навантажень і дії температури.

У зв'язку з цим будують математичну модель процесу карбонізації, що засновано на розв'язанні статистичної крайової задачі мікро-механіки композитів, поданих як мікронеоднорідне середовище класу B_2 , що враховує утворення мікроскопічних дефектів, дозволяє визначити мікроструктурні напруження та оцінювати рівень мікроструктурних перетворень, а також змінювання властивостей і коефіцієнтів термохімічного осадження у компонентах композиту [11].

Для модельного середовища із властивостями, що змінюються під час термічної обробки, фізичні рівняння можуть бути поданими у наступному вигляді:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{ij\alpha\beta}^k \cdot 1 - \omega^k \cdot \lambda_k \cdot \left[\varepsilon_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^N b_{\alpha\beta}^k \cdot 1 - \psi^k \cdot \lambda_k \cdot \Delta T \right], \quad (1)$$

де Q_{ijmn} – випадкові модулі пружності компонентів вуглецевого композиту; ξ_{ijk} , ε_{ij} – мікроструктурні напруження та деформації відповідно; ω^k – випадкові термоструктурні функції, що встановлюють залежність пружних властивостей вуглецевого композиту від ступеня його структурних перетворень під час термохімічної обробки та враховують процеси створення тріщин; λ_k – випадкова індикаторна функція, яка визначає ймовірність належності даної точки в об'ємі вуглецевого композиту з номером k ; b_{ij} – випадкові компоненти лінійного термічного поширення компонентів композиту; ψ^k – випадкові термоструктурні функції, що встановлюють залежність термохімічної усадки компонентів вуглецевого композиту від температури процесу; T – температура процесу; N – кількість компонентів у вуглецевому композиті; k – номер компоненту композиту ($k = 1-3$).

Визначення параметрів випадкових термоструктурних функцій ψ^k здійснюють встановленням термохімічної усадки кожного компонента вуглецевого композиту [12].

Рівняння (1) доповнюють крайовими умовами процесу, якого розглядають:

$$\xi_{i\alpha,\alpha} = 0; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0,5 \chi_{i,j} + \chi_{j,i}; \quad (3)$$

$$\chi_i|_S = 0, \quad (4)$$

де χ_i – вектор випадкових мікроструктурних переміщень; S – межа композиту.

Розв'язання задачі (1)-(4) знаходили у переміщеннях та подавали як систему рівнянь:

$$C_{ij\alpha\beta} \cdot \chi_{\beta,\alpha}^0 = -\Pi_{ij}, \quad (5)$$

де $C_{ij\alpha\beta} = \sum_{k=1}^N \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \cdot \langle \lambda_k \rangle$; $\chi_{ij}^0 = \chi_{ij} - \langle \chi_{ij} \rangle$;

$$\Pi_{ij} = \sum_{k=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^k \cdot 1 - \omega^k \cdot \lambda_k \cdot \left[e_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^N b_{\alpha\beta}^k \cdot 1 - \psi^k \cdot \lambda_k \cdot \Delta T \right] + \sum_{k=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^k \cdot \omega^k \cdot \chi_{\alpha\beta}^0;$$

$e_{ij} = \langle \varepsilon_{ij} \rangle$ – мікроструктурні деформації вуглецевого композиту; $\langle \dots \rangle$ – оператор статистичного усереднення.

Систему (5) розв'язували щодо флуктуацій мікроструктурних деформацій у вигляді:

$$\varepsilon_{ij}^0 = \int_V G_{i\psi,j} \cdot \Pi_{\phi\alpha,\alpha} dV, \quad (6)$$

де G_{ij} – тензор Гріна для компонента вуглецевого композиту з об'ємом V .

Усереднюючи рівняння (3) та явно виділяючи частину, яка є відповідальною за пружні характеристики матеріалу, що досліджують, можна записати

$$C_{ijmn}^I = \sum_{k=1}^N Q_{ijmn}^k \cdot [1 - \langle \omega^k \rangle] \cdot [\langle \lambda_k \cdot \Phi^0 \rangle], \quad (7)$$

де C_{ijmn}^I – мікроскопічні модулі пружності вуглецевого композиту; Φ_{ijmn}^0 – флуктуація тензора четвертого рангу, що залежать від властивостей компонентів композиту.

Записуючи рівняння (3) для флуктуацій мікроструктурних напружень, отримують

$$\zeta_{ij}^0 = \sum_{k=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^{0,k} \cdot (1 - \omega^k) \cdot \lambda_k \cdot \left[e_{\alpha\beta} + e_{\alpha\beta}^0 - \sum_{k=1}^N b_{\alpha\beta}^k \cdot (1 - \psi^k) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T \right] - \sum_{k=1}^N C_{ijmn}^k \cdot \omega^k \cdot \chi^k \cdot \left[e_{\alpha\beta} + e_{\alpha\beta}^0 - \sum_{k=1}^N b_{\alpha\beta}^k \cdot (1 - \psi^k) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T \right]. \quad (8)$$

Підставляючи рівняння (8) до співвідношення (6), визначають флуктуації мікроструктурних напружень. Дисперсії розподілу мікроструктурних напружень обчислюють за відомими формулами

$$D_{ij}^{mn} = \langle \zeta_{ij}^0 \cdot \zeta_{mn}^0 \rangle. \quad (9)$$

Середні значення мікроструктурних напружень у компонентах вуглецевого композиту визначають як запропоновано у роботі [12]

$$\sigma_{ij}^k = \sigma_{ij} + \langle \lambda_k \rangle^{-1} \langle \lambda_{0,k} \cdot \zeta_{ij}^0 \rangle, \quad (10)$$

де ζ_{ij} , σ_{ij} – мікроскопічні та макроскопічні на-

пруження відповідно у компоненті композиту з номером k .

Дисперсію розподілу мікроструктурних напружень у компонентах вуглецевого композиту обчислюють з урахуванням формул (8) та (10)

$$D_{ij}^k = \langle \zeta_{ij}^{0,k} \rangle = (\sigma_{ij})^2 + D_{ij}^{0,k} - \langle \lambda_k \rangle \cdot \left[\langle \lambda_{0,k} \cdot (\zeta_{ij}^0)^2 \rangle + 2\sigma_{ij}^2 \langle \lambda_{0,k} \cdot \zeta_{ij}^0 \rangle \right]. \quad (11)$$

Термоструктурні функції ω^k задають у вигляді

$$\omega^k = \int_{T_0}^T \Omega^k(\zeta) \cdot F^k(T) dT, \quad (12)$$

де $\Omega^k(\zeta)$, $F^k(T)$ – випадкові функції, які залежать від рівня діючих напружень і температури відповідно.

Моментні функції першого та другого порядку для співвідношення (12) подають як

$$\langle \omega^k \rangle = \int_{T_0}^T \langle \Omega^k(\zeta) \rangle \langle F^k \rangle dT; \quad (13)$$

$$\langle \omega^{k^2} \rangle = \int_{T_0}^T \langle [\Omega^k(\zeta)]^2 \rangle \langle F^{k^2} \rangle dT. \quad (14)$$

У співвідношеннях (13) і (14) середнє значення та дисперсію функції $\Omega^k(\zeta)$ визначають з урахуванням рівнянь (10) і (11)

$$\langle \Omega^k(\zeta) \rangle = P^k = 1 - \frac{1}{2\pi \cdot D_{ij}^{0,k}} \int_{\sigma_B^-}^{\sigma_B^+} \exp\left[-\frac{x - \sigma_{ij}^k}{2D_{ij}^{0,k}}\right] dx; \quad (15)$$

$$\langle \Omega^{0,k}(\zeta) \rangle^2 = P^k \cdot (1 - P^k), \quad (16)$$

де σ_B^+ , σ_B^- – межа міцності компонентів композиту під час розтягування та стиску відповідно.

Для полімерної матриці, утворювачів пор і вуглецевих волокон моментні функції першого та другого порядку для $F^k(T)$ записують у вигляді

$$\langle F^k(T) \rangle = \sum_{i=1}^Q F_p^k \cdot \exp\left[-\frac{F_q^k \cdot (T_i - T_n)}{R \cdot T}\right]; \quad (17)$$

$$\langle F^{0,k^2}(T) \rangle = \sum_{i=1}^Q F_m^k \cdot \exp\left[-\frac{F_n^k \cdot [T_i - T + \tau]}{R^2 \cdot T^2}\right]^2, \quad (18)$$

де Q – кількість характеристичних температурних точок, за яких змінюється характер залежності пружних властивостей компонентів вуглецевого композиту від температури; F_p , F_q , F_m , F_n – експериментальні константи ($p = 1-3$; $q = 1-3$; $m = 1-3$; $n = 1-3$).

Моментні функції першого та другого порядку для ψ^k , які встановлюють залежність змі-

нювання термоструктурної усадки компонентів вуглецевого композиту від температури, можна обчислити за допомогою співвідношень (19) і (20).

$$\langle \psi_T^k \rangle = \sum_{i=1}^Q \eta_i^k \cdot \exp\left[\frac{\Delta_i^k \cdot (T_i - T_n)}{R \cdot T}\right]; \quad (19)$$

$$\langle \psi^{0,k^2} \rangle = \sum_{i=1}^Q \gamma_i^k \cdot \exp\left[\frac{Y_i^k \cdot (T_i - T_n)}{R^2 \cdot T^2}\right]^2, \quad (20)$$

де η_i , Δ_i , γ_i , Y_i – параметри термоусадкових функцій композитів.

Запропонована модель дозволяє з використанням спеціально розробленої програми для ПЕВМ здійснювати вибирання й обробку експериментальних даних, визначати середні значення та дисперсії мікронапружень у компонентах вуглецевих композитів, виконувати оцінку пошкодження окремих компонентів. Крім того, модель дозволяє оцінювати змінювання пружних властивостей, коефіцієнтів термохімічного осадження та лінійного термічного поширення для довільних температур карбонізації вуглецевих композитів залежно від рівня діючої температури.

Під час карбонізації вуглепластикових заготовок феноло-формальдегідна матриця змінює свої фізико-механічні характеристики. Для дослідження її фізико-механічних перетворень виготовляли зразки за наступною технологічною схемою: одержання феноло-формальдегідної смоли (форполімеру): нагрівання до температури 368 К і витримка 45 хв.; приготування прес-порошку (помел форполімеру до порошку з розмірами не більше ніж 0,2 мм); пресування зразків (питомий тиск – 30 МПа, температура – 453±10 К, час витримки – 120 хв.); механічне вирізання зразків довжиною 60 мм, шириною 15 мм і товщиною 7 мм.

Процес карбонізації реалізовано у середовищі захисного газу (азоту) зі швидкістю нагрівання 6-8 град./хв. до температури 1273 К. З результатів експериментів знаходили значення параметрів у формулах (19) і (20), які подано у табл. 1 і 2.

Таблиця 1 – Параметри термоусадкових функцій для феноло-формальдегідної смоли

Температура T_b, K	η_i	Δ_i	γ_i	Y_i
673	0,08	0,13	0,04	0,12
873	0,26	0,24	0,03	0,19
1073	0,32	0,21	0,04	0,18

Таблиця 2 – Параметри термоусадкових функцій для матеріалів пороутворювачів за температури 1173 К

Термоусадкові функції	Бавовняні волокна	Поліетиленові волокна	Віскозні волокна
η_i^k	0,20	0,10	0,13
Δ_i^k	0,05	0,04	0,04
γ_i^k	0,07	0,13	0,09
Y_i^k	0,03	0,03	0,02

Таблиця 3 – Параметри термоструктурних функцій для компонентів низькощільного вуглецевого композиту

Параметри	Феноло-формальдегідна смола	Бавовняні волокна	Поліетиленові волокна	Віскозні волокна
$\Phi_{i(i=1)}$	0,120	0,060	0,540	0,157
$\delta_{i(i=1)}$	0,040	0,045	0,030	0,004
$h_{i(i=1)}$	0,014	0,070	0,021	0,084
$f_{i(i=1)}$	0,021	0,031	0,009	0,001

З використанням метода регресійного аналізу [12] визначали значення параметрів у функціях (17) и (18), які подано в табл. 3.

У табл. 4 наведено змінювання модуля пружності, усадки та межі міцності низькощільного вуглецевого композиту залежно від температури карбонізації.

Таблиця 4 – Фізико-механічні характеристики низькощільного композиту

Характеристика композиту	Температура, К				
	200	400	600	800	1000
Межа міцності, МПа	<u>0,20</u> 0,19	<u>0,22</u> 0,21	<u>0,40</u> 0,42	<u>0,90</u> 0,88	<u>1,10</u> 1,12
Осідання, %	<u>0,2</u> 0	<u>5,0</u> 5,2	<u>13,2</u> 14,6	<u>20,1</u> 19,2	<u>24,5</u> 25,0
Модуль пружності, МПа	<u>100</u> 94	<u>108</u> 102	<u>148</u> 150	<u>190</u> 187	<u>250</u> 244

Примітка: у чисельнику наведено експериментальні значення, у знаменнику - розрахункові значення

Дані, що наведено у табл. 4, та розроблена математична модель процесу карбонізації композиту дозволяють прогнозувати властивості одержаного матеріалу з урахуванням термохімічних перетворень його компонентів.

Так, видно, що модуль пружності композиту з підвищенням температури збільшується. Най-

більш різке збільшення його значень спостерігають за досягненням температури 1000 К. Змінювання усадки вуглецевого композиту зумовлено термохімічними перетвореннями, які відбуваються з його компонентами під час карбонізації. З підвищенням температури починають виділятися газоподібні речовини як результат перетворення матричного матеріалу (феноло-формальдегідної смоли) на полімер сітчастої структури. За досягненням температури 1000 К є незначне змінювання усадки матеріалу. Міцність композиту під час карбонізації різко змінюється за досягненням температури 400 К і досягає свого максимального значення (~ 1,2 МПа) за температури 1000 К.

Висновки. Запропоновано підхід до реалізації процесу карбонізації вуглецевих композитів з утворювачами пор. Розроблено математичну модель зазначеного процесу, що дозволяє обчислити змінювання пружних і міцнісних характеристик низькощільного вуглецевого композиту під час нагрівання. Виконано розрахунки головних фізико-механічних властивостей низькощільного композиту. Одержані дані підтверджуються результатами експериментальних досліджень.

Бібліографічний перелік

1. **Скачков В. О.,** Карпенко Г. В., Карпенко Н. О. Дослідження процесу карбонізації вуглецевих композиційних матеріалів. *Металургія : труды ЗГИА*. Запорозьке : РИО ЗГИА, 2005. Вип. 13. С. 80-86.
2. **Карпенко А. В.,** Скачков В. А., Фильченков А. С. Модель процессов карбонизации углеродного композиционного материала. *Компьютерне моделювання в хімії та технологіях* : тези доп. міжнар. практ. конф. Черкаси, 12-16.05.2008 р. Черкаси : ЧДТУ, 2008. С. 169-170.
3. **Скачков В. А.,** Кудиевский С. С., Карпенко А. В., Шаповалов Р. А. Формирование заготовок углеродных композиционных материалов из водных суспензий. *Металургія : труды ЗГИА*. Запорозьке : РИО ЗГИА, 1999. Вип. 2. С. 82-87.
4. **Скачков В. А.,** Карпенко А. В. Моделирование структурно-механических изменений при карбонизации композиционных материалов на основе углерода. *Вопросы химии и химической технологии*. 2007. № 6.

- С. 165-167.
5. **Карпенко А. В.**, Скачков В. А., Червоний И. Ф. Получение низкоплотных углеродных карбонизованных материалов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 2/5. С. 48-51.
 6. **Математическая модель** процесса нагрева при автоклавном отверждении заготовок из композитных материалов / В. А. Скачков, В. И. Иванов, Н. А. Карпенко и др. *Термодинамика технологических систем*. Краматорск: КИИ, 1993. С. 22-23.
 7. **Адаптивне управління** температурним режимом процесу автоклавного отвердження композиційних матеріалів на основі вуглецевих волокон і полімерної матриці / В. О. Скачков, В. І. Иванов, В. П. Грицай та інш. *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*. 2001. № 4. С.38-41.
 8. **Скачков В. А.**, Иванов В. И., Карпенко А. В., Шаповалов Р. А. Формирование плотности углеродных композитов при изотермическом уплотнении из газовой фазы. *Металлургия : труды ЗГИА*. Запорожье : РИО ЗГИА, 2001. Вып. 4. С.74-78.
 9. **Гурин В. А.**, Гурин И. В., Фурсов С. Г. Исследование газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред методом радиально движущейся зоны пролиза. *Вопросы атомной науки и техники*. Харьков : ННЦ «ХФТИ», 1999. Вып. 4 (76). С. 32-45.
 10. **Волков С. Д.**, Ставров В. П. Статистическая механика композитных материалов. Минск : БГУ, 1978. 206 с.
 11. **Соколкин Ю. В.**, Скачков В. А., Танкеева М. Г. Исследование процессов деформирования и разрушения композитных материалов и конструкций при сложном нагруженном состоянии. *Механика конструкций из композиционных материалов*. Новосибирск : Наука, 1984. С. 97-101.
 12. **Моделирование процессов** сокарбонизации углеродных композитов с порообразователями / В. А. Скачков, В. Д. Карпенко, А. В. Карпенко и др. *Материалы и покрытия в экстремальных условиях : исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий* : труды конф. 13-17.09.2004. Крым, Кацивели-Понизовка, 2004. С. 61-62.
 13. **Дрейпер Н.**, Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. 3-е изд. Москва : Диалектика, 2007. 912 с. ISBN 0-471-17082-8.

Карпенко Анна Владимировна, кандидат технических наук, научно-исследовательский сектор, инженерный институт Запорожского национального университета (Запорожье, Украина). E-mail: abkarpenko_77@meta.ua

Щербакова Елена Петровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра нанотехнологий и металлургии, Карагандинский государственный технический университет (Казахстан. Караганда). E-mail: kargtu@kstu.kz

Прохорова Анастасия Дмитриевна, магистрант, кафедра нанотехнологий и металлургии, Карагандинский государственный технический университет (Казахстан. Караганда). E-mail: kargtu@kstu.kz

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КАРБОНИЗАЦИИ НИЗКОПЛОТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ С ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ

Разработана математическая модель процесса карбонизации углеродных композитов с термохимическим изменением компонентов. Выполнены исследования физико-механических характеристик, а также термоструктурных функций для указанных композитов.

Ключевые слова: углеродные композиты, карбонизация, математическая модель, физико-механические характеристики, термоструктурные функции

Karpenko Ann, Candidate of Technical Sciences, Science and Research Sector, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: abkarpenko_77@meta.ua

Tsherbakova Helen, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Nanotechnologies and Metallurgy, Karaganda State Technical University (Kazakhstan, Karaganda). E-mail: kargtu@kstu.kz

Prokhorova Anastasia, postgraduate, Department of Nanotechnologies and Metallurgy, Karaganda State Technical University (Kazakhstan, Karaganda). E-mail: kargtu@kstu.kz

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR CARBONATING OF LOW DENSITY CARBON COMPOSITES WITH THERMOCHEMICAL CHANGE OF COMPONENTS

The paper presents a mathematical model of the carbonization process of carbon composite materials. In the process of mathematical modeling, structural and physics-mechanical changes of the components of the composite, such as carbon fibers, pore-forming materials, phenol-formaldehyde resin, were taken into account. In the process of carbonization of carbon composites, under the influence of temperature, physico-chemical transformations occur in the volume of the polymer matrix. To calculate the destruction processes, the micromechanics of composites was used taking into account the processes of destruction and changes in the properties of components. During the experiments, the parameters of random thermostructural functions determined by the thermochemical shrinkage of each component of the carbon composite were determined. The carbonization process was implemented in a shielding gas (nitrogen) with a heating rate of 6 ... 8 K / min to a temperature of 1273 K. The shrinkage of the samples was determined periodically every 373 K.

The experimental data obtained in this work and the developed mathematical model of the carbonization of the composite material taking into account thermochemical transformations its components make it possible to predict the properties of the resulting material. The change in shrinkage of the low-density carbon composite material is due to thermochemical transformations occurring with the components of the composite material in the process of carbonization. Up to a temperature of 200 °C, changes occur in the materials - blowing agents, with increasing temperature, gaseous substances begin to be released - the result of the transformation of the matrix material - phenol-formaldehyde resin - into a polymer of a mesh structure. Upon reaching a temperature of 800 °C, the shrinkage of the material changes slightly. The strength of the composite material during carbonization sharply changes after 400 °C and reaches its maximum value of ~ 1.1 MPa at a temperature of 1000 °C. The proposed computer program allows one to select and process experimental data, determine the average values and dispersions of micro stresses in the components of carbon composite materials, evaluate damage to components, evaluate the change in elastic properties, thermo chemical shrinkage coefficients, and linear thermal expansion of the composite for arbitrary carbonization temperatures of carbon composite materials depending from the level of the current temperature.

Key words: carbon composites, carbonating, mathematical model, physical and mechanical characteristics, thermostructural functions

Стаття надійшла до редакції 12.06.2019 р.
Рецензент, проф. В. О. Скачков