

7. Lifeng ZHANG, Brian G. THOMAS. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness // ISIJ International, Vol. 43 (2003), No. 3, pp. 271-291
8. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали /Исаев О.Б., Чичкрев Е.А., Кислица В.В. и др. // М.: Металлургия, 2008. – 376 с.
9. Model Experiment on Inclusion Removal by Bubble Flotation Accompanied by Particle Coagulation in Turbulent Flow / Hirofada ARAI, Katsutoshi MATSUMOTO, Shin-ichi SHIMASAKI, Shoji TANIGUCHI// ISIJ International, Vol. 49 (2009), No. 7, pp. 965–974
10. Ефимова В.Г. Эффективные технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // Наукові праці ДонНТУ.Металургія. –вип.12(177)– 2010. –С.108-114.
11. Кислица В.В., Исаев О.Б., Матросов Ю.И., Белоусов В.В., Гончар Б.С., Динок Е.Ф. Исследование гидродинамики процесса рафинирования металла в промежуточных ковшах // Сталь. - 2009. - №8. - С. 27-27.

пост. 26.05.11

## **Про формування структурно-механічних змінювань під час карбонізації композитів на основі вуглецю**

*СКАЧКОВ В.О., ВОДЕННИКОВ С.А., ІВАНОВ В.І., НЕСТЕРЕНКО Т.М.*

Запорізька державна інженерна академія

Розроблено математичну модель, що описує особливості структурних і фізико-механічних змінювань окремих компонентів (вуглецевих волокон, утворювачів пор і матриці) у процесі карбонізації композитів на основі вуглецю. Модель подано узагальненою задачею мікромеханіки композитів із фізичними співвідношеннями, які враховують утворення мікродфектів і коефіцієнтів термохімічної усадки в компонентах композиту - вуглецевих волокнах, утворювачах пор та матриці.

It is developed a mathematical model, describing the features of structural and physics-mechanical changes of separate components (carbon fibres, formings of pores and matrices) in the process of carbonization of composites on the basis of carbon. A model is presented the generalized task of micromechanics of composites with physical correlations, taking into account formation of microdefects and coefficients of thermochemical shrinkage in the components of composite - carbon fibres, formings of pores and matrix.

Разработана математическая модель, описывающая особенности структурных и физико-механических изменений отдельных компонентов (углеродных волокон, порообразователей и матрицы) в процессе карбонизации композитов на основе углерода. Модель представлена обобщенной задачей микромеханики композитов с физическими соотношениями, учитывающими образование микродефектов и коэффициентов термохимической усадки в компонентах композита - углеродных волокнах, порообразователях и матрице.

Технологія виробництва композитів на основі вуглецю передбачає реалізацію процесів формування й твердіння вуглепластикових заготовок, їх подальшу карбонізацію та піролітичне ущільнення. Двокомпонентні вуглецеві композити формують на основі вуглецевих волокон і полімерних матриць. Як полімерну матрицю застосовують фенолоформальдегідні смоли, що затвердівають за температури 160...200 °С. Для формування пористої структури заданих геометричних розмірів до складу композиту вводять утворювачі пор – вуглецьвміщуючі речовини з низьким коксовим залишком. Проведення вище перелічених процесів досягають створенням необхідного реакційного середовища, а також і точною реалізацією заданих температурно-часових параметрів режимів обробки.

У процесі карбонізації композитів на основі вуглецю відбуваються складні фізико-хімічні перетворення в об'ємі полімерної матриці з утворенням

кокового залишку. При цьому виділяються летучі газоподібні речовини різного складу та реалізуються процеси термохімічної усадки та температурного розширення. Таке різноманіття процесів обумовлює як утворення мікротріщин і мікропор, так і формування поля структурних напружень у композиті.

Розробка математичної моделі структурних і фізико-механічних змінювань компонентів (волокон, утворювачів пор і матриці) композитів на основі вуглецю у процесі карбонізації дає можливість його оптимізації та підвищення якості одержаних заготовок.

Для дослідження даних процесів можливим є застосування статистичних методів мікромеханіки композитів [1]. У цьому разі класичні підходи мікромеханіки доповнюють врахуванням процесів руйнування та змінювання властивостей окремих компонентів композитів, як під час механічних навантажень, так і температурної дії.

Для оцінювання властивостей карбонізованих композитів на основі вуглецю запропоновано математичну модель, яка заснована на розв'язанні статистичної красвої задачі мікроеханіки композитів, враховує створення мікроскопічних дефектів, дозволяє визначити мікроструктурні напруження й оцінювати рівень мікроструктурних перетворень, а також змінювання пружних і міцнісних характеристик і коефіцієнтів термохімічної усадки у компонентах композиту (вуглецевих волоках, утворювачах пор і матриці) [2]:

$$\xi_{i\alpha,\alpha} = 0; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\chi_{i,j} - \chi_{j,i}); \quad (2)$$

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{ij\alpha\beta}^k \cdot (1 - \omega^k) \cdot \lambda_k \cdot \left[ e_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^N b_{\alpha\beta} \cdot (1 - \psi^k) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T \right]; \quad (3)$$

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

де  $\xi_{ijk}$ ,  $\varepsilon_{ij}$  - мікроструктурні напруження та деформації відповідно;  $\chi_i$  - вектор випадкових мікроструктурних переміщень;  $Q_{ijmn}^k$  - випадкові модулі пружності компонентів композиту на основі вуглецю;  $\omega^k$  - випадкові термоструктурні функції, які встановлюють залежність пружних властивостей композиту на основі вуглецю від ступеня його структурних перетворень протягом термохімічної обробки та враховують процеси утворення тріщин;  $\lambda^k$  - випадкова індикаторна функція, що визначає вірогідність приналежності даної точки в об'ємі композиту на основі вуглецю, з номером  $k$ ;  $b_{ij}$  - випадкові компоненти лінійного термічного розширення компонентів вуглецевого композиту;  $\psi^k$  - випадкові термоструктурні функції, які встановлюють залежність термохімічної усадки компонентів композиту на основі вуглецю від температури процесу;  $T$  - температура процесу;  $S$  - межа композиту на основі вуглецю;  $N$  - кількість компонентів у композиті на основі вуглецю;  $k$  - номер компоненту ( $k = 1 \dots N$ ).

Рішення задачі (1)-(4) знаходять в переміщеннях і представляють у вигляді системи рівнянь:

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

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

$$\Pi_{ij} = \sum_{k=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^k \cdot (1 - \omega^k) \cdot \lambda_k \cdot$$

$$\left[ e_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^N b_{\alpha\beta} \cdot (1 - \psi^k) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T \right].$$

$\varepsilon_{ij} = \langle \varepsilon_{ij} \rangle$  - мікроструктурні деформації композиту на основі вуглецю;  $\langle \dots \rangle$  - оператор статистичного усереднення.

Систему рівнянь (5) вирішують щодо флуктуацій мікроструктурних деформацій у вигляді:

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

де  $G_{ij}$  - тензор Гріна для тіла з об'ємом  $V$ .

Після усереднювання рівняння (3) та виділення його частини, що відповідає за пружні характеристики досліджуваного композиту, можна записати

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

де  $C_{ijmn}^I$  - мікроскопічні модулі пружності композиту на основі вуглецю,  $\Phi_{ijmn}^0$  - флуктуація тензора четвертого рангу, що залежить від властивостей компонентів композиту.

Записуючи рівняння (3) для флуктуацій мікроструктурних напружень, одержують

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

Підставляючи співвідношення (8) у рівняння (6), визначають флуктуації мікроструктурних деформацій.

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 композиту на основі вуглецю визначають як

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

де  $\sigma_{ij}$  - мікроструктурні напруження у компоненті з номером  $k$ .

Дисперсію розподілу мікроструктурних напружень у компонентах композиту на основі вуглецю обчислюють з урахуванням формул (8) і (10)

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

Термоструктурні функції  $\omega^k$  задають у вигляді

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

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 рівняння (12) представляють як

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

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

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

$$\langle \Omega^k(\zeta) \rangle = P^k = 1 - \frac{1}{(2\pi \cdot D_{ij}^k)^{0,5}} \cdot \int_{\sigma_B^-}^{\sigma_B^+} \exp\left[-\frac{(x - \sigma_{ij}^k)^2}{2D_{ij}^k}\right] dx \quad (15)$$

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

де  $\sigma_B^+$ ,  $\sigma_B^-$  - межа міцності компонентів композиту на основі вуглецю під час розтягування та стиснення відповідно.

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

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

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

де  $Q$  - кількість характеристичних температурних точок, при яких змінюється характер залежності пружних властивостей компонентів композиту на основі

вуглецю від температури;  $F_p, F_q, F_m, F_n$  - експериментальні константи ( $p=1...3; q=1...3; m=1...3; n=1...3$ ).

Запропонована модель дозволяє з використанням спеціально розробленої програми здійснювати на ПЕОМ:

- вибирання й обробку експериментальних даних;
- визначати середні значення та дисперсії мікронапружень у компонентах композитів на основі вуглецю;
- виконувати оцінку пошкодження компонентів;
- розраховувати змінювання пружних властивостей і коефіцієнтів лінійного термічного розширення для довільних температур карбонізації композитів на основі вуглецю залежно від рівня діючої температури.

Як приклад виконано розрахунки процесу карбонізації композитів на основі вуглецевих волокон типу ВМН, утворювачів пор на основі віскозних волокон і фенолоформальдегідного в'язучого на основі смоли СФ-010, що містить твердіювач ГМТА. Результати розрахунків модулів пружності за головними напрямками у площині армування  $E_{11}$  та  $E_{22}$ , межі міцності  $\sigma_B$ , коефіцієнтів Пуассона  $\mu_{12}$  і  $\mu_{21}$ , а також коефіцієнтів лінійного термічного поширення  $\alpha_{1...3}$  за різної температури процесу карбонізації представлено в табл. 1.

Таблиця 1. Механічні та теплофізичні характеристики композитів на основі вуглецю

Властивості	Температура, °С			
	20	300	600	800
Модулі пружності за головними напрямками у площині армування $E_{11}-E_{22}$ , МПа	8780	6470	3370	5265
Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	122,1	115,4	21,2	34,1
Коефіцієнти Пуассона $\mu_{12}, \mu_{21}$	0,12	0,08	0,05	0,06
Коефіцієнти лінійного термічного розширення $\alpha_{1,2}$ , $10^6$ 1/К	1,60	11,90	2,00	4,60
Коефіцієнт лінійного термічного розширення $\alpha_3$ , $10^6$ 1/К	0,10	15,0	62,0	65,0

Розглянутий підхід до реалізації процесу карбонізації вуглецевих композитів на основі вуглецю з утворювачами пор дозволяє запропонувати раціональні технологічні режими продукування профільних виробів різної геометричної форми та розмірів. Розроблено технології виготовлення композитів даного типу, що використовують для систем теплового захисту, силіційованих композитів на основі вуглецю для антифрикційних вузлів і значнонавантажених конструкцій.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Волков С.Д. Статистическая механика композитных материалов / С.Д. Волков, В.П. Ставров. - Минск: БГУ, 1978. - 206 с.
2. Соколкин Ю.В. Исследование процессов деформирования и разрушения композитных материалов и конструкций при сложном нагруженном состоянии / Ю.В. Соколкин, В.А. Скачков, М.Г. Танкеева // Механика конструкций из композиционных материалов. - Новосибирск: Наука, 1984. - С. 97-101.

пост. 31.05.11



