

В.А.Скачков, В.И.Иванов, О.Р.Бережная, А.В.Карпенко

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Запорожская государственная инженерная академия

Розроблено статистичну модель прогнозування пружних і міцнісних характеристик силіційованих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів з урахуванням захисних покриттів, що нанесено на вуглецеві волокна.

Разработана статистическая модель прогнозирования упругих и прочностных характеристик силицированных углерод-углеродных композиционных материалов с учетом защитных покрытий, нанесенных на углеродных волокнах.

Введение. Композиционные материалы на основе углеродных волокон широко используются в авиастроении, аэрокосмической технике и полупроводниковой промышленности при изготовлении термостойких фрикционных элементов, нагревательных узлов и тепловой изоляции.

Углерод-углеродные силицированные композиционные материалы по химической и окислительной стойкости существенно отличаются от углерод-углеродистых, углерод-алюминиевых и углерод-магниевого композиционных материалов.

Общая технологическая схема производства силицированных углерод-углеродных композиционных материалов предусматривает формирование углерод-полимерной заготовки, ее карбонизацию, пропитку заготовки жидким кремнием и проведение процесса карбидообразования.

Повышение прочностных характеристик и ударной вязкости силицированных углерод-углеродных композиционных материалов предполагает сохранение целостности и характеристик углеродных волокон. В то же время при карбидизации углеродных композиционных материалов, пропитанных жидким кремнием, углеродные волокна, участвуя в химическом процессе, теряют свою целостность, что существенно ухудшает характеристики данных материалов.

Для исключения возможности растворения углеродных волокон при химическом взаимодействии с жидким кремнием на границе «волокно–матрица» создают буферный слой в виде оксидов металлов [1].

Структура указанных композиционных материалов состоит из углеродных волокон, окружающего их буферного слоя, карбида кремния, а также свободного кремния и матричного углерода, оставшихся от реакции карбидизации. Матричный углерод образуется в результате карбонизации феноло-формальдегидного связующего и имеет аморфную структуру, близкую к стеклоуглероду [2].

Постановка задачи. Задачей данных исследований является изучение возможности прогнозирования механических характеристик силицированных углерод-углеродных композиционных материалов.

Основная часть исследований. Для прогнозирования свойств вышеуказанных пятикомпонентных композиционных материалов с защитным слоем на армирующих волокнах возможно использование методики [3] с учетом подхода, изложенного в работе [4].

Физическую модель таких композиционных материалов описывают средой класса B_2 , в рамках которой на элементах второго порядка малости задают характеристики каждого компонента и возникающие микроповреждения [5].

Модули упругости модельной среды для пятикомпонентных силицированных углеродных композиционных материалов θ_{ijmn} записываются в виде:

$$\theta_{ijmn} = \sum_{\hat{E}=1}^5 \theta_{ijmn}^{\hat{E}} \cdot (1 - \psi_{\hat{E}}) \cdot \lambda_{\hat{E}}, \quad (1)$$

где $\theta_{ijmn}^{\hat{E}}$ - модули упругости для компонента композиционного материала с номером K ($K = 1$ - углеродное волокно, $K = 2$ - защитный оксидный слой, $K = 3$ - карбид кремния, $K = 4$ - свободный кремний, $K = 5$ - свободный углерод матрицы); ψ_K - случайные функции микроповреждаемости компонента с номером K ; λ_K - случайная индикаторная функция [6].

Случайные индикаторные функции удовлетворяют соотношению

$$\sum_{i=1}^5 \lambda_i = 1. \quad (2)$$

Моментные функции первого порядка для λ_K ($K = \overline{1,5}$) соответствуют объемному содержанию компонента с номером K :

$$\langle \lambda_{\hat{E}} \rangle = \delta_{\hat{E}}, \quad (3)$$

где $\langle \lambda_{\hat{E}} \rangle$ - оператор статистического осреднения.

Объемное содержание защитного слоя определяют согласно соотношению

$$\delta_2 = \delta_1 \cdot \left[\left(\frac{h}{r} \right)^2 + \frac{2h}{r} \right], \quad (4)$$

где p_1 - объемное содержание углеродных волокон; h - толщина защитного слоя; r - радиус углеродных волокон.

Применяя оператор статистического осреднения к уравнению (1), получают соотношение для среднего значения модулей упругости модельной среды

$$C_{ijmn} = \langle \theta_{ijmn} \rangle = \sum_{\hat{E}=1}^5 \langle \theta_{ijmn}^{\hat{E}} \rangle \cdot (1 - \langle \psi_{\hat{E}} \rangle) \cdot \langle \lambda_{\hat{E}} \rangle. \quad (5)$$

Вычитая из уравнения (1) соотношение (5) и перемножая полученную разность саму на себя для различных компонентов модулей упругости, после операции статистического осреднения можно записать соотношение для расчета моментов второго порядка модулей упругости модельной среды:

$$\hat{E} \theta_{ijmn}^{\delta qrs} = \langle \bar{\theta}_{ijmn} \cdot \bar{\theta}_{pqrs} \rangle = \sum \left[\langle \theta_{ijmn}^{\hat{E}} \rangle \cdot \langle \theta_{pqrs}^{\hat{E}} \rangle \cdot (1 - \langle \psi_{\hat{E}} \rangle) \left(I_{\hat{E}}^2 \cdot \langle \lambda_{\hat{E}} \rangle^2 + \langle \hat{\lambda}_K^2 \rangle \right) \right], \quad (6)$$

где I_K ($K = \overline{1,5}$) - коэффициенты вариации упругих характеристик компонента с номером K ; $\hat{\omega} = \omega - \langle \omega \rangle$ - пульсации случайных функций.

При выводе уравнения (5) учитывают статистическую независимость модулей упругости и функций повреждаемости, а также независимость функций повреждаемости для разных компонентов композиционного материала между собой.

Микронапряжения ξ_{ij} и микродеформации ε_{ij} , реально действующие в композиционных материалах, связаны обобщенным законом Гука, в котором модули упругости заданы соотношением (1):

$$\xi_{ij} = \theta_{ij\alpha\beta} \cdot \varepsilon_{\alpha\beta} . \quad (7)$$

Здесь и в дальнейшем по повторяющимся индексам производят суммирование от 1 до 3.

Применяя к соотношению (7) оператор статистического осреднения, можно записать

$$\sigma_{ij} = \langle \xi_{ij} \rangle = \langle \theta_{ij\alpha\beta} \rangle \langle \varepsilon_{\alpha\beta} \rangle + \left\langle \theta_{ij\alpha\beta}^i \varepsilon_{\alpha\beta}^i \right\rangle . \quad (8)$$

После подстановки в уравнение (8) решения для пульсаций микродеформаций, полученного в работе [5], имеет место соотношение:

$$\langle \xi_{ij} \rangle = (\tilde{N}_{ij\alpha\beta} + I_{\gamma\delta\omega\varphi} \cdot \hat{E}_{ij\gamma\delta}^{\omega\varphi\alpha\beta}) \cdot \hat{a}_{\alpha\beta} , \quad (9)$$

где $\hat{a}_{ij} = \langle \xi_{ij} \rangle$ - микроскопическая деформация; I_{ijmn} - симметричный тензор четвертого ранга; $C_{ijmn} = \langle \theta_{ijmn} \rangle$ - среднее значение модуля упругости [5].

$$I_{ijmn} = -\frac{4\pi}{15} (5\hat{A} + 3\hat{A}) \cdot \delta_{ij} \cdot \delta_{ij} + \frac{8\pi}{15} \hat{A} \cdot (\delta_{im} \cdot \delta_{jn} + \delta_{in} \cdot \delta_{jm}) , \quad (10)$$

где δ_{ij} - символы Кронекера;

$$A = \frac{C_{1122} + 3C_{2323}}{8\pi \cdot C_{2323} \cdot (C_{1122} + 2C_{2323})} ;$$

$$B = \frac{C_{1122} + C_{2323}}{8\pi \cdot C_{2323} \cdot (C_{1122} + 2C_{2323})}$$

Моментную функцию второго порядка распределения микронапряжений в одной координатной точке записывают соотношением:

$$\left\langle \xi_{ij}^i \cdot \xi_{mn}^i \right\rangle = (\hat{E}_{ij\alpha\beta}^{mn\gamma\delta} - 2\tilde{N}_{ij\varphi\psi} \cdot \hat{E}_{\omega\eta\alpha\beta}^{mn\gamma\delta} \cdot I_{\varphi\psi\omega\eta} + C_{ij\varphi\psi} \cdot C_{mn\omega\eta} \cdot K_{\varphi_i\psi_i\alpha\beta}^{\omega_i\eta_i\gamma\delta} \cdot I_{\varphi\psi\varphi_i\psi_i} \cdot I_{\omega\eta\omega_i\eta_i} - \hat{E}_{ij\varphi\psi}^{mn\omega\eta} \cdot I_{\varphi\psi\varphi_i\psi_i} \cdot I_{\omega\eta\omega_i\eta_i} \cdot \hat{E}_{\varphi_i\psi_i\alpha\beta}^{\omega_i\eta_i\gamma\delta}) \cdot \hat{a}_{\alpha\beta} \cdot \hat{a}_{\gamma\delta} . \quad (11)$$

Микроструктурные напряжения в композиционных материалах с учетом структурных составляющих можно определить как

$$\xi_{ij} = \sum_{\hat{E}=1}^5 \xi_{ij}^{\hat{E}} \cdot \lambda_{\hat{E}} , \quad (12)$$

где $\xi_{ij}^{\hat{E}}$ - напряжения в K -ом компоненте композиционного материала.

После усреднения уравнения (12) при независимости параметров $\xi_{ij}^{\hat{E}}$ и λ_K , получают

$$\langle \xi_{ij} \rangle = \sum_{\hat{E}=1}^5 \langle \xi_{ij}^{\hat{E}} \rangle \langle \lambda_{\hat{E}} \rangle. \quad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) записывают моментные функции первого и второго порядка распределения микронапряжений в компонентах композиционного материала:

$$\langle \xi_{ij}^{\hat{E}} \rangle = \langle \xi_{ij} \rangle + \langle \lambda_{\hat{E}} \rangle^{-1} \left\langle \begin{matrix} \hat{E} & \hat{E} \\ \lambda & \xi_{ij} \end{matrix} \right\rangle; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \langle \xi_{ij}^{\hat{E}} \cdot \xi_{mn}^{\hat{E}} \rangle &= \langle \xi_{ij} \cdot \xi_{mn} \rangle + \langle \xi_{ij} \rangle \langle \xi_{mn} \rangle - \langle \xi_{ij}^{\hat{E}} \rangle \langle \xi_{mn}^{\hat{E}} \rangle - \\ &\langle \lambda_{\hat{E}} \rangle^{-1} \cdot \left[\langle \hat{\lambda}_{\hat{E}} \cdot \hat{\lambda}_{ij} \cdot \hat{\lambda}_{mn} \rangle + \langle \xi_{ij} \rangle \langle \hat{\lambda}_{\hat{E}} \cdot \xi_{mn} \rangle + \langle \xi_{mn} \rangle \langle \hat{\lambda}_{\hat{E}} \cdot \xi_{ij} \rangle \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Для оценки повреждаемости компонентов композиционных материалов используют критерий Захарова:

$$III = \sigma_1^2 + k_1 \cdot \sigma_2^2 + k_2 \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + k_3 \cdot \sigma_1 + k_4 \cdot \sigma_2 + k_5 \leq 0, \quad (16)$$

где $k_1 \dots k_5$ - константы, зависящие от пределов прочности компонентов композиционных материалов.

Моментные функции первого и второго порядка критерия (16) задают соотношениями:

$$\langle III \rangle = \sigma_1^2 + \langle \xi_1^2 \rangle + k_1 \cdot (\sigma_2^2 + \langle \xi_2^2 \rangle) + k_3 \cdot \sigma_1 + k_2 \cdot (\sigma_1 \cdot \sigma_2 + \langle \xi_1 \xi_2 \rangle) + k_4 \cdot \sigma_2 + k_5; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \langle III^2 \rangle &= (2k_1\sigma_2 + k_2\sigma_1 + k_4)^2 \langle \xi_2^2 \rangle + (2\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3)^2 \langle \xi_1^2 \rangle + \\ &+ \langle \xi_1 \cdot \xi_2 \rangle \cdot (2\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3) \cdot (2k_1\sigma_2 + k_2\sigma_1 + k_4) + \left(\langle \xi_1^2 \rangle + k_1 \langle \xi_2^2 \rangle + k_2 \langle \xi_1 \cdot \xi_2 \rangle \right)^2. \end{aligned} \quad (18)$$

где $\sigma_1 = \langle \xi_{11}^{\hat{E}} \rangle$; $\sigma_2 = \langle \xi_{22}^{\hat{E}} \rangle$; $\xi_1 = \xi_{11}^{\hat{E}}$; $\xi_2 = \xi_{22}^{\hat{E}}$;

$$k_1 = \frac{\sigma_a^p \cdot \sigma_a^{\tilde{n}}}{\sigma_{a90}^{\tilde{n}} \cdot \sigma_{a90}^{\delta}}; \quad k_2 = \frac{[(1+k_1) + \tau_{45} \cdot (k_3 - k_4) - k_5]}{\tau_{45}};$$

$$k_3 = \sigma_a^{\tilde{n}} - \sigma_a^{\delta}; \quad k_4 = k_1 \cdot (\sigma_{a90}^{\tilde{n}} - \sigma_{a90}^{\delta}); \quad k_5 = -\sigma_a^{\tilde{n}} \cdot \sigma_a^{\delta};$$

σ_a^{δ} , $\sigma_a^{\tilde{n}}$, $\sigma_{a90}^{\tilde{n}}$, σ_{a90}^{δ} - пределы прочности компонентов композиционных материалов на растяжение и сжатие по напряжениям двух главных осей анизотропии.

Предполагая, что распределение критерия III соответствует закону Гаусса, вероятность повреждения компонентов композиционных материалов можно определять как:

$$p_K = \frac{1}{(2\pi \langle III^2 \rangle)^{0.5}} \int_0^x \exp \left(-\frac{(x - \langle III \rangle)^2}{2 \langle III^2 \rangle} dx \right). \quad (19)$$

Согласно результатам работы [4] следует, что среднее значение функции микрповреждаемости удовлетворяет равенству

$$\langle \Psi_{\hat{E}} \rangle = \delta_{\hat{E}}. \quad (20)$$

Определение прочностных свойств силицированных углеродных композиционных материалов осуществляют методом математического эксперимента. При таком методе разрабатывают систему численного испытания и получают диаграмму растяжения жесткой схемы нагружения.

Согласно данному методу, задают некоторую величину деформации e_{ij} . По величине данной деформации e_{ij} определяют средние значения микронапряжений, задаваемых формулой (9), моментные функции второго порядка распределения микронапряжений, задаваемых формулой (11), и по формулам (14) и (15) вычисляют параметры распределения микронапряжений в компонентах композиционных материалов. После этого по формуле (19) с учетом соотношений (17) и (18) рассчитывают средние значения повреждаемости компонентов композиционных материалов. Далее с использованием формул (5) и (6) уточняют параметры распределения упругих характеристик композиционных материалов и снова определяют средние значения микронапряжений (9). Таким образом, получают одну точку кривой деформирования с координатами $(e_{ij}^{(1)}, \sigma_{ij}^{(1)})$. Затем деформацию увеличивают на величину Δe_{ij} и повторяют расчеты по вышеприведенной схеме, определяя новую точку кривой деформирования $(e_{ij}^{(m)}, \sigma_{ij}^{(m)})$.

Расчеты выполняют до тех пор, пока процессу увеличения деформаций e_{ij} будет соответствовать рост средних напряжений (9). Максимальное значение средних напряжений будет соответствовать пределу прочности силицированного углеродного композиционного материала $\sigma_{ij}^a = \langle \xi_{ij}^{max} \rangle$.

Заключение. Разработана методика прогнозирования упругих и прочностных характеристик силицированных углерод-углеродных композиционных материалов с учетом защитного покрытия на углеродных волокнах и процессов накопления повреждений в компонентах композитов при действии внешних нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скачков В.А., Бережная О.Р., Иванов В.И., Карпенко А.В. Влияние защитных покрытий на характеристики силицированных углеродных композитов / Вакуумные нанотехнологии и оборудование. - Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. - С.308-310.
2. Конкин А.А. Углеродные и другие жаропрочные материалы. - М.: Химия, 1974. - 175 с.
3. Скачков В.А., Леонтьев В.А. Об одном подходе описания процессов деформирования и разрушения реальных материалов / Структурная механика композиционных материалов. - Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. - С.21-31.
4. Скачков В.А., Шадчина З.М., Прусакова Е.А. Упругие и прочностные характеристики структурно-неорганических сред с протекторным слоем / Механика и физика разрушения композитных материалов и конструкций. - Ужгород, 1988. - С.52-53.
5. Соколкин Ю.В., Скачков В.А. О структурном подходе к оценке работоспособности конструкций из композиционных материалов // Механика композиционных материалов. - 1981. - № 4. - С.608-614.
6. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. - Минск: БГУ, 1978. - 205 с.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2008 р.

Рецензент, проф. М.Ф.Колесник