

ЧИСЛЕННЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. БАБАЙЦЕВ, А. И. МИСБАХОВА

Московский авиационный институт, Российская Федерация

Композиционные материалы (КМ) используются во многих сферах деятельности: в машиностроении, строительстве и т. д. Применение КМ обусловлено высокими механическими характеристиками при минимальном весе, а также способностью работать при условии высоких температур и в агрессивных средах. Например, применение полимерных композитов при производстве подвижного железнодорожного состава, как пассажирского, так и грузового, обеспечивает его облегчение, удешевление, долговечность. Соответственно, с помощью этих материалов решаются задачи обеспечения оптимального расположения центра тяжести кузовов вагонов, что важно для наклона кузова при движении на крутых поворотах с высокой скоростью.

Наиболее распространенные и актуальные композиты – это полимерные (ПКМ), углерод-керамические (УККМ), углерод-углеродные (УУКМ), металлополимерные КМ. Однако в процессе изготовления данных материалов появляются различные дефекты. Пористость является постоянной проблемой при производстве композитных материалов. Размер, форма и распределение пустот зависят от структуры композитов и может существенно влиять на его физико-механические свойства, такие как модуль упругости, предел прочности и т. д. При испытании пористых КМ появляется необходимость в оценке истинных значений физико-механических характеристик.

Задачей данной работы является исследование методов оценки физико-механических характеристик пористых композитов, как численных, так и аналитических. Для этого использовалось численное моделирование (ЧМ) в среде Ansys Workbench с использованием метода конечных элементов, а также аналитическое моделирование (АМ), которое проводится, основываясь на моделях теории упругости и механики КМ и др. Верификация моделей проводилась на основе полученных экспериментальных результатов.

На первом этапе исследования образцы УУКМ с пироуглеродной матрицей (СС) и фазы пироуглерода (РС) были испытаны на изгиб согласно стандартным методикам испытаний на универсальной испытательной машине Instron 5969 с программным обеспечением Bluehill. Скорость нагружения принималась равной 1 мм/мин. Испытания проводились до разрушения образцов. Был получен экспериментальный график зависимости модуля упругости от объемного содержания пористости.

На втором этапе исследования для оценки влияния пористости на модуль упругости использовались два аналитических метода:

1 Метод Федотова, так называемый метод эффективных объемов осреднения деформаций с использованием функции пористости, описываемых модифицированной зависимостью Бальшина:

$$\alpha_s = \rho^n \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0}, \quad n = \frac{2 - \rho - \rho_0}{1 - \rho_0},$$

где ρ – относительная плотность; ρ_0 – начальная относительная плотность (плотность композита без пор). Относительная плотность связана с пористостью θ соотношением $\rho = 1 - \theta$.

Функция пористости при растяжении α_r может быть выражена через функцию пористости при сдвиге α_s , при использовании зависимости для макроскопического модуля объемного сжатия (К) пористого материала:

$$\alpha_r = \frac{6\alpha_s}{6 + (1 + \nu_0)(1 - \alpha_s)},$$

$$\alpha_r = \frac{6\rho^n \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0}}{6 + (1 + \nu_0) \left(1 - \rho^n \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0} \right)},$$

$$E = \alpha_t E_0, \mu = \alpha_s \mu_0,$$

$$K = \frac{4}{3} \mu_0 \frac{(1 + \nu_0) \alpha_s}{2(1 - 2\nu_0) + (1 + \nu_0)(1 - \alpha_s)}, \quad E = \frac{9K\mu}{3K + \mu},$$

Получена линейная зависимость.

2 Метод, основанный на результатах, полученных Дьюи и Гудьером. Данный метод, изначально описанный для включений, был адаптирован: поры были представлены в виде включений с нулевым модулем Юнга.

Эффективный объемный модуль для малых (K_{fsmall}) и больших объемных долей (K_{fbig}) определяется по формуле:

$$K_{fsmall} = K_M \left[1 - \frac{3c \left(K_M + \frac{4}{3} G_M \right)}{4G_M} \right], \quad K_{fbig} = K_M \left[1 - \frac{c}{1 + (c-1) \left[\frac{K_M}{K_M + \frac{4}{3} G_M} \right]} \right].$$

Эффективные модуль сдвига (G_M) и объемный модуль (K_M) материала:

$$G_M = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad K_M = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}.$$

Итоговый модуль Юнга, с учетом пористости определялся по формуле:

$$E_f = \frac{9G_f K_f}{3K_f + G_f}.$$

Третий этап исследования – численное моделирование в среде Ansys Workbench с использованием системного компонента «Material Designer». Для данного метода был создан репрезентативный объемный элемент материала. Поры были представлены в виде включений с модулем Юнга, стремящемся к нулю, и коэффициентом Пуассона равным 0,49. Сначала моделировался материал с пористостью, задаваемой единожды в начале вычисления, такой подход оказался применим для материалов с пористостью до 40 %, далее оказался негодным. Для материалов с пористостью больше 40 % поры задавались в 2–3 этапа.

Анализ результатов аналитических и численных методов показал, что для приближенных вычислений АМ – менее трудоемкий способ, который дает возможность быстро оценить значения физико-механических характеристик без использования вычислительных машин и уточнять результат через вводимые функции.

Также при помощи численного моделирования был проведен анализ влияния расположения пор. Выяснено, что значительное снижение модуля Юнга происходит при образовании пор в волокне.

Работа выполнена с финансовой поддержкой гранта Президента Российской Федерации МК-398.2022.4.

Список литературы

- 1 Гитис, В. Справочник по пористым материалам: синтез, свойства, моделирование и ключевые приложения / В. Гитис, Г. Ротенберг // Всемирная научная издательская компания: Сингапур, 2020. – Т. 4. – С. 10–20.
- 2 Коновалова, А. Р. Композитные шпалы / А. Р. Коновалова, Д. И. Понамаренко // Дни студенческой науки: сб. материалов 49-й науч. конф. обучающихся СамГУПС (Самара, 05–16 апреля 2022 г.). – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2022. – С. 190–192. – EDN JCVLJX.
- 3 Оценка физико-механических свойств термопласткомпозиатов для их применения в технологических процессах строительства и ремонта покрытий автомобильных дорог / Д. И. Бочкарев [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 2 (24). – С. 44–48.
- 4 Федотов, А. Ф. Прогнозирование эффективных модулей упругости пористых композиционных материалов [Электронный ресурс] / А. Ф. Федотов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 1. – С. 32–37. – Режим доступа : <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-32-37>. – Дата доступа : 11.09.2023.
- 5 Monte Carlo Simulation for Exploring Mechanical Properties of Porous Materials Based on Scaled Boundary Finite Element Method / G. Liu [et al.] // Appl. Sci. – 2022. No 12. – P. 575.