

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ПЛЕТЕНЫМИ РУКАВАМИ

Армирующие системы на основе плетеных рукавов являются самыми эффективными для изготовления конструктивных элементов со сложным контуром поверхности [1]. Высокая степень деформируемости в непропитанном состоянии позволяет укладывать эту арматуру на любую поверхность без складок и разрезов, что обеспечивает сохранение цельности нитей (жгутов), а значит, и основных прочностных свойств. Это преимущество плетеных рукавов сопровождается изменением местных углов армирования и, как следствие, переменным характером физико-механических характеристик по криволинейной поверхности детали. В работе [2] описана методика прогнозирования структурных параметров композитов на основе плетеных рукавов – угла армирования и объемного содержания волокон. Несмотря на полезность этих характеристик, они недостаточны для решения задач определения напряженно-деформированного состояния, которые базируются на упругих константах (модели упругости, коэффициенты Пуассона и т.п) и прочностных свойствах. В связи со сказанным актуальными являются исследования по разработке методики расчета физико-механических характеристик композита в зависимости от степени и характера деформирования рукава, т.е. от угла между жгутами.

В классической механике слоистых сред [3, 5, 6] приведены формулы для определения упругих свойств материала, состоящего из произвольного количества слоев с любыми углом укладки и толщиной. Учитывая привычность такого подхода, имеет смысл рассмотреть возможность представления плетеного рукава в виде системы двух слоев с армированием $\pm\phi$. В таком случае достаточно было бы знать четыре независимые упругие константы, например, модули упругости в двух направлениях и на сдвиг и один из коэффициентов Пуассона, и тогда на основе теории слоистых композитов можно было бы пересчитать свойства материала для произвольного угла между нитями рукава. В работе [2] показано, что этот угол не может равняться 0° или 90° , т.е. экспериментально определить стандартные характеристики E_1 , E_2 , G_{12} и μ_{12} невозможно. В качестве выхода из этой ситуации можно предположить нахождение базовых свойств монослоя путем их восстановления по известным упругим характеристикам для нескольких реализуемых углов армирования. Такой подход оправдан еще и тем, что для экспериментального определения модуля сдвига G_{12} необходимы образцы с шириной, превышающей размеры исследуемого рукава, и тогда задача существенно усложняется. Реализация этого направления определения физи-

ко-механических характеристик осложняется еще двумя обстоятельствами:

– восстановленные по результатам экспериментов характеристики E_1 , E_2 , G_{12} и μ_{12} не могут быть прямо подтверждены опытным путем из-за отсутствия однонаправленного материала;

– из-за зависимости объемного содержания волокон от угла между жгутами в рукаве [2] базовые свойства монослоя E_1 , E_2 , G_{12} и μ_{12} в общем-то будут разными для разных углов армирования, т.е. они не могут рассматриваться в качестве базиса для построения методики прогнозирования свойств композитов на основе плетеных рукавов.

Определенный интерес представляет применение стержневой модели симметрично-армированных композитов [4, 5] для прогнозирования свойств рассматриваемого материала. Формально методика определения упругих характеристик композитов с армированием $\pm\varphi$ [4] базируется на тех же фундаментальных свойствах монослоя, что и классическая теория слоистых сред [3], поэтому использование стержневой модели [4] ограничивается указанными выше обстоятельствами.

Анализ многочисленных экспериментальных данных о свойствах симметрично-армированных композитов на основе обычной арматуры, а также симметрия функции объемного содержания волокон от угла между жгутами плетеного рукава относительно $\varphi = \pm 45^\circ$ позволяет обосновать возможность описания физико-механических характеристик общей зависимостью следующего вида

$$R = a_1 \cos^4 \varphi + a_2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + a_3 \sin^4 \varphi, \quad (1)$$

где R – искомая характеристика;

a_1 , a_2 , a_3 – коэффициенты.

Принятие этой математической формы позволяет синтезировать формулы для упругих и прочностных свойств исследуемого материала при наличии их численных значений в трех независимых точках, т.е. для трех углов армирования, причем желательно, чтобы для них экспериментальные данные отличались как можно больше или, по крайней мере, чтобы интервалы разброса не пересекались.

Например, если экспериментально найдены свойства КМ с армированием $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ и $\pm 60^\circ$, то для определения коэффициентов a_1 , a_2 и a_3 получим систему трех уравнений:

$$\begin{aligned} 9a_1 + 3a_2 + a_3 &= 16R(30); \\ a_1 + a_2 + a_3 &= 4R(45); \\ a_1 + 3a_2 + 9a_3 &= 16R(60). \end{aligned} \quad (2)$$

Решением этой системы являются формулы:

$$\begin{aligned} a_1 &= 3R(30) - 3R(45) + R(60); \\ a_2 &= -4R(30) + 10R(45) - 4R(60); \\ a_3 &= R(30) - 3R(45) - 3R(60). \end{aligned} \quad (3)$$

После подстановки этих зависимостей в (1) и выполнения соответствующих преобразований получим

$$\begin{aligned} R &= R(30) \cos 2\phi (4 \cos^2 \phi - 1) + R(45) (4 \cos^2 \phi - 1) (4 \sin^2 \phi - 1) + \\ &+ R(60) \cos 2\phi (1 - 4 \sin^2 \phi). \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда для упругих и прочностных свойств композита на основе плетеного рукава можно записать следующие формулы:

$$\begin{aligned} E_x &= E_x(30)c_1 \cos 2\phi + E_x(45)c_1c_2 - E_x(60)c_2 \cos 2\phi; \\ \mu_{xy} &= \mu_{xy}(30)c_1 \cos 2\phi + \mu_{xy}(45)c_1c_2 - \mu_{xy}(60)c_2 \cos 2\phi; \\ F_x &= F_x(30)c_1 \cos 2\phi + F_x(45)c_1c_2 - F_x(60)c_2 \cos 2\phi, \end{aligned} \quad (5)$$

и т.д.

где F_x – предел прочности;

$$c_1 = 4 \cos^2 \phi - 1; \quad c_2 = 4 \sin^2 \phi - 1. \quad (6)$$

Сдвиговые характеристики (модуль упругости и предел прочности) обладают симметрией относительно $\phi = \pi/4$ и тогда $a_1 = a_3$. Это позволяет сделать вывод о том, что для G_{xy} и F_{xy} достаточно испытать образцы с двумя углами армирования.

Таким образом, на основе проведенного анализа возможных подходов к моделированию физико-механических характеристик композитов, армированных плетеными рукавами, выявлены факторы, которые не позволяют применить существующие теоретические модели слоистых сред. Предложена и обоснована универсальная математическая формула для прогнозирования упругих и прочностных свойств композитов на основе рукавов, для практической реализации которой достаточно провести испытания образцов материала с тремя различными углами между жгутами, например, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ и $\pm 60^\circ$. Принимая во внимание, что угол $\phi_{min} \leq \phi \leq \phi_{max}$, есть основания ожидать приемлемую точность прогнозирования характеристик в инженерных расчетах.

Список использованных источников

1. Углеродные волокна/ Под ред. С. Симамуры, пер. с японск. – М.: Мир, 1987. – 304 с.
2. Андреев А.В. Методика определения структурных параметров композитов, армированных плетеными рукавами / А.В. Андреев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. (47). – Х., 2010. – С.99-104
3. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Гайдачук В.Е. Структурная модель симметрично-армированного композиционного материала / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов // Прочность конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1981. – Вып.6. – С. 28-37
5. Карпов Я.С. Механика композиционных материалов: учеб. пособие / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». 2001. – 122 с.
6. Ашкенази Е.К. Анизотропия конструкционных материалов / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 216 с.

Поступила в редакцию 23.11.2010.

*Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский
УкрНИИТМ, г. Днепропетровск*