

П. В. СОЛОВЬЕВ

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НЕСБАЛАНСИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ИЗГИБЕ

Рассматривается влияние несбалансированности структуры слоистых композитов, вызванной нарушением последовательности укладки, на напряженное состояние и деформационное поведение стержневых элементов при изгибе. Исследуется возможность компенсации влияния несбалансированности на деформационное поведение путем варьирования углами укладки слоев. Влияние несбалансированности при изгибе исследуется на двухопорной и консольной балках, находящихся под действием поперечной распределенной нагрузки, при разных числах слоев. Приведены результаты влияния несбалансированности на деформированное и напряженное состояния балок и стержней и метод ее компенсации. *Композит; слой; несбалансированность; напряжение; деформация*

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В большинстве случаев слоистые композиционные материалы имеют так называемую сбалансированную структуру.

Под сбалансированной понимается структура слоистого композита, отвечающая следующим требованиям:

- симметрия слоев относительно срединной поверхности слоистого пакета;
- каждому слою с углом укладки $+\varphi$ должен соответствовать слой с углом $-\varphi$, расположенный на одинаковом расстоянии от срединной поверхности.

Практически удовлетворить вышеуказанным требованиям сбалансированности невозможно. Удовлетворение требованию симметричности исключает удовлетворение второму условию. Поэтому уже на этапе проектирования мы имеем несбалансированные структуры.

Несбалансированность возникает и вследствие технологических факторов на этапе изготовления. К таким факторам можно отнести:

- отклонения углов укладки слоев от заданных;
- нарушение установленной последовательности укладки;
- наличие разнотолщинности укладываемых слоев.

Неучёт этих факторов приводит к асимметрии упругих свойств и непрогнозируемому напряженному состоянию и деформационному поведению.

2. МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕСБАЛАНСИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ

Вводимые предпосылки [1, 3]:

- 1) композит имеет одну срединную плоскость, параллельную плоскости укладки слоев, относительно которой физико-механические свойства отдельных слоев могут быть несимметричны; в каждом слое имеется одна плоскость упругой симметрии, параллельная данной;
- 2) в плоскости укладки главные направления упругости каждого слоя ориентированы произвольно и все элементарные слои деформируются согласно обобщенному закону Гука;
- 3) адгезия слоев абсолютная;
- 4) деформации сдвига усреднены по толщине балки.

Поперечное сечение рассматриваемой слоистой балки представлено на рис. 1. В общем случае балка может состоять из k слоев различной ширины.

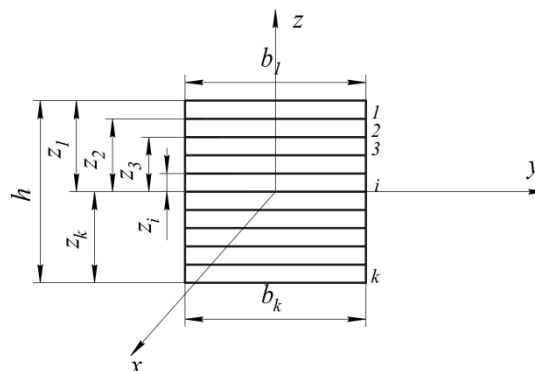


Рис. 1. Поперечное сечение слоистой балки постоянной ширины

Для приближенного учета деформации сдвига ε_{xz} на прогиб балки вводится усредненная по толщине балки деформация сдвига [1]

$$\psi(x) = \frac{1}{h} \int_0^h \varepsilon_{xz}(x, z) dz.$$

Для определения прогиба W воспользуемся формулой, приведенной в работе [1]:

$$W = W_0 + \frac{1}{K} \left(Q_0 x - \int_0^x dx \int_0^x \bar{P} dx \right) - (\theta_0 x + \frac{M_0}{2D} x^2 + \frac{Q_0}{6D} x^3 - \frac{1}{D} \int_0^x dx \int_0^x dx \int_0^x \bar{P} dx),$$

где $K = h^2 \left(\int_0^h \frac{dz}{b_i(z) G_{xz}^{(i)}} \right)^{-1}$, h – толщина балки,

$b_i(z)$ – ширина i -го слоя, $G_{xz}^{(i)}$ – модуль сдвига i -го слоя, $\bar{P} = q$; здесь q – распределенная по линии нагрузка, D – коэффициент, определяемый из упругих характеристик слоев [1], x – координата сечения, в котором ищется прогиб.

В указанные решения входят параметры $N_0, Q_0, M_0, U_0, \theta_0, W_0$, которые представляют собой значения осевой силы, поперечной силы, изгибающего момента, осевого перемещения, угла поворота сечения, прогиба в сечении при $x = 0$. Значения этих параметров определяют из граничных условий.

Для заземленного края $U = W = \theta = 0$, т.е. $U_x = 0, W_z = 0$.

Для свободного края $N = Q = M = 0, \sigma_x = 0, \tau_{xz} = 0$.

Для шарнирно опертого края $N = 0, U = 0, W = 0, M = 0$.

3. ВЛИЯНИЕ НАРУШЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ УКЛАДКИ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ БАЛОК

Рассмотрим влияние несбалансированности, вызванной нарушением последовательности укладки слоев, на многослойные композитные балки из углепластика с двухопорным и консольным вариантами закрепления (рис. 2 и 3) в зависимости от числа слоев и характера нару-

шения последовательности укладки на примере пятислойной балки.

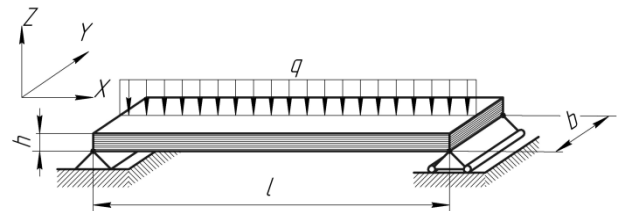


Рис. 2. Расчетная схема двухопорной слоистой композитной балки

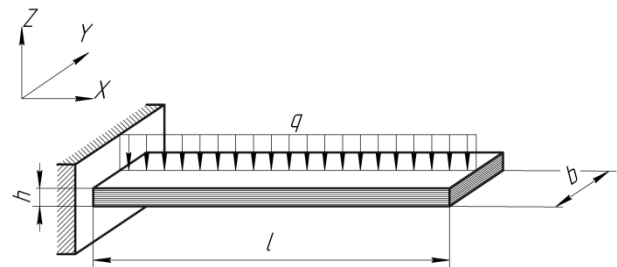


Рис. 3. Расчетная схема консольной слоистой композитной балки

Исходные данные: толщина слоя $h_c = 0,25$ мм; количество слоев $n = 5$; толщина слоистого пакета $h = h_c \cdot n = 0,25 \cdot 5 = 1,25$ мм; ширина балки $b = 10$ мм; длина балки $l = 100$ мм; распределенная нагрузка $q = 0,5$ Н/мм.

Характеристики материала однонаправленного слоя (углепластик) [2]: $E_x = 211$ ГПа; $E_y = 6,55$ ГПа; $G_{xy} = 2,79$ ГПа; $\nu_{xy} = 0,21$.

Решение поставленной задачи производилось в программном комплексе ANSYS.

Структура 5-слойной балки в сбалансированном состоянии следующая:

$$45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 45^\circ.$$

Схемы с нарушенной последовательностью укладки для 5-слойной балки выглядят следующим образом:

а) нарушение последовательности укладки слоев №1 и №2

$$-45^\circ / 45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 45^\circ;$$

б) нарушение последовательности укладки слоев №2 и №3

$$45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / -45^\circ / 45^\circ.$$

Для девятислойной, тринадцатислойной и семнадцатислойной балок нарушение последовательности укладки носит аналогичный характер.

На рис. 4, 5 показана зависимость относительного изменения прогиба от числа слоев, характера нарушения последовательности их укладки и способа закрепления слоистой балки.

Относительное изменение прогиба вычислялось по формуле

$$\Delta U_{отн} = \frac{|U_{сбал} - U_{несбал}|}{U_{сбал}} \cdot 100\%,$$

где $U_{сбал}$ – прогиб балки в сбалансированном состоянии, а $U_{несбал}$ – прогиб балки в несбалансированном состоянии соответственно.

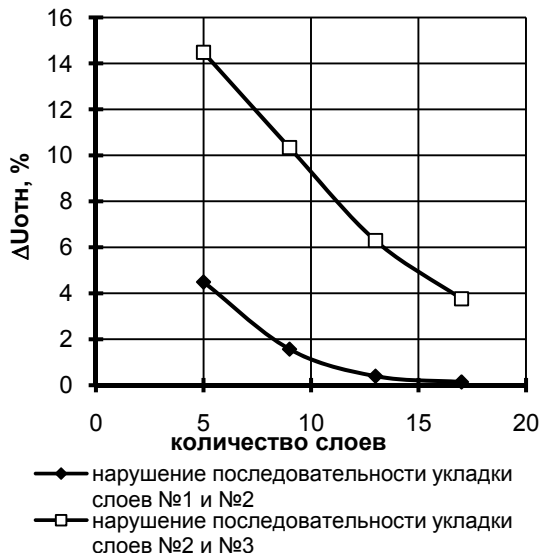


Рис. 4. Зависимость изменения прогиба консольной композитной балки относительно сбалансированного состояния от числа слоев и варианта нарушения последовательности укладки

Графики (рис. 4, 5) свидетельствуют о том, что нарушение последовательности укладки слоев №2 и №3 (замена слоя $\varphi^{(2)} = -45^\circ$ слоем $\varphi^{(3)} = 0^\circ$) намного существеннее влияет на величину изменения прогибов, чем нарушение последовательности укладки слоев №1 и №2 (слой $\varphi^{(1)} = 45^\circ$ замещает слой $\varphi^{(2)} = -45^\circ$). Изменение прогиба в первом случае составляет до 15...20%, во втором до 2...5%.

4. ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ КОМПЕНСАЦИИ ИЗНАЧАЛЬНОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НЕСБАЛАНСИРОВАННОСТИ

Под действием изгибающей нагрузки несбалансированная структура испытывает кручение. В зависимости от условий эксплуатации это кручение может быть нежелательно или даже недопустимо.

Одним из методов компенсации изначальной или технологической несбалансированности является варьирование углами укладки одного или нескольких слоев.

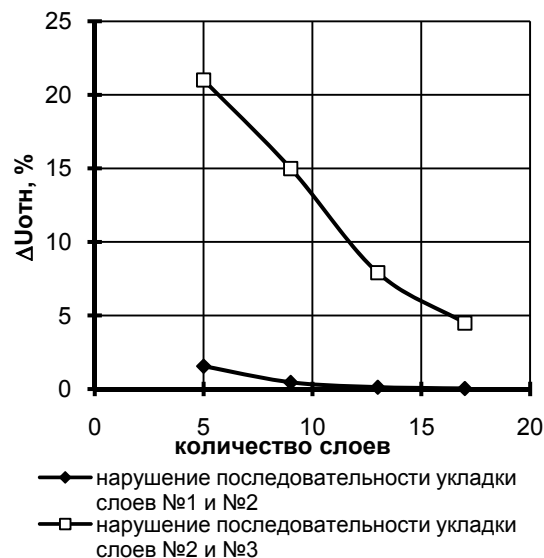


Рис. 5. Зависимость изменения прогиба двухопорной композитной балки относительно сбалансированного состояния от числа слоев и варианта нарушения последовательности укладки

Рассмотрим пример компенсации изначальной несбалансированности на слоистой композитной балке, закрепленной консольно и состоящей из 5 слоев. Она имеет следующую структуру укладки:

$$45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 45^\circ.$$

При практической реализации структура балки будет несбалансированной, и, соответственно, при изгибе возникает кручение.

Балка нагружена распределенной по поверхности нагрузкой $P = 600$ Па.

Варьируя углом укладки внешнего слоя, находим такое его значение, при котором закручивание свободного конца сводится к минимуму.

Схема укладки 5-слойной консольной балки, при которой величина закручивания свободного конца балки минимизируется:

$$45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 52^\circ.$$

Для девятислойной, тринадцатислойной и семнадцатислойной консольных углепластиковых балок углы ориентации внешнего слоя, при которых влияние кручения сводится к минимуму, равны $\varphi_9^{(1)} = 56^\circ$, $\varphi_{13}^{(1)} = 53^\circ$ и $\varphi_{17}^{(1)} = 53^\circ$ соответственно.

При изменении ориентации внешнего слоя меняется также и жесткость балок. На рис. 6 представлено относительное изменение прогибов $\Delta U_{отн}$ для так называемого «скорректированного» состояния (т.е. с укладкой, минимизирующей кручение) по отношению к сбалансированному состоянию.

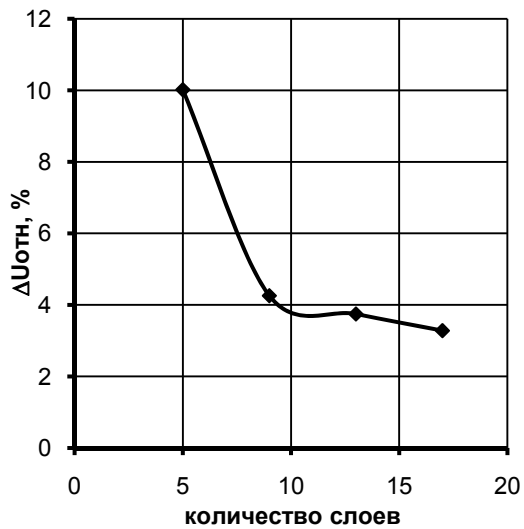


Рис. 6. Изменение прогиба при коррекции путем подбора угла укладки внешнего слоя относительно сбалансированного состояния в зависимости от числа слоев

ВЫВОД

Влияние несбалансированности слоистых балок, вызванное нарушением последовательности укладки слоев, на их напряженно-деформированное состояние зависит от характера этого нарушения; с увеличением числа слоев влияние несбалансированности уменьшается.

Компенсация несбалансированности, как изначальной, так и технологической, возможна за счет варьирования углами укладки одного или нескольких слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев В. В.** Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
2. **Первушин Ю. С., Соловьев П. В.** Напряженное и деформированное состояния балочных стержневых элементов из несбалансированных композитов при изгибе // Вестник УГАТУ. 2011. Т.15, №1 (41). С. 55–59.
3. **Роценс К. А.** Технологическое регулирование свойств древесины. Рига: Зинатне, 1979. 224 с.

ОБ АВТОРАХ

Соловьев Павел Владимирович, аспирант каф. авиац. двиг. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. мех-ки композиц. материалов.