

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИЗГИБЕ

Ю. С. ПЕРВУШИН<sup>1</sup>, П. В. СОЛОВЬЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> pcomposit@mail.ru, <sup>2</sup> paulnightingale@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 16 апреля 2014 г.

**Аннотация.** Рассматривается влияние структур многослойных композитных балок, полученных в результате изменений углов укладки слоев, последовательности их укладки, разнотолщинности слоев на их напряженно-деформированные состояния по отношению к первоначальному состоянию. Влияние структур анализируется на двухопорных и консольных балках под действием изгибающей нагрузки. Приведены результаты деформационного поведения и напряженного состояния в наиболее нагруженных слоях.

**Ключевые слова:** композит; слой; несбалансированность; балка; напряжение; деформация.

### 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При проектировании стержневых элементов из слоистых композитов возникает задача выбора их структуры, обеспечивающей в проектируемой конструкции расчетное деформированное и напряженное состояние в процессе эксплуатации.

В большинстве случаев используют структуры, которые отвечают свойствам симметричности физико-механических характеристик слоев относительно срединной поверхности и условию, когда в пакете слою с углом укладки  $+\varphi$  соответствует слой с углом укладки  $-\varphi$ , расположенные на одинаковом расстоянии от срединной поверхности [1].

Если структура не отвечает этим требованиям, то ее называют *несбалансированной*.

Несбалансированность возникает вследствие технологических и эксплуатационных факторов. К таким факторам можно отнести:

- отклонения углов и последовательности укладки слоев от расчетных;
- наличие разнотолщинности укладываемых слоев;
- неоднородное воздействие температур.

Эти факторы приводят к изменению деформированного и напряженного состояний элементов конструкций.

Несбалансированность может быть заведомо заложена в структуре для получения заданного деформированного состояния. Поэтому на этапе выбора структуры композита необходимо располагать информацией о влиянии структур на деформационное и напряженное состояние проектируемой конструкции при различных видах нагружения.

### 2. ВВОДИМЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Вводимые предпосылки [2, 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) выполняется гипотеза Кирхгофа о прямых недеформируемых нормалях.

### 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Рассмотрим влияние различных структур на напряженное состояние и деформационное по-

ведение двухопорной (рис. 1) и консольной (рис. 2) балок из углепластика на основе углеродной ленты УОЛ-300Р и связующего СП-97.

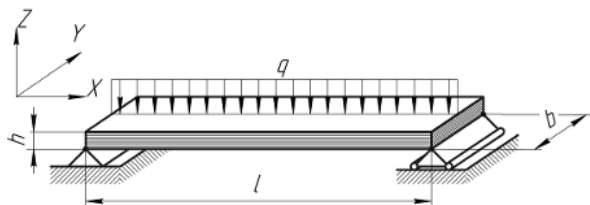


Рис. 1. Расчетная схема двухопорной слоистой композитной балки

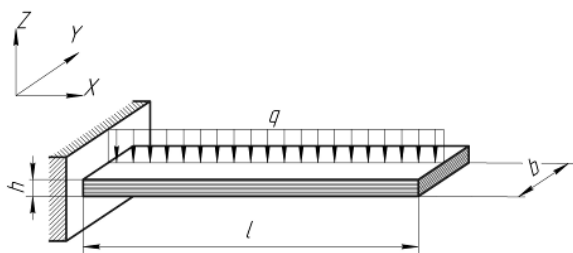


Рис. 2. Расчетная схема консольной слоистой композитной балки

*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  $q = 0,05$  Н/мм; упругие характеристики однонаправленного слоя:  $E_1 = 211$  ГПа;  $E_2 = 6,55$  ГПа;  $G_{12} = 2,79$  ГПа;  $\nu_{12} = 0,21$  [3].

Исследование напряженного и деформированного состояния балок проводилось под действием распределенной нагрузки (рис. 1, 2). Определение прогибов проводилось в сечениях наибольших перемещений.

Структуры слоев в рассматриваемых композитных балках были получены изменением угла укладки слоя № 5: 45/-45/0/-45/45 (первоначальное состояние); 45/-45/0/-45/42; 45/-45/0/-45/40; 45/-45/0/-45/35; 45/-45/0/-45/48; 45/-45/0/-45/50; 45/-45/0/-45/55 (отсчет слоев ведется слева направо).

На рис. 3 приведена зависимость максимального прогиба слоистой двухопорной композитной балки с вышеуказанными структурами. Характер изменения максимальных нормальных напряжений в направлении армирования в слоях № 4 и № 5 представлен на рис. 4.

Для выявления влияния числа слоев на величину прогибов при изменении угла укладки последнего слоя по отношению к первоначальному были рассмотрены 9-слойная, 13-слойная, 17-слойная балки из углепластика в двух-

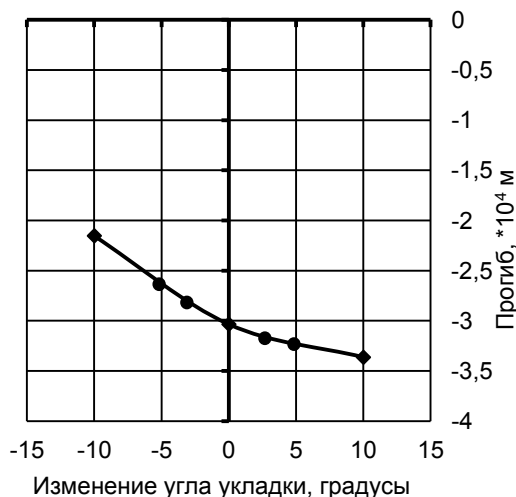
опорном и консольном вариантах закрепления со следующими первоначальными структурами:

9 слоев: 45/-45/30/-30/0/-30/30/-45/45;

13 слоев: 45/-45/30/-30/45/-45/0/-45/45/-30/30/-45/45;

17 слоев: 45/-45/30/-30/45/-45/30/-30/0/-30/30/-45/45/-30/30/-45/45;

Измененные структуры получены в результате отклонения угла укладки последнего слоя на  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ .



Изменение угла укладки, градусы

Рис. 3. Зависимость прогиба двухопорной 5-слойной балки от величины изменения угла укладки слоя № 5 от начального состояния ( $45^\circ$ )



1 – слой №5; 2 – слой №4

Рис. 4. Зависимость нормальных напряжений в слоях двухопорной 5-слойной балки от величины изменения угла укладки слоя № 5 от начального состояния ( $45^\circ$ )

Изменение деформированного состояния оценивается через величину относительного изменения прогиба по формуле:

$$\Delta U_{\text{отн}} = \frac{|U_{\text{нач}} - U_{\text{изм}}|}{U_{\text{нач}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $U_{\text{нач}}$  – прогиб балки с первоначальной структурой, а  $U_{\text{тек}}$  – прогиб балки с измененной структурой соответственно.

Влияние несбалансированности структуры на деформированное состояние многослойных композитных балок в различных вариантах закрепления при максимальном изменении угла укладки ( $\Delta\varphi$ ) последнего слоя в структуре представлено в табл. 1.

Таблица 1

Кол-во слоев	Вариант закрепления	Изменение прогиба при $\Delta\varphi = -10^\circ$ , %	Изменение прогиба при $\Delta\varphi = +10^\circ$ , %
5	двухопорное	29	11
	консольное	21	14
9	двухопорное	15	6
	консольное	10	3
13	двухопорное	10	8
	консольное	8	5
17	двухопорное	7	7
	консольное	6	4

Из табл. 1 видно, что при увеличении числа слоев величина изменения относительного прогиба уменьшается.

Рассмотрим влияние изменения *последовательности укладки слоев* по отношению к первоначальным структурам на напряженное и деформированное состояние двухопорных и консольных балок.

Начнем с 5-слойной балки, имеющей следующую первоначальную структуру:  $(45/-45/0/-45/45)^\circ$ . Схемы с различными вариантами последовательности укладки следующие:

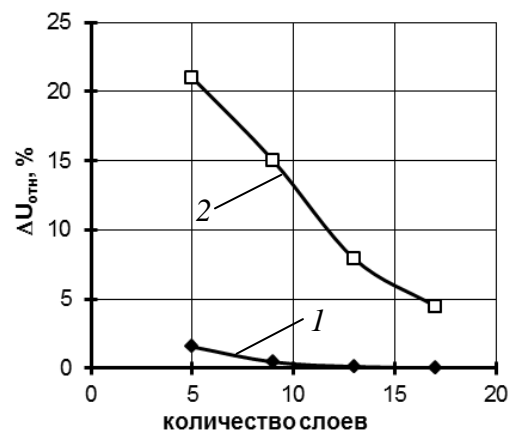
1)  $(45/-45/0/45/-45)^\circ$  – изменена последовательность укладки слоев № 5 ( $n$ ) и № 4 ( $n-1$ );

2)  $(45/-45/-45/0/45)^\circ$  – изменена последовательность укладки слоев № 4 ( $n-1$ ) и № 3 ( $n-2$ );

Для балок с количеством слоев, равным 9, 13, 17 первоначальные структуры приведены ранее, а характер изменения последовательности укладки аналогичен описанному выше для 5-слойной балки.

На рис. 5 представлена зависимость изменения относительного прогиба двухопорной композитной балки относительно первоначального состояния от числа слоев и варианта изменения последовательности укладки.

С увеличением количества слоев влияние изменения последовательности укладки слоев на деформационное поведение уменьшается.



**Рис. 5.** Зависимость изменения относительного прогиба двухопорной композитной балки относительно первоначального состояния от числа слоев и варианта изменения последовательности укладки:

1 – изменена последовательность укладки последнего ( $n$ ) и предпоследнего ( $n-1$ ) слоев;

2 – изменена последовательность укладки ( $n-1$ ) и ( $n-2$ ) слоев

Рассмотрим влияние *разнотолщинности слоев* в структуре на деформированное состояние приведенных ранее балок (рис. 1, 2).

При оценке влияния разнотолщинности допускалось изменение толщины одного из слоев структуры на 20 %. Первоначальная толщина слоя составляла 0,25 мм.

Для определения слоя, изменение толщины которого оказывает наибольшее влияние на прогиб, были рассмотрены различные варианты изменения толщин в различных слоях.

На рис. 6 представлены прогибы балок в зависимости от количества слоев и изменение толщины какого слоя имеет место (последнего –  $n$ -го, предпоследнего – ( $n-1$ )-го и ( $n-2$ )-го).

График показывает, что наибольшее влияние на прогиб оказывает изменение толщины в слоях, ориентированных вдоль оси балки ( $(n-2)$ -й слой).

На рис. 7 представлены зависимости изменения относительного прогиба двухопорной балки от числа слоев и при имеющей место разнотолщинности слоев балки (взяты максимальные значения изменения прогиба)

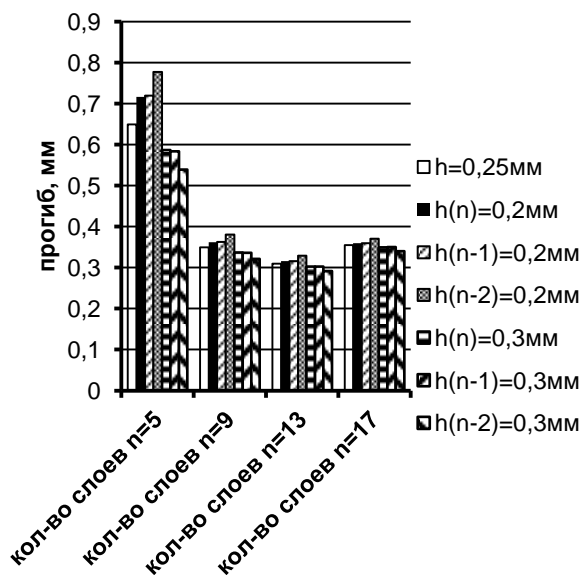


Рис. 6. Зависимость прогиба двухопорной балки от числа слоев и характера разнотолщинности слоев балок

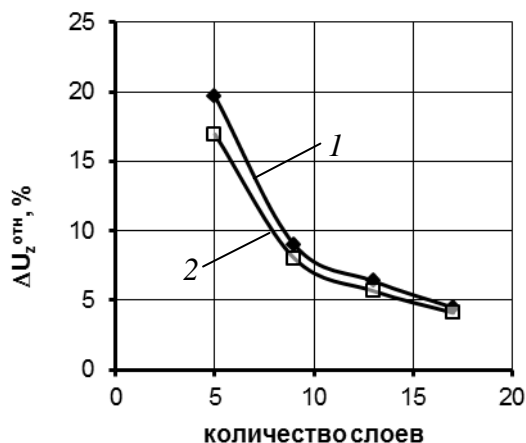


Рис. 7. Зависимость изменения относительного прогиба двухопорных балок относительно первоначального состояния от числа слоев при наличии разнотолщинности  $(n-2)$ -го слоя: 1 –  $h(n-2) = 0,2$  мм; 2 –  $h(n-2) = 0,3$  мм

Наличие разнотолщинности слоев может вызвать изменение нормальных напряжений в слоях (до 17 %), и деформированного состояния (до 20 %).

### Возможные варианты компенсации изначальной и технологической несбалансированности

Понятие сбалансированности, применяемое к многослойным композитам, весьма условно, ибо для того чтобы получить истинно сбалансированную структуру, необходимо удовлетворить двум взаимопротиворечащим друг другу условиям [1], что невозможно.

Вследствие этого при проектировании слоистых композитов в первую очередь стараются удовлетворить условию симметрии, которое заключается в том, что каждому слою над срединной плоскостью должен соответствовать идентичный по свойствам и ориентации слой, расположенный на таком же расстоянии ниже срединной плоскости.

При симметричной структуре слоистого композита при действии растягивающих или сжимающих сил в плоскости материала отсутствуют нежелательные эффекты изгиба и кручения стержня.

Под действием изгибающей нагрузки консольная балка с несбалансированной структурой испытывает кручение, которое в ряде случаев может быть недопустимым в процессе эксплуатации изделия.

Одним из методов компенсации негативного влияния несбалансированных структур является *варьирование углами укладки* слоев.

Наиболее эффективным воздействием при изгибе является изменение угла укладки внешнего слоя.

Рассмотрим пример компенсации изначальной несбалансированности на слоистой композитной балке, закрепленной консольно и состоящей из 5 слоев (см. рис. 2) и имеющей структуру укладки:  $(45 / -45 / 0 / -45 / 45)^\circ$ .

Так как при такой структуре удовлетворить обоим требованиям сбалансированности [1] невозможно, то при изгибе такой балки 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 (разность между перемещениями по оси Z двух узлов, находящихся на противоположных боковых гра-

нях сечения свободного торца балки составляет  $\Delta = 5 \cdot 10^{-7}$  м).

Схема укладки 5-слойной консольной балки, при которой величина закручивания свободного конца балки сводится к минимуму:

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

Для 9-, 13- и 17-слойной консольных балок ниже показаны схемы укладки слоев, при которых эффекты закручивания минимальны:

– схема укладки 9-слойной балки:

$$(45 / -45 / 30 / -30 / 0 / -30 / 30 / -45 / 56)^\circ;$$

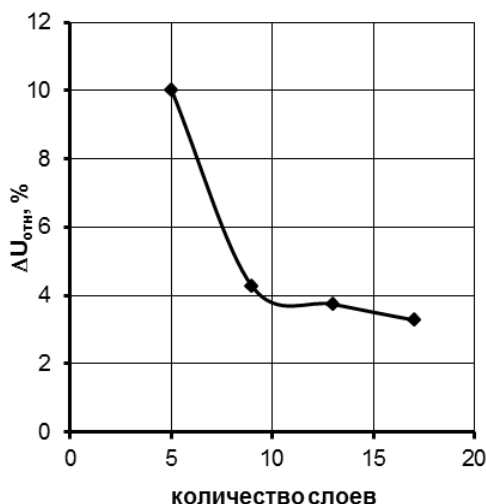
– схема укладки 13-слойной балки:

$$(45 / -45 / 30 / -30 / 45 / -45 / 0 / -45 / 45 / -30 / 30 / -45 / 53)^\circ;$$

– схема укладки 17-слойной балки:

$$(45 / -45 / 30 / -30 / 45 / -45 / 15 / -15 / 0 / -15 / 15 / -45 / 45 / -30 / 30 / -45 / 53)^\circ.$$

При изменении ориентации внешнего слоя также меняется жесткость балок. На рис. 8 представлено относительное изменение прогибов  $\Delta U_{\text{отн}}$  для так называемого «скорректированного» состояния (т. е. с укладкой, минимизирующей кручение) по отношению к первоначальному состоянию.



**Рис. 8.** Изменение прогиба при коррекции путем подбора угла укладки внешнего слоя относительно первоначального состояния в зависимости от числа слоев

Из графика видно, что для 5-слойного композита прогибы в скорректированном состоянии превышают прогибы в сбалансированном состоянии на 10 %. С увеличением числа слоев величина изменения прогиба уменьшается.

## ВЫВОД

Изменение структур слоистых балочных элементов из КМ, вызванное *отклонениями углов укладки* слоев от расчетных, приводит к изменению как деформационного поведения, так и напряженного состояния. Изменение зависит от величин отклонений углов укладки, числа слоев, вида нагружения и граничных условий закрепления балок. При числе слоев  $\geq 13$  влияние отклонений углов укладки в пределах  $\pm 5^\circ$  на величину максимального прогиба не превышает 5 %.

Влияние *изменения последовательности укладки* слоев композитных балок на их напряженно-деформированное состояние составляет до 20 %; с увеличением числа слоев влияние несбалансированности уменьшается.

Наличие *разнотолщинности* слоев в структуре балки вызывает изменение нормальных напряжений в слоях до 17 % и изменение прогиба до 20 %.

Компенсация несбалансированности как изначальной, так и технологической возможна за счет варьирования углами укладки нескольких слоев. Наиболее эффективным в случае изгибающей нагрузки является изменение угла укладки внешнего слоя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Формостабильные** и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г. А. Молодцов, В. Е. Биткин, В. Ф. Сильонов, Ф. Ф. Урманов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с. [G. A. Molodtsov, V. E. Bitkin, V. F. Silyonov, and F. F. Urmanov. *Form-stable and intellectual constructions made of composite materials*. Moscow: Mashinostroenie, 2000.]
2. **Роценс К. А., Штейнерс К. Н.** Оценка податливости и жесткости несбалансированных моноклинических композиций // Механика полимеров. 1976. № 6. С. 1030-1035. [С. А. Rotsens, С. N. Shteiners, "Unbalanced monoclinic composite materials compliance and rigidity estimation," *Mekhanika polimerov*, no. 6, pp. 1030-1035, 1976.]
3. **Первушин Ю. С.** Влияние несбалансированности структуры слоистых композиционных материалов на напряженно-деформированное состояние стержневых элементов // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 2 (37). С. 56-59. [Y. S. Pervushin, "Composite materials structure imbalance influence on rod elements stress-strain state", (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 14, no. 2 (37), pp. 56-59, 2010.]

## ОБ АВТОРАХ

**ПЕРВУШИН Юрий Сергеевич**, проф. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по динамике и прочности машин и аппаратов (Челяб. политехн. ин-т, 1991). Иссл. в обл. мех-ки и термомех-ки композиц. материалов.

**СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович**, ст. преп. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009).

**METADATA**

**Title:** Composite structure influence on rod construction elements stress-strain state under a bending.

**Authors:** Y. S. Pervushin, P.V. Soloviev.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>pcomposit@mail.ru, <sup>2</sup>paulnightingale@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 67-72, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** There is considered influence of multilayered composite beams structures obtained as a result of layers stacking angles changes, stacking sequences changes, layers polythickness on its stress-strain state in relation to an original structure. Structures influence is analyzed with double-supported and cantilever beams under the bending load. Results of deformation behavior and stress state in the most loaded layers are adduced.

**Key words:** composite; layer; imbalance; beam; stress; deformation.

**About authors:**

**PERVUSHIN, Yury Sergeevich**, Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Engineer (Ufa Aviation Institute, 1958). Dr. of Tech. Sci. (CPI, 1991).

**SOLOVIEV, Pavel Vladimirovich**, Master Teacher, Dept. of Materials Technology and Metals Physics. Dipl. Engineer (UGATU, 2009).