

УДК 539.4.015

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КВАЗИОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР И МЕСТ ИХ КРЕПЛЕНИЯ

© 2011 г.

*А.Н. Полилов, Н.А. Татусь, В.В. Шабалин, А.В. Малахов*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

polilov@imash.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Однонаправленные волокнистые композиты (стекло-, угле-, органо-пластики) обладают наилучшими продольными упруго-прочностными свойствами, но проблемы их крепления или изменения формы сечения не могут быть эффективно реализованы с применением традиционных «металлических» подходов, именно места крепления зачастую сводят на нет все преимущества полимерных композитов. Опыт живой природы – например, конструкция дерева, структура древесины около сучка и т.п. – подсказывает пути создания рациональных форм деталей из однонаправленных композитов и мест их крепления, исключая отрицательные «эффекты перерезанных нитей». В качестве иллюстраций приведены решения трех задач: 1) о профилировании упругой балки-рессоры, 2) об «обтекании» отверстия волокнами (модель сучка), 3) о росте ветки дерева.

*Ключевые слова:* композит, прочность, концентрация напряжений, криволинейные траектории волокон, разориентация, сучок в стволе дерева, разрушение, «китайский фонарик».

### Профилированная упругая балка-рессора

Для упругих элементов балочного типа (рессора) эффективна однонаправленная укладка волокон, при которой волокна располагаются вдоль линий наибольших напряжений. Для снижения веса и уменьшения числа листов в рессоре (до одного) необходимо профилировать композитную балку, и если удовлетворить условию постоянства площади поперечного сечения (рис. 1), то получится рессора без перерезанных волокон, что очень важно для сохранения прочности. Законы изменения ширины  $b(x)$  и толщины  $h(x)$  могут быть приняты степенными:

$$b(x) = b(0) \left(1 - \frac{x}{l}\right)^\alpha, \quad h(x) = h(0) \left(1 - \frac{x}{l}\right)^\beta, \quad (1)$$

где  $l$  – половина длины рессоры,  $x$  – продольная координата.

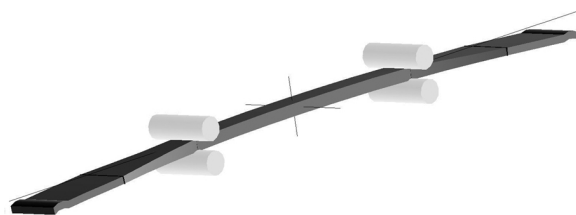


Рис. 1

Одновременное удовлетворение условиям равнопрочности и постоянства площади попереч-

ного сечения позволяет однозначно найти коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\begin{cases} \alpha + \beta = 0, \\ \alpha + 2\beta = 1, \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha = -1, \\ \beta = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Интересный результат получается, если сравнивать массы профилированной и прямоугольной балок при одновременном выполнении условий по жесткости и по прочности: любая равнопрочная балка ( $\alpha + 2\beta = 1$ ) в три раза легче прямоугольной.

Учет влияния разориентации проведен в балочном приближении и сводится к усреднению модуля упругости по каждому сечению с последующим численным решением задачи о прогибе балки с переменным модулем. Для анализа несущей способности используются локальные (линейные) критерии прочности для волокон и для границы раздела и нелокальные энергетические критерии расслоения, позволяющие учесть совместное влияние изгибающего и крутящего моментов.

### «Обтекание» отверстия волокнами

Методом конечных элементов решена задача о распределении напряжений около отверстия с огибающими его волокнами. На рис. 2 приведены линии наибольших главных напряжений, совпадающие с траекториями древесных волокон около сучка.

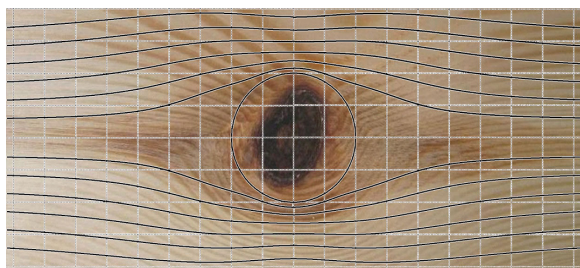


Рис. 2

В предположении о расположении волокон вдоль траекторий главных растягивающих напряжений получено распределение свойств в «новом» модельном материале.

В каждом конечном элементе приходится

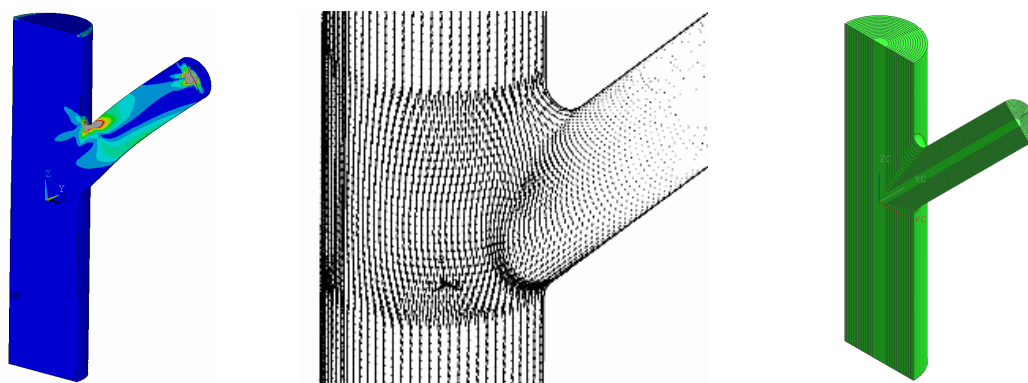


Рис. 3

моделировать не только свои упругие свойства, но и направление оси упругой симметрии. Далее удалось сравнить новое распределение напряжений для модельного материала с локальной прочностью, которая также меняется от точки к точке.

В качестве критерия разрушения на первом этапе рассматривалось просто достижение растягивающими напряжениями вдоль волокон их предела прочности на растяжение. С ростом локального объемного содержания волокон растет локальный модуль упругости и, значит, возрастают напряжения.

Но и локальная прочность, естественно, растет с ростом объемной доли волокон в данной точке. Важно было выяснить: дает ли перераспределение волокон положительный эффект на несущую способность и какова количественная оценка этого эффекта.

Сравнение напряжений вдоль волокон с их прочностью показывает, что в оптимально уложенной структуре прочность соединения снижается всего на 20%, а не в 3–5 раз, как в однородной анизотропной пластине с отверстием, т.е. – в принципе – можно создать практически «равнопрочное» соединение за счет криволинейной укладки волокон.

### Задача о росте ветки дерева

Задача о росте ветви дерева (рис. 3) по условию равнопрочности позволяет подойти к проблеме создания композитных структур сложной, разветвленной формы.

Разработана программа для моделирования процесса вставания сучка в ствол, при помощи которой возможно определить оптимальные траектории волокон для обеспечения наибольшей прочности соединения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 08-08-00166-а.*

### Список литературы

1. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Критерии прочности полимерных волокнистых композитов, описывающие некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. №3. С. 103–110.
2. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Оптимальное проектирование композитных структур по условиям «равнопрочности» // Труды Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. 2006. Т. 3. С. 175.

**BIOMECHANICAL PRINCIPLES OF DESIGNING QUASI-UNIDIRECTIONAL COMPOSITE STRUCTURES AND THEIR JOINING ZONES**

*A.N. Polilov, N.A. Tatus, V.V. Shabalin, A.V. Malakhov*

Unidirectional fibrous composites, like straight grained wood have the best longitudinal elastic-strength properties, but the problems of joining the composite elements cannot be solved effectively using «metal» approaches only. However, joining zones usually reduce the advantages of composites to zero. Experience of the Nature (for example, the structure of wood around a knot) shows the ways of a rational design of parts of quasi-unidirectional composites and zones of their joining preventing the «effects of cut fibers». There are three examples of solved problems in the report, connected with: 1) disorientation of fibers in shaped composite elements, 2) trajectories of fibers around a hole (modeling a knot) and «branch to trunk» connection, 3) «Chinese lantern»-mode fracture of bamboo and composite tubes.

*Keywords:* composite materials, strength, stress concentration, curvilinear trajectory of fibers, disorientation, knot in the trunk of a tree, fracture, «Chinese lantern».