

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТА В СОЕДИНИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

Область внедрения композиционных материалов (КМ) в ответственных высоконагруженных конструкциях авиационной техники в настоящее время ограничена применением тонкостенных обшивок из слоистых композитов, тогда как основной силовой каркас (лонжероны, нервюры, шпангоуты и т.д.) представлены типовыми элементами из традиционных для авиастроения металлов и сплавов. Причины такого «недоверия» к КМ во многом связаны с присущими недостатками при реализации соединений элементов продольного и поперечного силового набора между собой и обшивкой с обеспечением надлежащего силового взаимодействия.

Тем не менее анализ современных тенденций в области разработки авиаконструкций из КМ свидетельствует о том, что даже такой сложный агрегат планера самолета, как крыло, может быть полностью изготовлен из КМ. Таких примеров можно привести достаточно много, особенно среди летательных аппаратов с взлетным весом до 1000...1500 кг, в которых соединение стенок лонжеронов, нервюр и обшивки крыла осуществляется с использованием компенсирующих паст. Однако такое конструктивно-технологическое решение вполне оправдано для агрегатов с небольшой удельной нагрузкой. Для высоконагруженных тонкостенных конструкций одним из альтернативных способов соединения элементов каркаса между собой является использование специального соединительного элемента (рис. 1), основное функциональное назначение которого – передача и распределение пересекающихся потоков усилий. Одним из главных преимуществ этого соединения является обеспечение целостности нитей армирующего материала, позволяющее реализовать максимально возможные прочностные свойства композиционного материала.

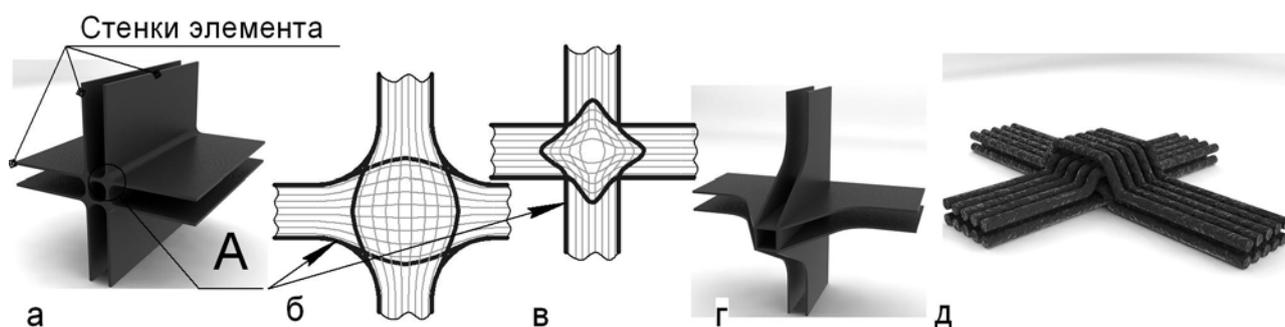


Рисунок 1 – Крестообразный соединительный элемент из КМ

Разработка технологии изготовления соединительного элемента является довольно сложной задачей, решение которой заключается в выборе компонентов КМ, способа формообразования (намотка сухой арматуры с последующей пропиткой окунаем, РТМ-технология, намотка пропитанной арматуры), способа формования (формование в жестких формах или с помощью эластичного элемента), материала оснастки, а также способа механообработки (обрезка технологических припусков с помощью ручной бормашинки или диском с алмазным напылением на фрезерном станке).

Стенки соединительного элемента представляют собой однонаправленный КМ с регламентированной величиной объемного содержания армирующего материала. Однако в нерегулярной зоне величина объемного содержания изменяется из-за искривления нитей и их сплющивания при переплетении (см. рис. 1, б, в), что приводит к изменению упругих и прочностных характеристик материала. Поэтому для реализации заданного объемного содержания и допустимых углов отклонения нитей нерегулярную зону необходимо соответствующим образом профилировать, т.е. необходима математическая модель, позволяющая моделировать поведение нитей при формообразовании и определять степень изменения механических характеристик КМ в каждой точке нерегулярной зоны.

Геометрическая модель соединительного элемента с обозначением характерных параметров показана на рис. 2.

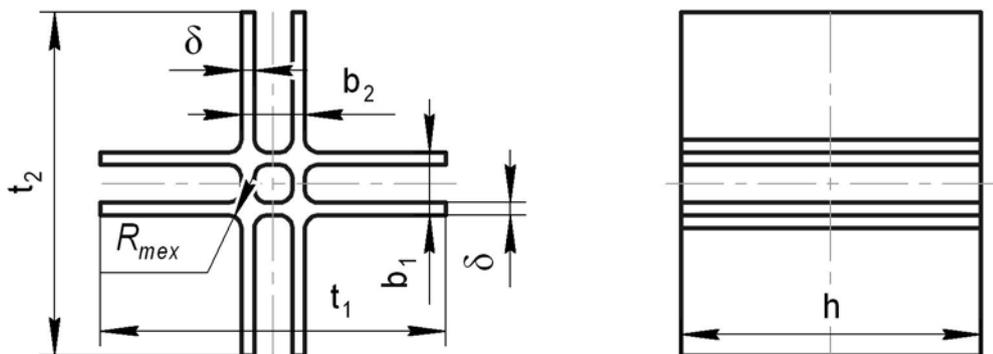


Рисунок 2 – Геометрические размеры соединительного элемента

Для описания механизма взаимодействия нитей арматуры в зоне пересечения стенок примем следующие допущения:

- нити представляют собой упругие стержни;
- распределение нитей по объему КМ принимается равномерным;
- в сечении $x = 0$ (рис. 3, б) КМ обладает исходной (проектной) структурой с заданным объемным содержанием волокон θ_0 ;

- в срединной плоскости стенки $x = L_1$ (см. рис. 3, б) объемное содержание волокон принимает значение $\theta_0 \leq \theta^* \leq \theta_0 \xi$, где $\xi = 1, \dots, 1.2$ – коэффициент неравномерности;

– волокна в зоне переплетения сплющиваются равномерно по высоте. Высота сплющенной нити не меньше половины диаметра нити.

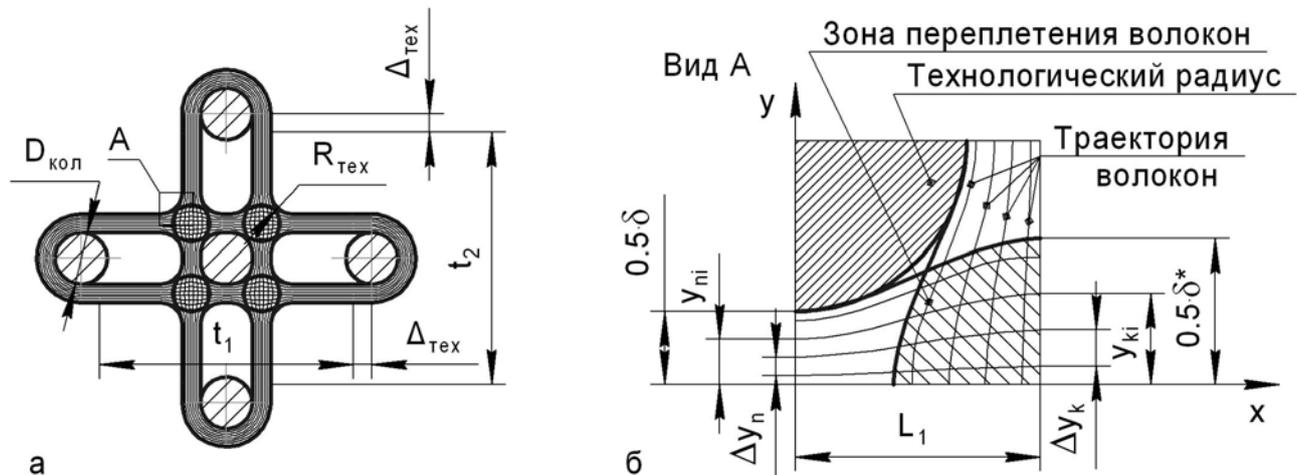


Рисунок 3 – Основные параметры соединительного элемента

Для определения общего количества слоев армирующего материала (ровинга, нитей), необходимого для намотки соединительного элемента с учетом заданных размеров и объемного содержания, необходимо рассчитать приведенный диаметр используемой арматуры [1]

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi \cdot \rho}}, \quad (1)$$

где T – линейная плотность армирующего материала (нити, жгута, ровинга), текс;

ρ – плотность армирующего материала, кг/м³.

Для уменьшения времени намотки профиль целесообразно формировать из максимально возможного количества нитей, одновременно пропускаемых через направляющую головку нитеукладчика. Тогда количество нитей по толщине стенки соединительного элемента определяют согласно следующему условию:

$$\frac{\delta \cdot \theta_0}{d} < n_w < \frac{\delta}{d}, \quad (2)$$

где δ – толщина стеночки;

θ_0 – объемное содержание арматуры в регулярной зоне.

Расчет количества нитей по высоте соединительного элемента выполняют по формуле

$$n_h = \frac{4\theta_0 h \delta}{\pi d^2 n_w}. \quad (3)$$

Тогда суммарное количество витков, наматываемых одним нитеукладчиком,

$$n_{\Sigma} = n_w \cdot n_h. \quad (4)$$

Следовательно, необходимая длина арматуры, потребная для намотки соединительного элемента,

$$L_{\Sigma} \geq n_{\Sigma} [4\pi R_{cp} + 2(t_1 + t_2 + 4\Delta_{mex})], \quad (5)$$

где $R_{cp} = 0,5(D_{кол} + \delta)$ – срединный радиус стеночки;

$D_{кол}$ – диаметр колонки, на которую наматывается арматура;

t_1, t_2 – длина горизонтальной и вертикальной стеночек;

$\Delta_{mex} = 5, \dots, 10$ мм – технологический припуск для обрезки кромок.

Положение i -й нити в регулярной зоне с учетом принятых допущений рассчитывают по формуле (см. рис. 3, б)

$$y_{ni} = \frac{\delta}{n_w}(i - 1). \quad (6)$$

Предположим, что в регулярной зоне $x = 0$ поперечное сечение нити описывается уравнением окружности (рис. 4, а), а в нерегулярной зоне $x = L_1$ (зона переплетения нитей) поперечное сечение деформируется и приобретает вид эллипса (см. рис. 4, б). Тогда расчетное объемное содержание арматуры в регулярной (рис. 4, в) и нерегулярной зонах стеночки (рис. 4, г) определяют следующим образом:

$$\theta_0 = \frac{\pi d^2}{4\Delta\delta\Delta h}; \quad (7)$$

$$\theta^* = \theta_0 \xi = \frac{\frac{\pi d^2}{4} + \frac{1}{2}d\Delta\delta^*}{\Delta\delta^*\Delta h} = \theta_0 \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta^*} + \frac{d}{2\Delta h}. \quad (8)$$

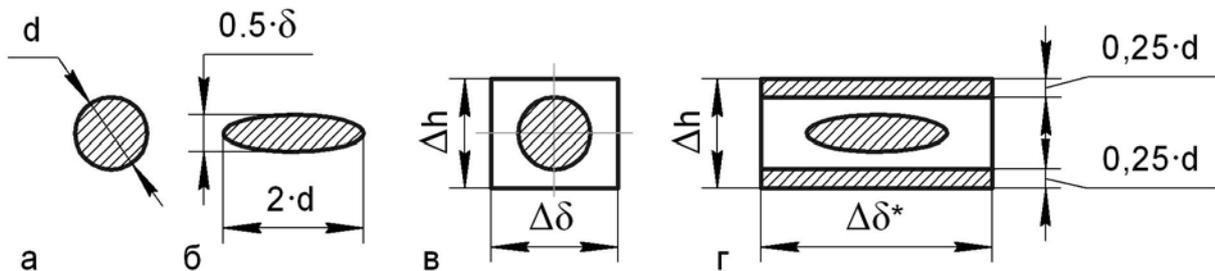


Рисунок 4 – Поперечное сечение армирующего материала и элементарного объема КМ в регулярной и нерегулярной зонах

Следовательно, выразив из уравнения (8) $\Delta\delta^*$ и умножив на количество нитей, можно определить максимальную толщину стенки в нерегулярной зоне

$$\delta^* = n_w \Delta\delta^* = \frac{\theta_0 \delta}{\theta_0 \xi - \frac{d}{2\Delta h}}. \quad (9)$$

Тогда расположение волокон в сечении $x = L_1$ ($L_1 = R_{mex} + 0,5\delta$) определяется формулой

$$y_{ki} = \frac{\delta^*}{n_w}(j-1) = \frac{\delta}{n_w}(j-1) \frac{\theta_0}{\theta_0\xi - \frac{d}{2\Delta h}} = y_{ni} \frac{\theta_0}{\theta_0\xi - \frac{d}{2\Delta h}}, \quad (10)$$

где $i = 1, \dots, n_w^*$, ($n_w^* = 0,5 \cdot n_w$) – номер рассматриваемой траектории.

Определим расстояние между элементарными волокнами в сечениях регулярной ($x = 0$) и нерегулярной ($x = L_1$) зон (см. рис. 3, б):

$$\Delta y_n = \frac{\delta}{n_w}; \quad (11)$$

$$\Delta y_{ki} = \frac{\delta^*}{n_w} = \frac{\theta_0\delta}{(\theta_0\xi - \frac{d}{2\Delta h})n_w}. \quad (12)$$

С учетом принятых гипотез уравнение, описывающее траекторию наматываемой нити, имеет следующий вид:

$$w_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i, \quad i = 1 \dots n_w, \quad (13)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i – коэффициенты, определяемые из граничных условий:

$$\text{– при } x = 0 \quad w_i = y_{ni}; \quad \frac{dw_i}{dx} = 0;$$

$$\text{– при } x = L_1 \quad w_i = y_{ki}; \quad \frac{dw_i}{dx} = 0.$$

Траекторию нити с учетом рассчитанных коэффициентов a_i, b_i, c_i и d_i из граничных условий, можно записать в следующем виде:

$$y_i(x) = \frac{2}{L_1^3}(y_{ni} - y_{ki})x^3 + \frac{3}{L_1^2}(y_{ki} - y_{ni})x^2 + y_{ni}, \quad (14)$$

где $x \in 0, \dots, R_{mex} + 0,5\delta$.

Изменение угла наклона элементарной нити в нерегулярной зоне описывается следующим образом:

$$\alpha_i(x) = \frac{6}{L_1^3}(y_{ni} - y_{ki})x^2 + \frac{6}{L_1^2}(y_{ki} - y_{ni})x, \quad (15)$$

Границы элементарного объема КМ (см. рис. 5, а) в нерегулярной зоне определяют как

$$y_i^*(x) = \frac{2}{L_1^3}(y_{ni}^* - y_{ki}^*)x^3 + \frac{3}{L_1^2}(y_{ki}^* - y_{ni}^*)x^2 + y_{ni}^*, \quad (16)$$

где $y_{ni}^* = y_{ni} + 0,5\Delta y_n$; $y_{ki}^* = y_{ki} + 0,5\Delta y_k$.

Траектория пересекаемых нитей, образующих вертикальные стенки соединительного элемента (см. рис. 3, б), описывается уравнением

$$x_{i,j} = \frac{2}{L_1^3}(y_{ni} - y_{ki})\hat{y}_j^3 + \frac{3}{L_1^2}(y_{ki} - y_{ni})\hat{y}_j^2 + L_1 + y_{ki}, \quad (17)$$

где $\hat{y}_j = \frac{L_1}{n_w - 1}(j - 1)$, $j \in 1, \dots, n_1$, n_1 – количество рассматриваемых сечений по высоте нерегулярной зоны (рис. 5, б).

Границы элементарного объема КМ в вертикальном направлении описываются уравнением

$$x_{i,j}^* = \frac{2}{L_1^3}(y_{ni}^* - y_{ki}^*)\hat{y}_j^3 + \frac{3}{L_1^2}(y_{ki}^* - y_{ni}^*)\hat{y}_j^2 + L_1 + y_{ki}^*. \quad (18)$$

После построения траекторий элементарных нитей в продольном и поперечном направлениях является актуальным исследование изменения объемного содержания волокон в местной системе координат, которое можно вычислить для элементарного объема (рис. 5, в, г).

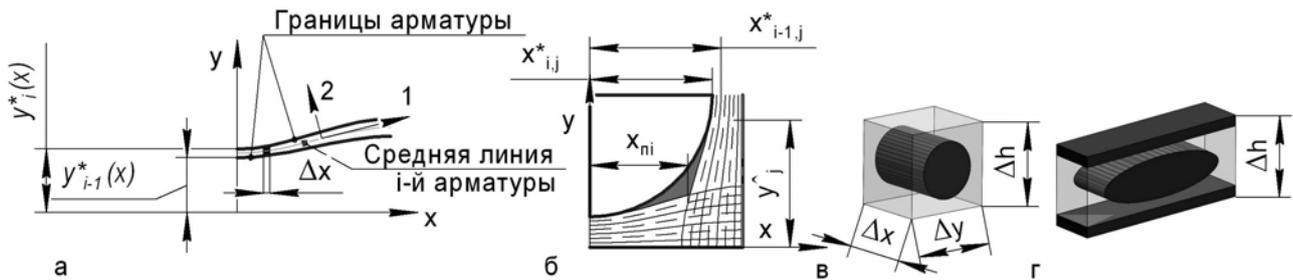


Рисунок 5 – Местная система координат элементарного объема КМ и размеры поперечного сечения в регулярной и нерегулярной зонах

Для определения точки пересечения элементарных нитей $x = x_{ni}$, образующих вертикальные и горизонтальные стенки соединительного элемента (см. рис. 5, б), разработан численный алгоритм, схема которого приведена на рис. 6, а. На схеме указаны следующие обозначения:

η – погрешность вычислений;

k – количество расчетных сечений до зоны пересечения волокон;

i – номер рассматриваемой арматуры;

j – номер рассматриваемого сечения;

$x_1 = 1$; $x_2 = 0$; $\lambda = 0$ – начальные значения;

$$y_{nn_w}^* = y_{n,n_w} + 0,5\Delta y_n, \quad y_{kn_w}^* = y_{k,n_w} + 0,5\Delta y_k.$$

Ширину i -го элементарного объема КМ определяют так

$$\Delta y_{i,j} = [y_{i,j}^*(x_{i,j}) - y_{i-1,j}^*(x_{i,j})] \cos(\alpha_i(x_{i,j})), \quad (19)$$

где $x_{i,j} = \frac{x_{ni}}{k-1} \cdot j$ – расстояние до рассматриваемого сечения.

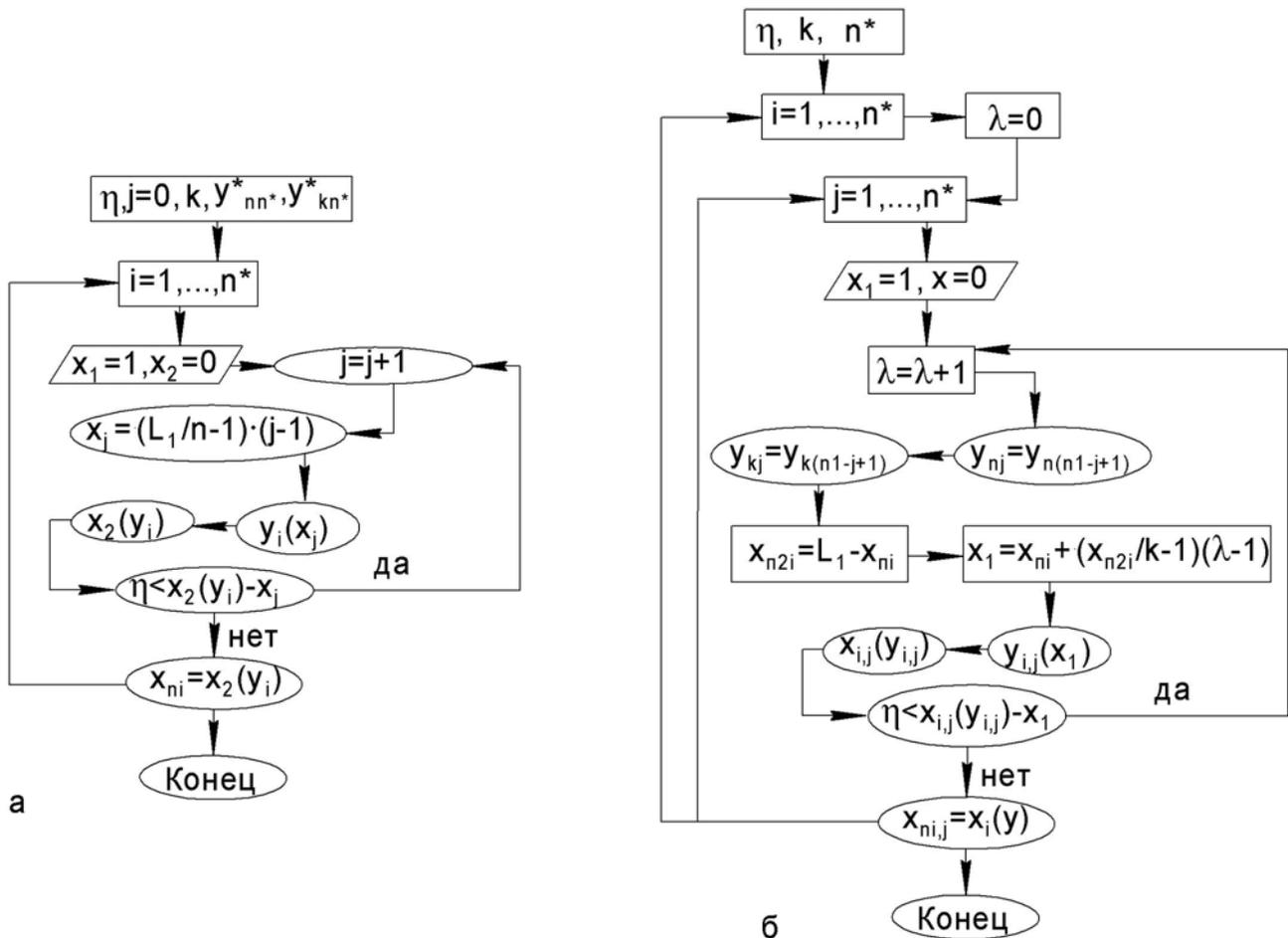


Рисунок 6 – Алгоритм расчета зоны пересечения и определения размеров элементарных объемов КМ в зоне пересечения нитей

После определения размеров элементарных объемов КМ содержание армирующего материала в композите до зоны пересечения нитей рассчитывают по формуле

$$\theta_{i,j} = \frac{f_{арми} \Delta x_{i,j}}{\Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} \Delta h} = \frac{\pi d^2}{4 \Delta y_{i,j} \Delta h} \quad (20)$$

В зоне пересечения нити деформируются и поочередно накладываются друг на друга, в результате чего элементарный объем КМ имеет вид, показанный на рис. 5, г. Для определения максимального объемного содержания волокон в зоне пересечения необходимо найти границы элементарных объемов КМ по алгоритму, схема которого приведена на рис. 6, б.

Ширину рассматриваемого элемента рассчитывают по формуле (19), где вместо значений $x_{i,j}$ подставляются полученные значения координат точек пересечения арматуры. Тогда объемное содержание волокон в зоне их переплетения определяется формулой

$$\theta_{i,j}^* = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\Delta x_{i,j} + 0,5d\Delta x_{i,j}\Delta y_{i,j}}{\Delta x_{i,j}\Delta y_{i,j}\Delta h}. \quad (21)$$

В качестве примера на рис. 7, а показано изменение объемного содержания по длине i -й траектории арматуры в местной системе координат для следующих исходных данных: $\delta = 10$ мм; $n_w = 7$; $R_{mex} = 40$ мм; $\theta_0 = 0,5$; $\xi = 1,2$; $T = 1600$ текс.

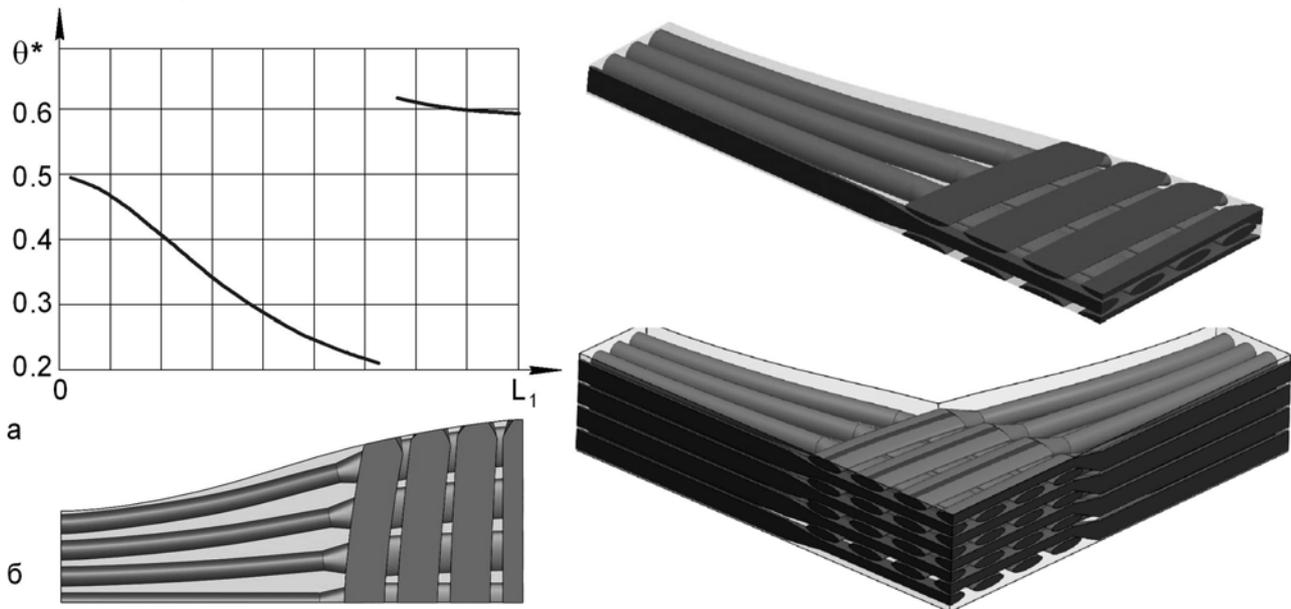


Рисунок 7 – Изменение объемного содержания в нерегулярной зоне КМ

При известных физико-механических характеристиках армирующего материала и связующего по зависимостям микромеханики КМ можно вычислить упругие и прочностные характеристики микрообъема КМ в любой точке. Расчет напряженно-деформированного состояния соединения проводится по осредненным значениям упругих свойств КМ, которые можно определить на основании какой-либо теории осреднения [2].

Список использованных источников

1. Крысько, Л.П. Техника и технология плетения [Текст] / Л.П. Крысько, М.Г. Деханова. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 176 с.
2. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.

Поступила в редакцию 24.04.2013.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.