

В. Н. СТАРЧЕНКО (ВНУ им. В. Даля)

## РАСЧЕТ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦИОННЫХ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Наведено теорія і методика розрахунку пружних характеристик та технічних констант фрикційних вуглецевих композиційних матеріалів просторово армованих прямими стержнями малого діаметру. Виконано аналіз результатів розрахунків і порівняння структур 3-D та 4-DL, надана оцінка точності запропонованої методики.

Приведены теория и методика расчета упругих характеристик и технических констант фрикционных углеродных композиционных материалов пространственно армированных прямыми стержнями малого диаметра. Выполнены анализ результатов расчета и сравнение структур 3-D и 4-DL, дана оценка точности предлагаемой методики.

The theory and design procedure of elastic characteristics and technical constants of frictional carbon - carbon composite materials, spatially reinforced by direct small diameter rods, have been presented. An analysis of the calculations output and comparison of the 3-D and 4-DL structures have been executed; an estimation of the accuracy of the proposed technique has been presented.

Общей тенденцией развития и совершенствования железнодорожного транспорта является повышение мощности тяговых единиц подвижного состава и скорости движения поездов.

В этих условиях проблема торможения приобретает особую актуальность, поскольку необходимо обеспечить не только безопасность движения и достаточно энергоемкое погашение кинетической энергии, но и выполнить жесткие нормативные требования по длине тормозного пути и величине замедления.

В единую систему торможения скоростных поездов могут устанавливаться различные тормоза: электрический (рекуперативный и/или реостатный), вихретоковый, магниторельсовый и механический (фрикционно-дисковый или колодочный), при этом долевое участие последних составляет около 50 % и они по-прежнему незаменимы по условиям безопасности движения (в случаях отключения сети, энергетической силовой установки и т. д.).

Основным звеном, обеспечивающим эффективную, стабильную и надежную работу механического тормоза, является фрикционное сопряжение: тормозная колодка (накладка) – ходовые колеса тормозных осей или тормозной диск. В качестве фрикционных материалов для тормозных колодок и накладок используются: чугун (серый, перлитный, фосфористый) различных модификаций с добавлением Cr, Cu, Mo, Ni, Va, P и др.; композиты в виде сочетания связующего (смола или каучука) с волокнами, минеральными и органическими наполнителями разного вида и про-

центного содержания; металлокерамика – на основе железа, бронзы или меди. Тормозные диски изготавливаются из чугуна серого или с шаровидным графитом; легированной стали; алюминия, армированного карбидом кремния SiC; в качестве нового материала – угольно-силиконовые карбидные диски (carbon-silicon carbide) [1–5].

Общим недостатком известных фрикционных сопряжений является существенное снижение эффективности работы в зависимости от удельной нагрузки, скорости скольжения и температуры контактной поверхности.

Более высокий и стабильный коэффициент трения при любых режимах торможения, высокие износостойкость и теплопроводность, теплостойкость и прочность, а также совместимость работы с контртелом показали новые тормозные колодки, изготовленные на основе углеродной матрицы с армирующим каркасом из высокопрочных углеродных волокон и газофазным насыщением [6; 7].

Целью предлагаемой работы является разработка теории и методики расчета упругих характеристик фрикционного пространственно армированного прямыми волокнами углеродного композиционного материала (КМ).

Рассматриваются наиболее перспективные материалы на основе трехнаправленной (3-D) и четырехнаправленной (4-DL) текстур, основой которых является армирующий каркас из однонаправленных углеродных стержней малого диаметра, размещенных в плоскости слоя и перпендикулярно к нему, что дает ряд преимуществ в сравнении со слоистыми структурами.

Анализ схем армирования показал, что у этой группы материалов можно выделить повторяющийся элемент в виде плоского слоя, характерной особенностью которого является наличие волокон двух направлений: в плоскости слоя и перпендикулярно к нему. Если в каждом слое пренебречь неоднородностью структуры и определить его эффективные характеристики как квазиоднородного материала, то деформационная модель КМ с пространственным расположением арматуры может рассматриваться в виде неоднородного блока, состоящего из элементарных слоев, которые могут различаться по ориентации и содержанию арматуры в плоскости слоя.

Упругие характеристики каждого из слоев определяются свойствами компонентов и их объемной концентрацией. Расчет характеристик ортогонально армированного двухмерного слоя волокнистого композита производится по формулам для однонаправленного композита, но характеристики модифицированной матрицы предварительно рассчитываются через свойства связующего и армирующих волокон ортогонального направления.

Расчет степени армирования. Объемный коэффициент для 3-D структуры при плотной ортогональной упаковке волокон различного диаметра (рис. 1) определится из выражения

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\pi}{4} \left\{ \left[ d_1^2 (d_2 + d_3) + d_2^2 (d_1 + d_3) + d_3^2 (d_1 + d_2) \right] / \left[ (d_1 + d_2) \times (d_2 + d_3)(d_1 + d_3) \right] \right\},$$

при

$$d_1 = d_2 = d_3, \quad \mu_{\Sigma} = \frac{3}{16} \cdot \pi.$$

Если стержни имеют степень армирования  $\varphi$ , то  $\mu_{пр} = \mu_{\Sigma} \cdot \varphi = 0,589\varphi$ , тогда степень армирования по каждому из направлений

$$\mu_i = 0,333 \cdot 0,589\varphi = 0,196\varphi,$$

где 0,333 – доля волокон, уложенных в каждом из направлений, от общего объема волокнистой арматуры.

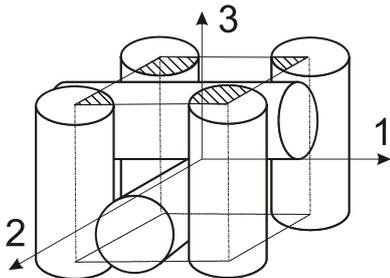


Рис. 1. Элемент объемной 3-D структуры

Для 4-DL структуры (рис. 2), где  $D$  и  $d$  – соответственно диаметры вертикально и горизонтально расположенных стержней, имеем

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\sqrt{3}D^2 + 2d(d+D)}{(d+D)^2},$$

при

$$D = d, \quad \mu_{\Sigma} = \frac{\pi}{8} \left( \frac{\sqrt{3}}{4} + 1 \right) = 0,563,$$

тогда

$$\mu_{пр} = \mu_{\Sigma} \cdot \varphi = 0,563\varphi.$$

В направлении, перпендикулярном плоскости укладки (вертикальном)

$$\mu_3 = 0,302 \cdot 0,563\varphi = 0,17\varphi,$$

где 0,302 – доля волокон, уложенных в вертикальном направлении, от общего объема волокнистой арматуры.

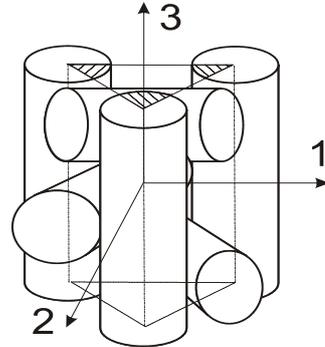


Рис. 2. Элемент объемной 4-DL структуры

Определение степени армирования каждого из слоев по направлениям (рис. 3–4).

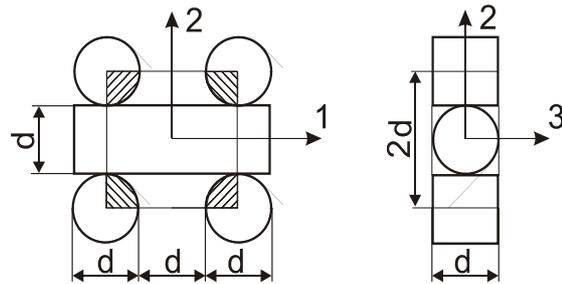


Рис. 3. Элемент слоя 3-D структуры

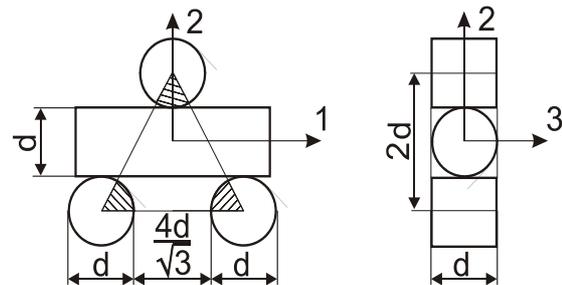


Рис. 4. Элемент слоя 4-DL структуры

3-D структура:

$$\mu_1 = \frac{\pi d^2}{4 \cdot 2d^2} = \frac{\pi}{8} = 0,39; \quad \mu_2 = 0;$$

$$\mu_{1пр} = 0,39\varphi;$$

$$\mu_3 = \frac{\pi d_2^2}{4 \cdot 4d^2} = \frac{\pi}{16} = 0,196;$$

$$\mu_{3пр} = 0,196\varphi.$$

4-DL структура:

$$\mu_1 = \frac{\pi d^2}{4 \cdot 2d^2} = \frac{\pi}{8} = 0,39; \quad \mu_2 = 0;$$

$$\mu_{1пр} = 0,39\varphi;$$

$$\mu_3 = \frac{\pi d^2 \cdot 2 \cdot \sqrt{3}}{8 \cdot 4d \cdot 2d} = \frac{\pi \sqrt{3}}{32} = 0,17;$$

$$\mu_{3пр} = 0,17\varphi.$$

Расчеты показывают, что для плоского монослоя степень армирования в плоскости слоя постоянна и равна

$$\mu_{1пр} = 0,39\varphi,$$

а в вертикальном направлении совпадает со значением степени армирования по этому направлению.

Расчет характеристик модифицированной матрицы производится методом усреднения упругих свойств волокон, уложенных в направлениях, перпендикулярных направлению армирования и связующего. Последующий расчет деформативных характеристик слоистого материала определяется выбором направлений армирования, которые усредняются при модификации свойств матрицы или являются арматурой выделенного элементарного слоя.

Так, при расчете характеристик модифицированной матрицы в направлениях 1 и 2 в качестве модифицирующей арматуры выбирается арматура, уложенная в направлении 3, а при расчете характеристик модифицированной матрицы в направлении 3 в качестве модифицирующей арматуры выбирается арматура, уложенная в направлении 1.

Основные данные для расчета:  $E_a$  и  $E_c$  – модуль упругости армирующих волокон и матрицы (связующего);  $G_a$  и  $G_c$  – модуль сдвига соответственно;  $\nu_a$  и  $\nu_c$  – коэффициент Пуассона соответственно;  $\varphi$  – степень наполнения стержней, формирующих пространственную структуру,

армирующими волокнами;  $\mu_1 = 0,39\varphi$  – степень армирования в направлении укладки волокон в слое;  $\mu_3$  – степень армирования в направлении, перпендикулярном слою.

Дополнительные данные:

$$n^0 = \frac{E_a}{E_c}; \quad m^0 = \frac{G_a}{G_c}.$$

Расчетные зависимости для определения модулей упругости и модулей сдвига модифицированной матрицы принимают вид:

$$E_1^* = \frac{[1 + (n^0 - 1)\mu_3]E_a}{[\mu_3 + n^0(1 - \mu_3)][1 + (n^0 - 1)\mu_3] - A};$$

$$A = (n^0 \nu_c - \nu_a)^2 (1 - \mu_3)\mu_3;$$

$$E_2^* = E_1^*;$$

$$E_3^* = \frac{[1 + (n^0 - 1)\mu_1]E_a}{[\mu_1 + n^0(1 - \mu_1)][1 + (n^0 - 1)\mu_1] - A1};$$

$$A1 = (n^0 \nu_c - \nu_a)^2 (1 - \mu_1)\mu_1;$$

$$G_{12}^* = \frac{E_a}{2[(1 + \nu_a)\mu_3 + n^0(1 + \nu_c)(1 - \nu_3)]};$$

$$G_{13}^* = \frac{m^0(1 + \mu_1) + 1 - \mu_1}{m^0(1 - \mu_1) + 1 - \nu_1} G_c;$$

$$G_{23}^* = \frac{E_a}{2[(1 + \nu_a)\mu_1 + n^0(1 + \nu_c)(1 - \mu_1)]}.$$

Вычисление дополнительных констант:

$$n_1^* = n_2^* = \frac{E_a}{E_1^*}; \quad n_3^* = \frac{E_a}{E_3^*};$$

$$m_{12}^* = \frac{G_a}{G_{12}^*}; \quad m_{13}^* = \frac{G_a}{G_{13}^*}; \quad m_{23}^* = \frac{G_a}{G_{23}^*}.$$

Вычисление коэффициентов Пуассона модифицированной матрицы:

$$\nu_{12}^* = \left\{ \left[ \nu_a \mu_3 + n^0 \nu_c (1 - \mu_3) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ 1 + (n^0 - 1)\mu_3 \right] + A2 \right\} / \left\{ n_2^* \left[ 1 + (n^0 - 1)\mu_3 \right] \right\};$$

$$A2 = (n^0 \nu_c - \nu_a)^2 (1 - \mu_3)\mu_3;$$

$$v_{13}^* = \frac{(1-\mu_1)v_c + \mu_1 v_a}{E_a \mu_1 + E_c(1+\mu_1)} E_3^*;$$

$$v_{23}^* = \left\{ \left[ v_a \mu_1 + n^0 v_c (1-\mu_1) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ 1 + (n^0 - 1) \mu_1 \right] + A3 \right\} / \left\{ n_3^* \left[ 1 + (n^0 - 1) \mu_1 \right] \right\}; \\ A3 = (n^0 v_c - v_a)^2 (1-\mu_1) \mu_1.$$

Расчет упругих характеристик горизонтального слоя с прямыми волокнами. При расчете упругих характеристик элементарного слоя в направлениях 1 и 2 в качестве армирующей выбирается арматура, уложенная в направлении 1, а при расчете характеристик элементарного слоя в направлении 3 в качестве армирующей выбирается арматура, уложенная в направлении 3.

Исходные данные для расчета: приведенные выше, а также параметры модифицированной матрицы  $E_1^*, E_2^*, E_3^*, G_{12}^*, G_{13}^*, G_{23}^*, v_{12}^*, v_{13}^*, v_{23}^*$ .

Расчетные зависимости для определения упругих характеристик слоя принимают вид:

$$E_1 = \left[ 1 + (n_1^* - 1) \mu_1 \right] E_1^*;$$

$$E_2 = \frac{\left[ 1 + (n_2^* - 1) \mu_1 \right] E_a}{\left[ \mu_1 + n_2^* (1 - \mu_1) \right] \left[ 1 + (n_2^* - 1) \mu_1 \right] - A4};$$

$$A4 = (n_2^* v_{12}^* - v_a)^2 (1 - \mu_1) \mu_1;$$

$$E_3 = \left[ 1 + (n_3^* - 1) \mu_3 \right] E_3^*;$$

$$G_{12} = \frac{m_{12}^* (1 + \mu_1) + 1 - \mu_1}{m_{12}^* (1 - \mu_1) + 1 + \mu_1} G_{12}^*;$$

$$G_{13} = \frac{m_{13}^* (1 + \mu_3) + 1 - \mu_3}{m_{13}^* (1 - \mu_3) + 1 + \mu_3} G_{13}^*;$$

$$G_{23} = \frac{m_{23}^* (1 + \mu_3) + 1 - \mu_3}{m_{23}^* (1 - \mu_3) + 1 + \mu_3} G_{23}^*;$$

$$v_{12} = \frac{v_a \mu_1 + (1 - \mu_1) v_{12}^*}{1 + (n_1^* - 1) \mu_1} \cdot \frac{E_1}{E_1^*};$$

$$v_{13} = \frac{v_a \mu_3 + (1 - \mu_3) v_{13}^*}{1 + (n_3^* - 1) \mu_3} \cdot \frac{E_3}{E_3^*};$$

$$v_{23} = \frac{v_a \mu_3 + (1 - \mu_3) v_{23}^*}{1 + (n_3^* - 1) \mu_3} \cdot \frac{E_3}{E_3^*}.$$

Расчет упругих характеристик пространственно армированного КМ. Расчет компонентов матрицы жесткости ортотропного монослоя

$$S = \frac{1}{E_1 E_2 E_3} \left( 1 + 2 \frac{E_1}{E_3} v_{12} v_{13} v_{23} - A5 \right); \quad (1)$$

$$A5 = \frac{E_1}{E_2} v_{12}^2 + \frac{E_1}{E_3} v_{13}^2 + \frac{E_2}{E_3} v_{23}^2;$$

$$B_{11} = \frac{1}{E_3 S} \left( \frac{1}{E_2} - \frac{v_{23}^2}{E_3} \right); \quad (2)$$

$$B_{22} = \frac{1}{E_3 S} \left( \frac{1}{E_1} - \frac{v_{13}^2}{E_3} \right); \quad (3)$$

$$B_{33} = \frac{1}{E_2 S} \left( \frac{1}{E_1} - \frac{v_{12}^2}{E_2} \right); \quad (4)$$

$$B_{12} = \frac{1}{E_3 S} \left( \frac{v_{13} v_{23}}{E_3} - \frac{v_{12}}{E_2} \right); \quad (5)$$

$$B_{13} = \frac{1}{E_2 S} \left( \frac{v_{12} v_{23}}{E_3} - \frac{v_{13}}{E_3} \right); \quad (6)$$

$$B_{23} = \frac{1}{E_3 S} \left( \frac{v_{12} v_{13}}{E_2} - \frac{v_{23}}{E_1} \right); \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{44} &= G_{23}; & B_{55} &= G_{13}; \\ B_{55} &= G_{13}; & B_{66} &= G_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Расчет компонентов матрицы жесткости КМ, составленного из ортотропных слоев, повернутых вокруг оси 3.

Исходные данные для расчета: компоненты матрицы жесткости монослоя;  $n$  – число слоев в материале;  $\theta_i$  – угол поворота  $i$ -го слоя вокруг оси 3 относительно оси 1;

$$\alpha_{1i} = \cos \theta_i; \quad \alpha_{2i} = \sin \theta_i.$$

Расчетные зависимости имеют вид:

$$B'_{11} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \alpha_{1i}^4 B_{11} + 2 \alpha_{1i}^2 \alpha_{2i}^2 \cdot A5 + \alpha_{2i}^4 B_{22} \right]; \quad (9)$$

$$A5 = (B_{12} + 2B_{66});$$

$$B'_{22} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \alpha_{2i}^4 B_{11} + 2 \alpha_{1i}^2 \alpha_{2i}^2 \cdot A5 + \alpha_{1i}^4 B_{22} \right]; \quad (10)$$

$$B'_{33} = B_{33}; \quad (11)$$

$$B'_{12} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ (\alpha_{1i}^4 + \alpha_{2i}^4) B_{12} + \alpha_{1i}^2 \alpha_{2i}^2 \cdot A6 \right]; \quad (12)$$

$$A6 = (B_{11} + B_{22} - 4B_{66});$$

$$B'_{13} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\alpha_{1i}^2 B_{13} + \alpha_{2i}^2 B_{23}]; \quad (13)$$

$$B'_{23} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\alpha_{2i}^2 B_{13} + \alpha_{1i}^2 B_{23}]; \quad (14)$$

$$B'_{44} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\alpha_{1i}^2 B_{44} + \alpha_{2i}^2 B_{55}]; \quad (15)$$

$$B'_{45} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\alpha_{1i} \alpha_{2i} (B_{44} - B_{55})]; \quad (16)$$

$$B'_{55} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\alpha_{1i}^2 B_{55} + \alpha_{2i}^2 B_{44}]; \quad (17)$$

$$B'_{66} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\alpha_{1i}^2 + \alpha_{2i}^2) B_{66} + \alpha_{1i}^2 \alpha_{2i}^2 \cdot A7]; \quad (18)$$

$$A7 = (B_{11} + B_{22} - 2B_{12});$$

$$B'_{16} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ -\alpha_{1i} \alpha_{2i} [\alpha_{1i}^2 B_{11} - \alpha_{2i}^2 B_{22} - A8] \right\}; \quad (19)$$

$$A8 = (\alpha_{1i}^2 - \alpha_{2i}^2) (B_{12} + 2B_{66});$$

$$B'_{26} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ -\alpha_{1i} \alpha_{2i} [\alpha_{2i}^2 B_{11} - \alpha_{1i}^2 B_{22} + A8] \right\}; \quad (20)$$

$$B'_{36} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\alpha_{1i} \alpha_{2i} (B_{23} - B_{13})]. \quad (21)$$

Анализ свойств материала в разных направлениях. При анализе свойств пространственно армированного КМ в разных направлениях можно использовать расчетные зависимости (1)–(21), варьируя значения угла  $\theta_i$ . Например, для 3-D структуры

$$n = 2, \quad \theta_1 = 0, \quad \theta_2 = 90^\circ.$$

Принимая

$$\theta'_i = \theta_i + k\Delta,$$

где  $\Delta$  – приращение угла  $i$ -го слоя,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , можно получить компоненты матриц жесткостей для семейства координатных систем, вращающихся вокруг оси 3.

При  $\Delta = 5^\circ$  угол поворота первого слоя принимает значения  $\theta'_1 = 0, 5, 10, 15^\circ, \dots$ , угол поворота второго слоя  $\theta'_2 = 90, 95, 100, 105^\circ, \dots$

Для 4-DL структуры  $n = 3$ ,  $\theta_1 = 0$ ,  $\theta_2 = 60^\circ$ ,  $\theta_3 = -60^\circ$ .

Для системы координат, совпадающей с направлениями 1–3 компоненты матрицы жесткости  $B'_{16} = B'_{26} = B'_{36} = B'_{45} = 0$ , т. е. исследуемые материалы являются ортотропными. В остальных системах они анизотропны.

Расчет упругих констант пространственно армированного КМ. Упругие технические характеристики рассчитываются на основе матрицы коэффициентов податливости слоистого композиционного материала, которые получаются путем преобразования коэффициентов матрицы жесткости.

Определение коэффициентов матрицы податливости  $a_{ij}$  производится методом Крамера, путем решения 6 линейных уравнений закона Гука, содержащих коэффициенты жесткости относительно  $\varepsilon_i$  и  $\gamma_{ij}$

$$\begin{cases} \sigma_1 = B'_{11}\varepsilon_1 + B'_{12}\varepsilon_2 + B'_{13}\varepsilon_3 + B'_{16}\gamma_{12}; \\ \sigma_2 = B'_{12}\varepsilon_1 + B'_{22}\varepsilon_2 + B'_{23}\varepsilon_3 + B'_{26}\gamma_{12}; \\ \sigma_3 = B'_{13}\varepsilon_1 + B'_{23}\varepsilon_2 + B'_{33}\varepsilon_3 + B'_{36}\gamma_{12}; \\ \tau_{23} = B'_{44}\gamma_{23} + B'_{45}\gamma_{13}; \\ \tau_{13} = B'_{45}\gamma_{23} + B'_{55}\gamma_{13}; \\ \tau_{12} = B'_{16}\varepsilon_1 + B'_{26}\varepsilon_2 + B'_{36}\varepsilon_3 + B'_{66}\gamma_{12}. \end{cases} \quad (22)$$

Система уравнений (22) распадается на две независимые системы, каждая из которых может быть решена отдельно

$$\begin{cases} \tau_{23} = B'_{44}\gamma_{23} + B'_{45}\gamma_{13}; \\ \tau_{13} = B'_{45}\gamma_{23} + B'_{55}\gamma_{13}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = B'_{11}\varepsilon_1 + B'_{12}\varepsilon_2 + B'_{13}\varepsilon_3 + B'_{16}\gamma_{12}; \\ \sigma_2 = B'_{12}\varepsilon_1 + B'_{22}\varepsilon_2 + B'_{23}\varepsilon_3 + B'_{26}\gamma_{12}; \\ \sigma_3 = B'_{13}\varepsilon_1 + B'_{23}\varepsilon_2 + B'_{33}\varepsilon_3 + B'_{36}\gamma_{12}; \\ \tau_{12} = B'_{16}\varepsilon_1 + B'_{26}\varepsilon_2 + B'_{36}\varepsilon_3 + B'_{66}\gamma_{12}. \end{cases}$$

Значения технических констант, после решения систем уравнений, определяются по известным соотношениям:

$$E_1 = \frac{1}{a_{11}}, \quad E_2 = \frac{1}{a_{22}}, \quad E_3 = \frac{1}{a_{33}};$$

$$G_{12} = \frac{1}{a_{66}}, \quad G_{23} = \frac{1}{a_{44}}, \quad G_{13} = \frac{1}{a_{55}};$$

$$\mu_{12} = a_{12} \cdot E_1, \quad \mu_{23} = a_{23} \cdot E_2, \quad \mu_{13} = a_{13} \cdot E_1;$$

$$\eta_{1,12} = a_{16} \cdot G_{12}, \quad \eta_{2,12} = a_{26} \cdot G_{12}, \quad \eta_{3,12} = a_{36} \cdot G_{12}.$$

Анализ результатов расчета пространственно армированных 3-D и 4-DL структур. На основании результатов расчета основных механических характеристик рассматриваемых структур в зависимости от угла поворота системы координатных осей, в которых эти характеристики определяются, можно ориентировочно оценить погрешность применяемой расчетной модели и сравнить степени изотропии разных схем армирования.

Полная оценка погрешности метода расчета может быть выполнена только при непосредственном испытании материала, однако, некоторую степень погрешности расчета можно выявить при сопоставлении значений характеристик 3-D структуры, полученных по различным зависимостям для разных направлений и углов.

Сопоставление значений модулей упругости  $E_{1-3}$  (рис. 5), которые в направлениях 1–3 должны быть одинаковыми, показывает, что их значения при  $\theta = 0^\circ$  различаются незначительно (на  $\approx 2\%$ ). Значения  $E_3$  не должны зависеть от угла поворота, что и подтверждается расчетом.

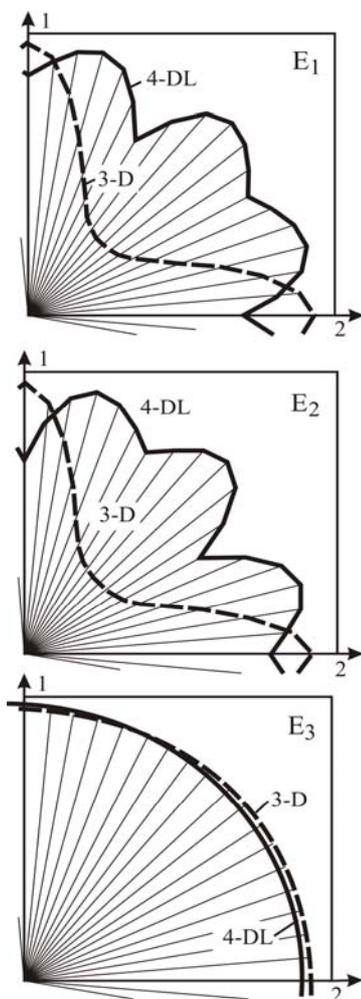


Рис. 5. Характер изменения модуля упругости в зависимости от угла поворота системы координатных осей

Анализ значений модуля сдвига  $G_{12}$  (рис. 6 и 8) в точке  $\theta = 0^\circ$  показывает, что они должны соответствовать и быть равными значениям  $G_{13}$  и  $G_{23}$ , при этом действительная погрешность расчета близка к 3%. Значения  $G_{13}$  и  $G_{23}$  не зависят от изменения угла поворота и имеют равные значения

$$G_{13} = G_{23} = 49,79 \cdot 10^2 \text{ МПа.}$$

Для коэффициента Пуассона  $\nu_{12}$  (рис. 7 и 8) характерна приблизительно такая же зависимость от угла, как и для модуля сдвига  $G_{12}$ , а для коэффициентов  $\nu_{13}$  и  $\nu_{23}$  – такая же, как для модулей упругости  $E_1$  и  $E_2$  (3-D), причем величины погрешностей также сопоставимы.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что определяемые при расчете упругие характеристики пространственно армированного материала – модули упругости, модули сдвига и коэффициенты Пуассона могут быть рассчитаны с погрешностью 5...10%. Причем величина погрешности уменьшается с увеличением абсолютных значений определяемого параметра.

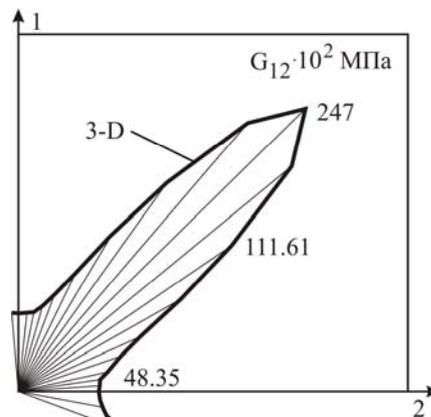


Рис. 6. Изменение модуля сдвига  $G_{12}$

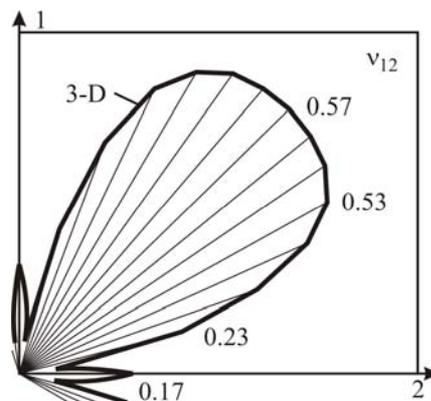


Рис. 7. Изменение коэффициента Пуассона  $\nu_{12}$

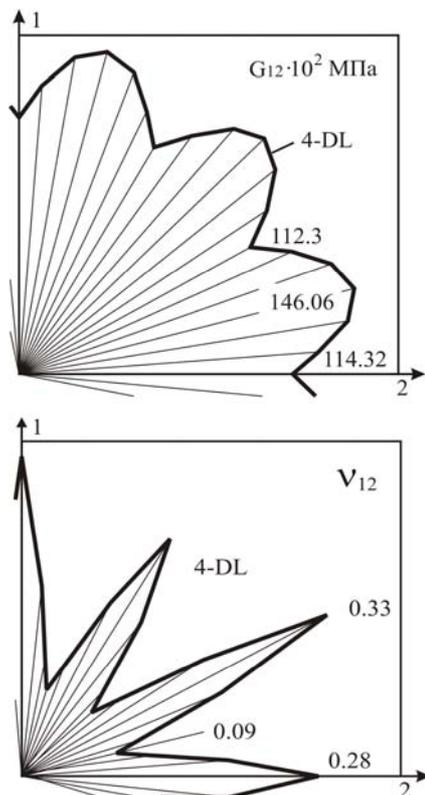


Рис. 8. Изменение модуля сдвига и коэффициента Пуассона

Сравнительная оценка изотропии разных схем армирования. На основании анализа круговых диаграмм, которые получены по приведенным выше зависимостям для модулей упругости  $E_1, E_2, E_3$ , для модулей сдвига  $G_{12}, G_{13}, G_{23}$  и для коэффициентов Пуассона  $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ , удобно определять степень анизотропии рассматриваемых структур пространственно армируемых материалов.

Для 3-D структур степень анизотропии (отношение максимальных значений параметра к минимальным при повороте системы координат) для модулей упругости равна  $n_E = 2,7$ . Для 4-DL структур степень анизотропии модулей упругости  $n_E = 1,4$ . Характер изменения модуля  $E_3$  для 4-DL структуры аналогичен 3-D.

Степень анизотропии модуля сдвига  $G_{12}$  для 3-D структуры составляет  $n_{G_{12}} \approx 5$ , а для  $G_{13}$  и  $G_{23}$   $n_G = 1$ . Для 4-DL структуры степень анизотропии модуля упругости  $G_{12}$  равна  $n_{G_{12}} \approx 1,3$ , а для  $G_{13}$  и  $G_{23}$  также  $n_G = 1$ .

Степень анизотропии коэффициентов Пуассона  $n_{\nu_{12}} = 3,35$  для 3-D структуры и  $n_{\nu_{12}} = 3,67$  для 4-DL структуры. Для  $\nu_{13}$  и  $\nu_{23}$  степень анизотропии варьируется в пределах 2,69...3,67.

### Выводы

Расчеты, проведенные по предлагаемой методике, показали, что степень анизотропии большинства упругих характеристик пространственно армированного материала 4-DL структуры существенно ниже соответствующих характеристик рассчитанных для 3-D структуры, т. е. 4-DL структура является более изотропной и предпочтительной.

Степень достоверности получаемых результатов достаточна для проведения качественной оценки упругих характеристик и технических констант вновь создаваемых пространственно армированных композиционных материалов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Berg J. Tests of brake overlays from composite materials / J. Berg, A. Kalinkowski // *Glaser's Annalen*. – 1984. – № 10, – P. 279–285.
2. Bauer H. Frictional materials for brakes. *Glaser's Annalen*, – 1999. – № 11/12, – P. 472–475.
3. Zander C. P. Ceramic-metal braking clamps on thick locomotives. *Glaser's Annalen*. – 2001. – № 4. – P. 157–165.
4. Ehlers H. R. et. al. Potential and limits of opportunities of the block brake. *Glaser's Annalen*. – 2002. – № 6/7, – P. 290–300.
5. Налев И. А. Опыт разработки и производства железнодорожных композиционных тормозных колодок в ОАО «ФРИТЕКС» / И. А. Налев, Д. А. Дружнов, Н. А. Страхов // *Вестник ВНИИЖТ*. – 2002. – № 4.
6. Старченко В. Н. Повышение эффективности торможения использованием новых углерод-композиционных материалов / В. Н. Старченко, Е. В. Полупан, С. И. Шевченко // *Вісник СНУ ім. В. Даля*. – 2004. – № 7(77). – С. 137–142.
7. Старченко В. М. Випробування нових фрикційних матеріалів для гальмування транспортних засобів / В. М. Старченко, В. М. Поляков. – *Вісник Нац. трансп. ун-ту*. – К.: НТУ, 2004. – Вип. 9. – С. 283–287.

Поступила в редколлегию 26.10.2005.