

УДК 624.011.15, 691.537

СТРОИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНОПОЛИМЕРКОМПОЗИТЫ (ОПК) НА ОСНОВЕ СЛОЖНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ МЕСТНОГО СЫРЬЯ

В.М. Курдюмова, У.Ш. Азығалиев, Л.В. Ильченко

Рассмотрена полидисперсная структура ОПК и приведены экспериментальные значения упругих постоянных композита.

Ключевые слова: органополимеркомпозиты; полидисперсная структура; упругие постоянные.

THE BUILDING ORGANOPOLYMERCOMPOSITES (OPK) BASED ON THE COMPLEX FILLER FROM LOCAL RAW MATERIAL

V.M. Kurdyumova, U.Sh. Azygaliev, L.V. Ilchenko

The paper considers the polydispersed structure of OPK and experimental values of the composite elastic constants are given.

Keywords: organopolymercomposites; polydispersed structure; elastic constant.

В целом полидисперсная структура композита представляет собой анизотропное образование из растительных частиц – армополимер [1], подчиняющийся трем основным законам композитов: прочности, створа и конгруэнции. С общей теорией прочности полимерных композитов связана также теория упругости.

Основной отличительной особенностью полимеркомпозитов из растительного сырья для строительства является их большеформатность ($3000 \times 1000 \times 20-60$ мм), высокая прочность при относительно малом весе. Механические свойства новых композитов по сравнению с древесностружечными плитами, фанерой и др. – ранее не описаны. Наша задача – получить значения упругих постоянных композиционных материалов с учетом структурно-механических свойств сложного наполнителя.

К частицам наполнителя малых размеров, как и к древесине, применима ортогональная схема анизотропии. На рисунках 1 и 2 показаны главные оси упругой симметрии. Это – оси "a" (1) – осевое направление, радиальное "r" (2) и тангенциальное "t" (ось 3).

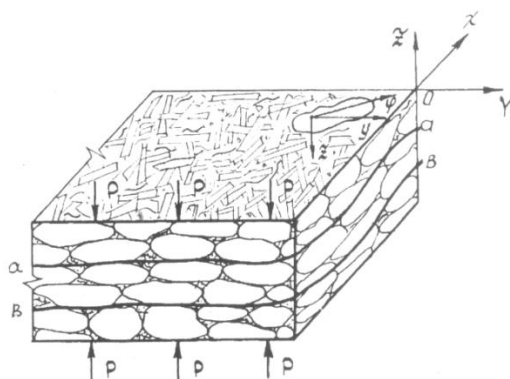


Рисунок 1 – Структурная модель полимеркомпозита:
а-а, в-в – плоскость разрушения по контактам частиц

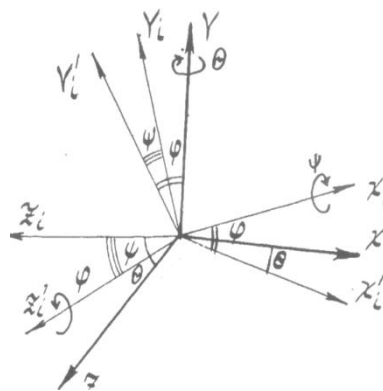


Рисунок 2 – Схема перехода от фиксированных
к подвижным осям координат

При силовых воздействиях в направлениях главных осей упругой симметрии a, r, t , связь между упругими деформациями и напряжениями записывают в виде закона Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11} \cdot \sigma_x + a_{12} \cdot \sigma_y + a_{13} \cdot \sigma_z; \quad \gamma_{zy} = a_{44} \cdot \tau_{zy}; \quad \varepsilon_y = a_{21} \cdot \sigma_x + a_{22} \cdot \sigma_y + a_{23} \cdot \sigma_z; \quad \gamma_{zx} = a_{55} \cdot \tau_{zx}; \\ \varepsilon_z &= a_{31} \cdot \sigma_x + a_{32} \cdot \sigma_y + a_{33} \cdot \sigma_z; \quad \gamma_{xy} = a_{66} \cdot \tau_{xy}. \end{aligned} \quad (1)$$

Эти же зависимости приемлемы и для частиц сложного наполнителя из растительного сырья. В уравнениях (1) $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{zx}, \gamma_{zy}$ – компоненты деформаций в направлениях главных осей упругой симметрии, с которыми совмещены оси напряжения x, y, z ; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ – компоненты напряжений в направлении этих осей; a_{ik} – физические упругие постоянные (коэффициент деформации) частиц в главном направлении симметрии. Полагается, что симметричные упругие постоянные равны между собой, т. е. $a_{ik} = a_{ki}$. Коэффициенты деформаций связаны с техническими упругими постоянными зависимостями:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{E_{11}} = \frac{1}{E_a}; \quad a_{22} = \frac{1}{E_{22}} = \frac{1}{E_r}; \quad a_{33} = \frac{1}{E_{33}} = \frac{1}{E_t}; \quad a_{12} = a_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} = -\frac{\nu_{ar}}{E_a} = -\frac{\nu_{ra}}{E_r}; \\ a_{23} &= a_{32} = -\frac{\nu_{32}}{E_{22}} = -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} = -\frac{\nu_{rt}}{E_r} = -\frac{\nu_{t2}}{E_t}; \quad a_{13} = a_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} = -\frac{\nu_{at}}{E_a} = -\frac{\nu_{ta}}{E_r}; \\ a_{44} &= \frac{1}{G_{23}} = \frac{1}{G_{rt}}; \quad a_{55} = \frac{1}{G_{13}} = \frac{1}{G_{at}}; \quad a_{66} = \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{ar}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $E_{11} = E_a; E_{22} = E_r; E_{33} = E_t$ – модули продольной упругости в направлении главных осей симметрии; $\nu_{12} = \nu_{ar}, \nu_{21} = \nu_{ra}, \nu_{23} = \nu_{rt}, \nu_{32} = \nu_{tr}, \nu_{13} = \nu_{at}, \nu_{31} = \nu_{ta}$ – коэффициенты Пуассона, характеризующие поперечную деформацию в направлении оси, соответствующей первому индексу, от усилия, действующего в направлении оси, соответствующей второму индексу; $G_{23} = G_{rt}, G_{13} = G_{at}, G_{12} = G_{ar}$ – модули сдвига в плоскостях, соответствующих индексам.

Аналогично зависимости могут быть записаны и в выражении напряжений через деформации.

При силовых воздействиях в направлении осей упругой симметрии материала эти зависимости примут вид:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{13}\varepsilon_z; \quad \tau_{zy} = A_{44} \cdot \gamma_{zy}; \quad \sigma_y = A_{21}\varepsilon_x + A_{22}\varepsilon_y + A_{23}\varepsilon_z; \quad \tau_{zx} = A_{55} \cdot \gamma_{zx}; \\ \sigma_z &= A_{31}\varepsilon_x + A_{32}\varepsilon_y + A_{33}\varepsilon_z; \quad \tau_{xy} = A_{66} \cdot \gamma_{xy}. \end{aligned} \quad (3)$$

Между модулями упругости и коэффициентами деформации существует связь. Эти величины являются элементами взаимобратных матриц: матрицы упругости и матрицы податливости. Так как симметричные члены в выражениях законов Гука равны между собой, то эти матрицы симметричны относительно главной диагонали. При этом связь между модулями упругости и коэффициентами деформаций выразится как:

$$a_{ik} = \frac{\Delta_{ik}}{\Delta}, \quad (4)$$

где Δ – определитель, составленный из модулей упругости A_{ik} , являющихся коэффициентами уравнений (4); Δ_{ik} – алгебраическое дополнение элемента A_{ik} этого определителя. Аналогично записывается и обратный переход от коэффициентов деформации к модулям упругости.

Таким образом, независимо от направления воздействия на элемент анизотропной частицы ее упругие свойства характеризуются девятью упругими постоянными. Элементарные нити лубяных волокон растительного сырья размещены равномерно по всему объему полимеркомпозита. Структура материала регулярна и его компоненты деформируются линейно.

В таблице 1 приведены сравнительные значения технических постоянных в главных направлениях упругой симметрии для сосны, стеблей хлопчатника, стеблей табака, используемых при изготовлении органополимеркомпозитов. Значения для сосны принимают по Р.М. Кристенсену. Значения для стеблей хлопчатника, табака определены теоретически и проверены экспериментально [1, 2].

Для изготовления органополимеркомпозитов в качестве связующего применяли синтетические нетоксичные полимеризоцианатные смолы PMDI. Затвердевшая смола представляет сплошную решетчатую структуру, образованную разветвленными молекулами. Такое образование обладает в макрообъеме изотропией свойств.

Таблица 1 – Значения технических упругих постоянных частиц в главных направлениях упругой симметрии a, r, t

Упругие постоянные	Обозначение	Вид сырья		
		сосна	стебли хлопчатника	стебли табака
Модуль упругости, МПа	$E_{11} = E_a$	11700	11200	5150
	$E_{22} = E_r$	620	610	414
	$E_{33} = E_t$	500	361	211
Модуль сдвига, МПа	$G_{23} = G_{rt}$	67	65	37
	$G_{13} = G_{at}$	690	670	408
	$G_{12} = G_{ar}$	1180	1130	615
Коэффициент Пуассона	ν_{tr}	0,31	0,33	0,41
	ν_{rt}	0,68	0,55	0,80
	ν_{at}	0,51	0,77	0,63
	ν_{ta}	0,015	0,025	0,026
	ν_{ra}	0,038	0,027	0,047
	ν_{ar}	0,42	0,50	0,58

Упругие деформации описываются законами Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_c} [\sigma_x - \nu_c (\sigma_y + \sigma_z)]; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_c}; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E_c} [\sigma_y - \nu_c (\sigma_x + \sigma_z)]; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G_c}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_c} [\sigma_z - \nu_c (\sigma_x + \sigma_y)]; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_c}, \end{aligned} \quad (5)$$

где E_c , ν_c и G_c – модуль упругости, коэффициент Пуассона и модуль сдвига смолы. Из этих упругих постоянных независимы только две, и они связаны между собой условием изотропии:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1 + \nu_c)}. \quad (6)$$

Зависимости (5) выражают деформации связующего через напряжения. Можно привести зависимость законов Гука, выражающую напряжения в связующем через деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\lambda_c + 2\mu_c)\varepsilon_x + \lambda_c(\varepsilon_y + \varepsilon_z); \quad \tau_{zy} = \mu_c \cdot \gamma_{zy}; \quad \sigma_y = (\lambda_c + 2\mu_c)\varepsilon_y + \lambda_c(\varepsilon_x + \varepsilon_z); \quad \tau_{zx} = \mu_c \cdot \gamma_{zx}; \\ \sigma_z &= (\lambda_c + 2\mu_c)\varepsilon_z + \lambda_c(\varepsilon_x + \varepsilon_y); \quad \tau_{xy} = \mu_c \cdot \gamma_{xy}, \end{aligned} \quad (7)$$

где λ_c , μ_c – постоянные Ляме связующего. Через технические упругие постоянные связующего они выражаются зависимостями:

$$\lambda_c = \frac{E_c \nu_c}{(1 + \nu_c)(1 - 2\nu_c)}; \quad \mu_c = \frac{E_c}{2(1 + \nu_c)}. \quad (8)$$

Рассматриваем застеклованное состояние полимера, когда его деформации с достаточным приближением могут считаться упругими.

Органополимеркомпозиты, армированные дискретными частицами, образованы текстурой из частиц наполнителя, скрепленного полимерным связующим. Связующее выполняет роль полимерной матрицы, в которой заключен механический каркас материала – текстура частиц наполнителя. Во всех древесных композитах частицы расположены не полностью хаотически. В каждом виде этого материала наблюдается их некоторая ориентация. Поэтому в целом текстура представляет собой некоторое анизотропное образование. Вид ее анизотропии определяется степенью ориентации частиц.

Для вычисления осредненных упругих постоянных текстуры частиц наполнителя целесообразно воспользоваться методами осреднения упругих свойств поликристаллических образований.

В числе первых гипотез, положенных в основу метода осреднения упругих свойств поликристаллов, были гипотезы Фойгта, Рейсса, Бригмана, Шмида, Хилла.

В основу осреднения упругих свойств положено равенство компонентов тензора деформаций частицы и текстуры в каждой точке. Если σ_{jk} – осредненные компоненты тензора напряжений для конгломерата относительно фиксированных осей O_{xyz} , а ε_{jk} – осредненные компоненты тензора деформаций для конгломерата относительно фиксированных осей, тогда на основании гипотезы Фойгта можно записать:

$$\varepsilon_{jk} = \varepsilon_{jk}^i \quad (9)$$

При этом связь между напряжениями и деформациями для конгломерата запишется в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \bar{A}_{11}\varepsilon_x + \bar{A}_{12}\varepsilon_y + \bar{A}_{13}\varepsilon_z; \quad \tau_{zy} = \bar{A}_{44} \cdot j_{zy}; \quad \sigma_y = \bar{A}_{21}\varepsilon_x + \bar{A}_{22}\varepsilon_y + \bar{A}_{23}\varepsilon_z; \quad \tau_{zx} = \bar{A}_{55} \cdot j_{zx}; \\ \sigma_z &= \bar{A}_{31}\varepsilon_x + \bar{A}_{32}\varepsilon_y + \bar{A}_{33}\varepsilon_z; \quad \tau_{xy} = \bar{A}_{66} \cdot j_{xy}. \end{aligned} \quad (10)$$

В этих выражениях \bar{A}_{jk} – осредненные физические модули упругости. Полагая распределение частиц наполнителя в пределах некоторых углов равномерным, осреднением значения физических модулей упругости определяются как математические ожидания величины:

$$\bar{A}_{jk} = \langle A_{jk}^i \rangle = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} A_{jk}^i \cdot \alpha_\varphi \cdot \alpha_\psi, \quad (11)$$

где под A_{jk}^i понимаются коэффициенты пропорциональности между напряжениями σ_{jk}^i и соответствующими деформациями:

$$A_{jk}^i = A_{kmn} \cdot l_{jn}^2 \cdot l_{km}^2 \quad (12)$$

Из (12) видно, что коэффициенты пропорциональности являются функциями четвертой степени направляющих косинусов. Под величинами φ, ψ, θ понимаются углы разброса частиц (рисунок 2). При рассматриваемом расположении частицы $\theta = 0$ для всех стружек в плоскости плиты частицы имеют полный разброс $\varphi \in [-\pi/2; \pi/2]$; полный разброс возможен и для поворотов вокруг их осей.

Для перехода от физических модулей упругости к техническим постоянным конгломерата частиц, воспользуемся зависимостями (2) и (4). С помощью (4) определяются осредненные значения коэффициентов податливости:

$$\bar{a}_{jk} = \bar{\Delta}_{jk} / \bar{\Delta} \quad (13)$$

В этом случае определитель осредненных физических модулей упругости примет вид:

$$\bar{\Delta} = \begin{vmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} & \bar{A}_{13} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} & \bar{A}_{23} \\ \bar{A}_{31} & \bar{A}_{32} & \bar{A}_{33} \end{vmatrix} \quad (14)$$

По осредненным значениям коэффициентов податливости могут быть вычислены технические упругие постоянные в соответствии с зависимостями. Предполагается, что напряженное состояние частицы в каждой точке такое же, как и напряженное состояние конгломерата, т. е.

$$\sigma_{jk}^i = \sigma_{jk} \quad (15)$$

При этом деформации конгломерата связаны с напряженными зависимостями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \bar{a}_{11} \cdot \sigma_x + \bar{a}_{12} \cdot \sigma_y + \bar{a}_{13} \cdot \sigma_z; \quad \gamma_{zy} = \bar{a}_{44} \cdot \tau_{zy}; \quad \varepsilon_y = \bar{a}_{21} \cdot \sigma_x + \bar{a}_{22} \cdot \sigma_y + \bar{a}_{23} \cdot \sigma_z; \quad \gamma_{zx} = \bar{a}_{55} \cdot \tau_{zx}; \\ \varepsilon_z &= \bar{a}_{31} \cdot \sigma_x + \bar{a}_{32} \cdot \sigma_y + \bar{a}_{33} \cdot \sigma_z; \quad \gamma_{xy} = \bar{a}_{66} \cdot \tau_{xy}, \end{aligned} \quad (16)$$

где \bar{a}_{jk} – осредненные коэффициенты податливости; эти величины определяются, полагая разброс частиц равномерным, как математические ожидания:

$$\bar{a}_{jk} = \langle a_{jk}^i \rangle = -\frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} a_{jk}^i \cdot d_\varphi \cdot d_\psi \quad (17)$$

В этих формулах под a_{jk}^i понимаются коэффициенты пропорциональности между деформациями ε_{jk}^i и соответствующими напряжениями в выражениях:

$$a_{jk}^i = a_{jkm} \cdot l_{in}^2 \cdot l_{km}^2. \quad (18)$$

Проинтегрировав (12) в соответствии с (11), получим следующие значения физических модулей упругости текстуры частиц:

$$\begin{aligned} \bar{A}_{11} = \bar{A}_{22} &= \frac{3}{8} \left\{ A_{11} + \frac{3}{8} (A_{22} + A_{33}) + \frac{1}{3} [A_{12} + A_{13} + 2(A_{22} + A_{66})] + \frac{1}{4} (A_{23} + 2A_{44}) \right\}; \\ \bar{A}_{33} &= \frac{3}{8} \left[A_{22} + A_{33} + \frac{2}{3} (A_{23} + A_{44}) \right]; \quad \bar{A}_{12} = \frac{3}{8} \left[\frac{A_{11}}{3} + \frac{A_{22} + A_{33}}{8} + A_{12} + A_{13} + \frac{2A_{44} + A_{23}}{12} - \frac{2}{5} (A_{55} + A_{66}) \right]; \\ \bar{A}_{43} = \bar{A}_{23} &= \frac{1}{4} \left[\frac{A_{22} + A_{33}}{4} + A_{42} + A_{13} - A_{44} + \frac{3}{2} A_{23} \right]; \\ \bar{A}_{66} &= \frac{1}{8} \left[A_{11} - A_{12} - A_{13} + 3 \frac{A_{22} + A_{33}}{8} + \frac{A_{23} + 2A_{44}}{4} + 2(A_{55} + A_{66}) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Подставив в формулы (19) значения физических модулей упругости A_{jk} , получим величины осредненных элементов матрицы упругости текстуры органополимеркомпозиата с хаотическим расположением частиц. Обратив матрицу упругости текстуры частиц, получим значения ее коэффициентов деформаций (элементов матрицы податливости).

По значениям коэффициентов деформаций вычислены механические упругие постоянные текстуры частиц композиционной плиты с хаотическим расположением частиц (таблица 2).

Полимеркомпозиаты с хаотическим расположением растительных частиц являются квазитранспортным образованием. Упругие свойства их текстуры характеризуются шестью упругими постоянными, что характерно для трансверсально-изотропных структур. При этом должно выполняться условие изотропии:

$$G_{12}^r = \frac{E_{11}^r}{2(1-\nu_{12}^r)}. \quad (20)$$

Следует отметить, что условие изотропии соблюдается только для величин, вычисленных в результате осреднений по Фойгту. Объясняется это тем, что при этом виде осреднения выполняются условия совместности деформаций.

Таблица 2 – Значения осредненных технических упругих постоянных текстуры частиц органополимеркомпозиата из растительного сырья с хаотическим расположением частиц

Вид сырья	$E_{11}=E_{22}$, МПа	E_{33} , МПа	ν_{12}	$\nu_{13}=\nu_{23}$	$\nu_{31}=\nu_{32}$	$G_{13}=G_{23}$, МПа	G_{12} , МПа
Сосна	2789	624	0,233	0,496	0,064	532	1948
Стебли хлопчатника	1667	588	0,167	0,884	0,153	510	533
Стебли табака	1429	250	0,157	0,643	0,113	283	696

Таким образом, для вычисления упругих постоянных материала с учетом жесткости связующего, расчетную схему элементарного объема представляем как некоторую сложную конструкцию с чередующимися слоями частиц наполнителя и полимерного связующего (рисунок 1). Слои частиц наполнителя являются квази-транстропными текстурами, а слои связующего – изотропными. Нами рассмотрена совместность деформации отдельных слоев элементарного объема при простейших видах напряженного состояния.

Литература

1. Курдюмова В.М. Особенности получения органополимеркомпозиатов (ОПК) из местного сырья Кыргызской Республики / В.М. Курдюмова, У.Ш. Азығалиев, Л.В. Ильченко // Матер. межд. НПК, посв. 60-летию Р.С. Картанбаева (2–3 марта 2016 г., Бишкек) // Вестник КГУСТА. Бишкек, 2016. № 1 (51). С. 234–238.
2. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов в строительстве / В.И. Соломатов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. М., 1990. № 8. С. 58–64.