

ТКАНЕВЫЙ КОМПОЗИТ. ОЦЕНКА УПРУГОДИССИПАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.О. Щербакова¹

Предложена математическая модель тканевого композита, позволяющая оценить его упругодиссипативные характеристики с использованием упругодиссипативных характеристик однонаправленного композита с теми же структурными компонентами (волокнами и матрицей) при той же объемной доле волокон. Согласно разработанной модели, представительный элемент тканевого композита рассматривается в виде последовательного и параллельного соединения ячеек, содержащих однонаправленный композит с различными направлениями укладки волокон. Кроме того, модель учитывает тип переплетения нитей в композите (рассмотрено полотняное переплетение, саржевое и сатиновое).

Ключевые слова: тканевый композит, характеристики упругости, коэффициент диссипации, полотняное переплетение, саржа, сатин.

Введение

В настоящее время тканевые композиты широко используются в различных областях промышленности: из них изготавливают панели вагонов транспортных средств, элементы крыльев и фюзеляжа летательных аппаратов, емкости для транспортировки агрессивных сред, лопасти ветроэнергетических установок, вертолетов и т.д. [1, 2]. Подобная популярность тканевых композитов объясняется благоприятным сочетанием высоких характеристик жесткости и прочности вдоль волокон при относительно низкой трудоемкости их изготовления по сравнению с однонаправленными материалами.

Одной из важных задач на стадии разработки проекта конструкции является оценка эксплуатационных характеристик материала, что приводит к необходимости математического моделирования его свойств. Определению характеристик упругости тканевых композитов посвящены работы А.М. Скудры и Ф.Я. Булавса [3, 4], где материал рассматривается в виде двух условных монослоев основы и утка, однонаправлено армированных искривленными волокнами, а искривление волокон учитывается чередованием наклонно и продольно армированных полос. В настоящее время тканевые композиты, как правило, моделируют с использованием пакетов прикладных программ, основанных на использовании метода конечных элементов, таких как ANSYS, ABACUS, LS DYNA, NASTRAN и т.д. [5–9]. Однако возможности разработчиков подобных моделей ограничиваются сложностью структуры материала, так как тканевый композит состоит из матрицы и армирующей ткани, состоящей из нитей, которые в свою очередь состоят из волокон. Кроме того, иногда в расчеты включают интерфейсный слой между волокнами и матрицей. Подобное разнообразие неоднородностей ведет к необходимости ограничиваться одним из уровней детализации композита: макроуровнем, мезоуровнем, микроуровнем и т.д. На макроуровне тканевый композит рассматривают как однородный ортотропный материал. На мезоуровне – как неоднородную среду, состоящую из матрицы (связующего) и нитей, свойства которых обычно усредняют по правилу смесей [1–4], либо пренебрегают наличием матрицы в композите, оставляя при этом только волокна. На микроуровне приходится учитывать неоднородность нитей, состоящих, в свою очередь, из волокон и матрицы.

В данной работе предложена численная модель тканевого композита, где упругодиссипативные свойства материала определяются соответствующими свойствами однонаправленного композита с теми же структурными компонентами и объемной долей волокон (мезоуровень). Предложенная модель позволяет учесть тип переплетения нитей (полотно, саржа, сатин и др.).

¹ Щербакова Алла Олеговна – кандидат технических наук, доцент, кафедра Прикладная механика, динамика и прочность машин, Южно-Уральский государственный университет.
E-mail: AllaScherbakova@list.ru

Основные соотношения расчетной модели

Согласно разработанной модели, тканевый композит схематизирован, как показано на рис.1 (в качестве примера рассмотрена ткань полотняного переплетения). В основе предложенной модели лежат следующие допущения:

1. Изогнутые участки нитей (волокон) заменены прямолинейными участками.
2. Структура материала регулярна, что позволяет ограничиться рассмотрением одного представительного элемента объема (жирные прямоугольники на рис. 1).
3. Представительный элемент объема - это набор ячеек, соединенных в цепь последовательно либо параллельно.
4. Каждая ячейка содержит однонаправленный композит с различной ориентацией волокон и с теми же структурными компонентами, что и тканевый композит.
5. Тип переплетения нитей (полотно, саржа, сатин) определяет только длину kl прямолинейных участков нитей, заданную с помощью коэффициента длины k , и не влияет на угол θ наклонных участков нитей.
6. Волокна распределены по объему ячеек равномерно с одинаковым объемным содержанием.
7. Материал ячеек является сплошным, однородным, ортотропным и линейно упругим.
8. Напряженно-деформированное состояние ячеек однородно, то есть в процессе деформирования ячейки не искривляются, а нити (волокна) в ячейках остаются прямыми.
9. Рассмотрено плоское напряженное состояние ячеек.
10. Потери энергии в единице объема материала определяются суммой потерь энергии в каждой ячейке.
11. Отношение длин участков нити друг к другу определяется коэффициентом длины k (коэффициент k , равный единице, соответствует полотняному переплетению нитей, двум – саржевому переплетению, а восьми – сатиновому).

В основе предложенного метода лежит теория слоистых пластин [1–4, 10], согласно которой матрицы тензоров напряжений $[\sigma]$, деформаций $[\varepsilon]$ и податливости $[S]$ имеют следующий вид:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \tau_{LT} \\ \sigma_T \end{bmatrix}, \quad [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \gamma_{LT} \\ \varepsilon_T \end{bmatrix}, \quad [S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & 0 & -\frac{\mu_{LT}}{E_L} \\ 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ -\frac{\mu_{LT}}{E_L} & 0 & \frac{1}{E_T} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь координата σ представляет нормальное напряжение в плоскости ортотропии, τ – касательное напряжение, ε – линейную деформацию, γ – модуль сдвига, E – модуль упругости, G – модуль сдвига, а μ – коэффициент Пуассона. Индекс «L» соответствует направлению вдоль волокон однонаправленного композита, «T» – поперек волокон, а индекс «LT» обозначает сдвиговое направление.

Удельная энергия диссипации ΔW однонаправленного линейно упругого композита определяется выражением

$$\Delta W = \frac{1}{2} [\sigma]^T [\Psi] [\sigma], \quad (2)$$

где $[\Psi]$ – это матрица упругодиссипативных характеристик (УДХ) по напряжениям:

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \frac{\psi_L}{E_L} & 0 & -\frac{\mu_{LT}\psi_L}{E_L} \\ 0 & \frac{\psi_{LT}}{G_{LT}} & 0 \\ -\frac{\mu_{LT}\psi_L}{E_L} & 0 & \frac{\psi_T}{E_T} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь ψ_L – представляет коэффициент диссипации однонаправленного композита вдоль волокон, ψ_T – коэффициент диссипации поперек волокон, а ψ_{LT} – сдвиговой коэффициент диссипации.

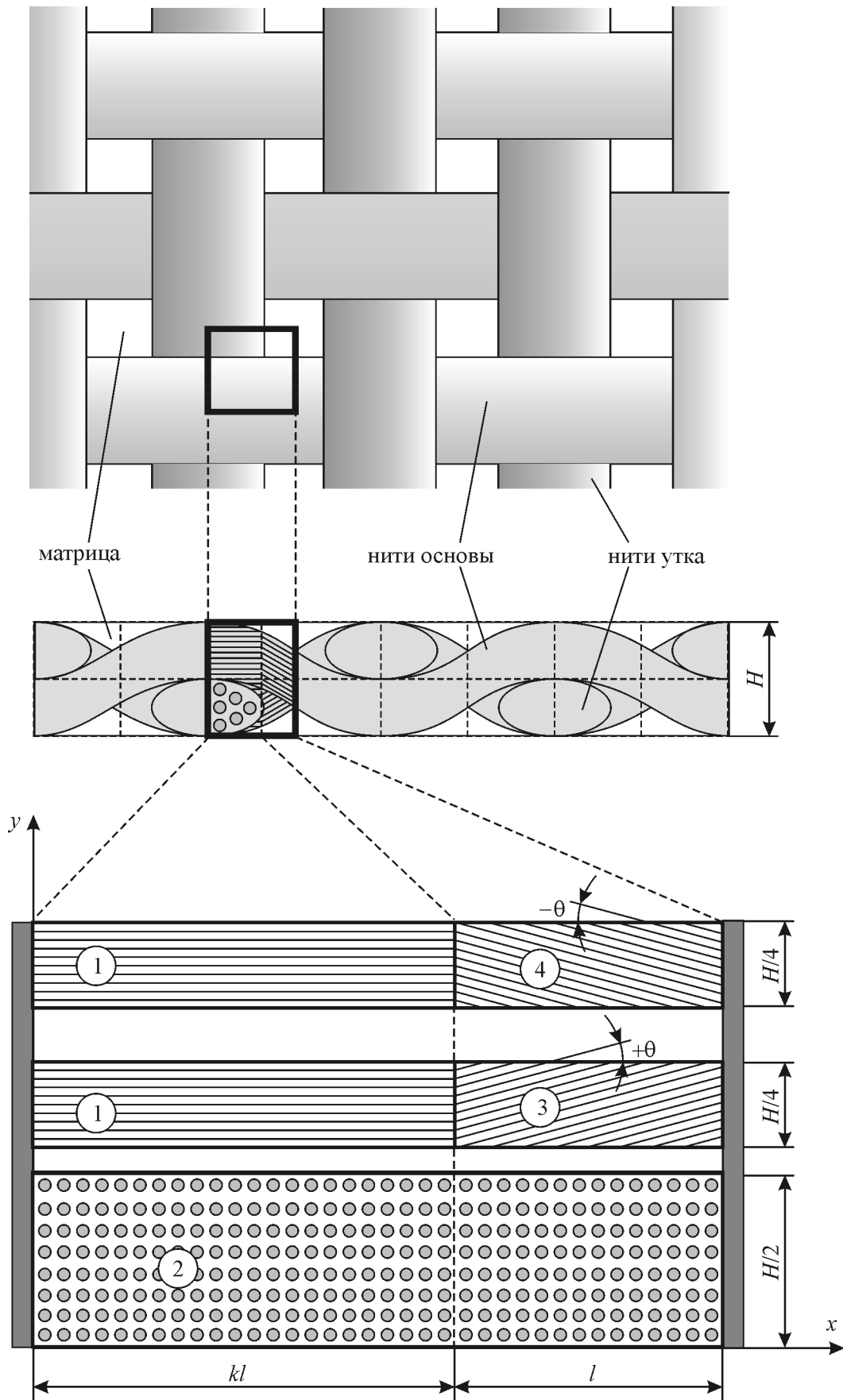


Рис.1. Схематизация тканевого композита

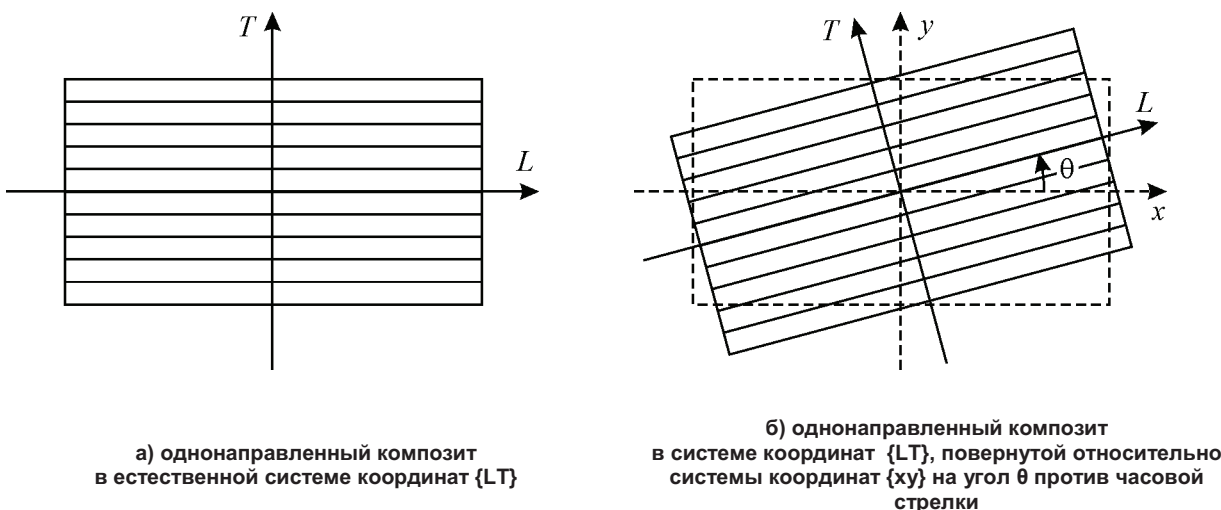


Рис. 2. Схема поворота осей координат монослоя

Для определения матриц УДХ и податливости однонаправленного композита в системе координат $\{xy\}$ (рис. 2, б) достаточно заменить матрицу напряжений в формуле (2) следующим выражением:

$$[\sigma] = [R][\sigma^{\{LT\}}], \quad (4)$$

где матрица $[\sigma^{\{LT\}}]$ – это матрица тензора напряжений однонаправленного композита в естественной системе координат $\{LT\}$, а матрица $[R]$ – это матрица поворота на угол θ по часовой стрелке

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

При этом матрицы податливости и УДХ в системе координат $\{xy\}$ принимают вид:

$$[S^\theta] = [R][S^{\{LT\}}][R]^T, \quad [\Psi^\theta] = [R][\Psi^{\{LT\}}][R]^T, \quad (6)$$

а характеристики упругости и диссипации определяются следующими выражениями:

$$E_x^\theta = \frac{1}{S_{11}^\theta}, \quad E_y^\theta = \frac{1}{S_{33}^\theta}, \quad G_{xy}^\theta = \frac{1}{S_{12}^\theta}, \quad \mu_{xy}^\theta = -\frac{S_{13}^\theta}{S_{11}^\theta}, \quad (7)$$

$$\psi_x^\theta = \Psi_{11}^\theta E_x^\theta, \quad \psi_y^\theta = \Psi_{33}^\theta E_y^\theta, \quad \psi_{xy}^\theta = \Psi_{12}^\theta G_{xy}^\theta.$$

Для вывода выражений, определяющих характеристики упругости пластика, армированного тканью, полагали, что при деформировании материала в направлении оси x ячейки № 1 и № 3 (а также № 1 и № 4) соединены друг с другом последовательно, а блоки ячеек № 1 и № 3, № 1 и № 4 и № 2 работают параллельно, как показано на рис. 1. При деформировании материала в направлении оси y , а также в сдвиговом направлении полагали, что все ячейки работают параллельно. В результате были получены следующие выражения для определения модулей упругости E_x и E_y , модуля межслойного сдвига G_{xy} , а также коэффициентов Пуассона μ_{xy} и μ_{yx} :

$$E_x = \frac{(k+1)E_L E_x^\theta}{2(E_L + kE_x^\theta)} + \frac{E_T}{2}, \quad E_y = \frac{(2k+1)E_T + E_y^\theta}{2(k+1)}, \quad (8)$$

$$G_{xy} = \frac{k(G_{LT} + G_{TT}) + G_{xy}^\theta + G_{TT}}{2(k+1)}, \quad \mu_{xy} = \frac{(k+1)\mu_{LT}\mu_{xy}^\theta}{2(\mu_{LT} + k\mu_{xy}^\theta)} + \frac{\mu_{TT}}{2}, \quad \mu_{yx} = \frac{E_y}{E_x} \mu_{yx}.$$

Здесь G_{TT} – это модуль сдвига ячеек № 2 в плоскости $\{xy\}$, а μ_{TT} – соответствующий коэффициент Пуассона.

Механика

Коэффициенты диссипации материала ψ_x , ψ_y и ψ_{xy} в системе координат $\{xy\}$ определяются путем подстановки в выражения (8) модулей упругости, отнесенных к соответствующим коэффициентам диссипации:

$$\psi_x = E_x \left[\frac{(k+1)E_L E_x^\theta \psi_L \psi_x^\theta}{2\psi_L \psi_x^\theta [E_L \psi_x^\theta + kE_x^\theta \psi_L]} + \frac{E_T}{2\psi_T} \right]^{-1}, \quad \psi_y = E_y \left[\frac{2k+1}{2(k+1)} \frac{E_T}{\psi_T} + \frac{1}{2(k+1)} \frac{E_y^\theta}{\psi_y^\theta} \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$\psi_{xy} = G_{xy} \left[\frac{k}{2(k+1)} \left(\frac{G_{LT}}{\psi_{LT}} + \frac{G_{TT}}{\psi_{TT}} \right) + \frac{1}{2(k+1)} \frac{G_{xy}^\theta}{\psi_{xy}^\theta} + \frac{1}{2(k+1)} \frac{G_{TT}}{\psi_{TT}} \right]^{-1}.$$

Здесь ψ_{TT} – это сдвиговый коэффициент диссипации ячеек № 2 в плоскости $\{xy\}$.

Обсуждение результатов

В работе были вычислены зависимости УДХ тканевых композитов в зависимости от коэффициента длины нитей. В качестве исходных данных для расчетов использовали характеристики однонаправленного стеклопластика GLASS/DX210, взятые из работы [11] и приведенные в табл. 1. Модуль сдвига G_{TT} определили с учетом квазиизотропии материала ячеек № 2 в плоскости $\{xy\}$, приняв коэффициент Пуассона μ_{TT} равным μ_{LT} , а сдвиговый коэффициент диссипации ψ_{TT} приняв равным ψ_T . Угол θ определили с использованием микрофотографий срезов тканевого композита, взятых из работы [12], он составил примерно 25° . При схематизации материала полагали, что тип переплетения нитей влияет только на величину коэффициента длины, тогда как угол θ от него не зависит, а число нитей основы и утка совпадает.

Таблица 1

УДХ однонаправленного стеклопластика GLASS/DX210

Наименование параметра	Модули упругости		Модули сдвига		Коэффициенты Пуассона		Коэффициенты диссипации				
	Обозначение	E_L , ГПа	E_T , ГПа	G_{LT} , ГПа	G_{TT} , ГПа	μ_{LT}	μ_{TT}	ψ_L , %	ψ_T , %	ψ_{LT} , %	ψ_{TT} , %
Величина		37,8	10,1	4,9	4,0	0,29	0,29	0,87	6,1	6,9	6,1

Таблица 2

УДХ тканевых стеклопластиков

Тип переплетения нитей	Модули упругости		Модуль сдвига	Коэффициент Пуассона	Коэффициенты диссипации		
	продольный	поперечный			продольный	поперечный	сдвиговый
	E_x , ГПа	E_y , ГПа	G_{xy} , ГПа	μ_{xy}	ψ_x , %	ψ_y , %	ψ_{xy} , %
Полотно	11,1	8,92	5,56	0,36	5,66	6,18	6,40
Саржа	12,9	9,32	5,18	0,33	5,19	6,15	6,44
Сатин	17,9	9,84	4,66	0,30	3,48	6,17	6,49

Результаты расчетов УДХ приведены на рис. 3 (рис. 3, а отражает зависимости модулей упругости E_x , E_y и G_{xy} материала от коэффициента k , рис. 3, б – коэффициентов диссипации ψ_x , ψ_y и ψ_{xy} , а рис. 3, в – коэффициентов Пуассона μ_{xy} и μ_{yx}). Точки на рис. 3 соответствуют различным типам переплетения нитей (круги – полотняное переплетение, квадраты – саржевое, а треугольники – сатиновое). Величины УДХ тканевого материала, вычисленные с использованием предложенной модели, в зависимости от типа переплетения нитей приведены в табл. 2.

Расчеты показали, что продольный модуль упругости тканевого композита снизился примерно в 2–3 раза по сравнению с однонаправленным материалом, тогда как продольный коэффициент диссипации существенно возрос (примерно в 3–5 раз). Это объясняется, во-первых, наличием у тканевого композита нитей, расположенных в двух перпендикулярных направлениях (основа и уток), а во-вторых, наличием у нитей наклонных участков (ячейки 3 и 4 на рис. 1). При растяжении тканевого композита в направлении оси x угол наклона нитей основы уменьшается – происходит распрямление нитей основы, при этом нити утка деформируются в поперечном направлении, которому соответствует низкая жесткость и высокий коэффициент диссипации (по сравнению с соответствующими характеристиками в направлении нитей основы). Аналогичная ситуация возникает при растяжении материала в направлении нитей утка.

Сравнение трех различных типов переплетения нитей показало, что наибольшей жесткостью обладает материал, армированный тканью сатинового переплетения. Продольный модуль упругости сатинового композита на 61 % выше по сравнению с композитом, армированным тканью полотняного переплетения. При этом продольный коэффициент диссипации сатинового композита принимает наименьшее значение (на 40 % меньше, чем у полотняного композита). Это объясняется соотношением длин наклонного и прямого участков нитей: чем меньше размер l ячеек с наклонными волокнами по сравнению с общей длиной представительного объема $(k+1)l$, тем выше жесткость материала в продольном направлении и тем ниже соответствующий коэффициент диссипации. Величины поперечного и сдвигового коэффициентов диссипации (также как и соответствующие модули упругости) практически не зависят от типа переплетения нитей.

Заключение

В работе предложена расчетная модель, позволяющая с использованием УДХ однонаправленного композита оценить УДХ тканевых композитов с теми же структурными компонентами при той же объемной доле волокон. Согласно разработанной модели, представительный элемент тканевого материала рассматривается в виде последовательного и параллельного соединения ячеек, содержащих однонаправленный композит с теми же структурными компонентами при той же объемной доле волокон. Модель позволяет учитывать тип переплетения нитей.

С использованием предложенной модели в работе выполнены расчеты УДХ тканевого стеклопластика на основе данных об однонаправленном стеклопластике GLASS/DX210. Расчеты показали, что с точки зрения диссипативных характеристик в продольном направлении однонаправленный композит значительно уступает тканевым материалам, тогда как с точки зрения характеристик упругости ситуация противоположна. Продольный коэффициент демпфирования тканевых композитов примерно в 3–5 раз выше, чем продольный коэффициент демпфирования однонаправленного стеклопластика с теми же структурными компонентами при той же объемной доле волокон. Продольный модуль упругости тканевых композитов при этом снизился примерно в 2–3 раза по сравнению с соответствующим однонаправленным материалом.

Сравнение трех типов переплетения армирующей ткани (полотняное переплетение, саржевое и сатиновое) показало, что наибольшей жесткостью обладает материал, армированный тканью сатинового переплетения: продольный модуль упругости сатинового композита на 61 % выше по сравнению с композитом, армированным тканью полотняного переплетения. Продольный коэффициент диссипации сатинового композита при этом принимает наименьшее значение (на 40 % меньше, чем у композита с полотняным типом переплетения).

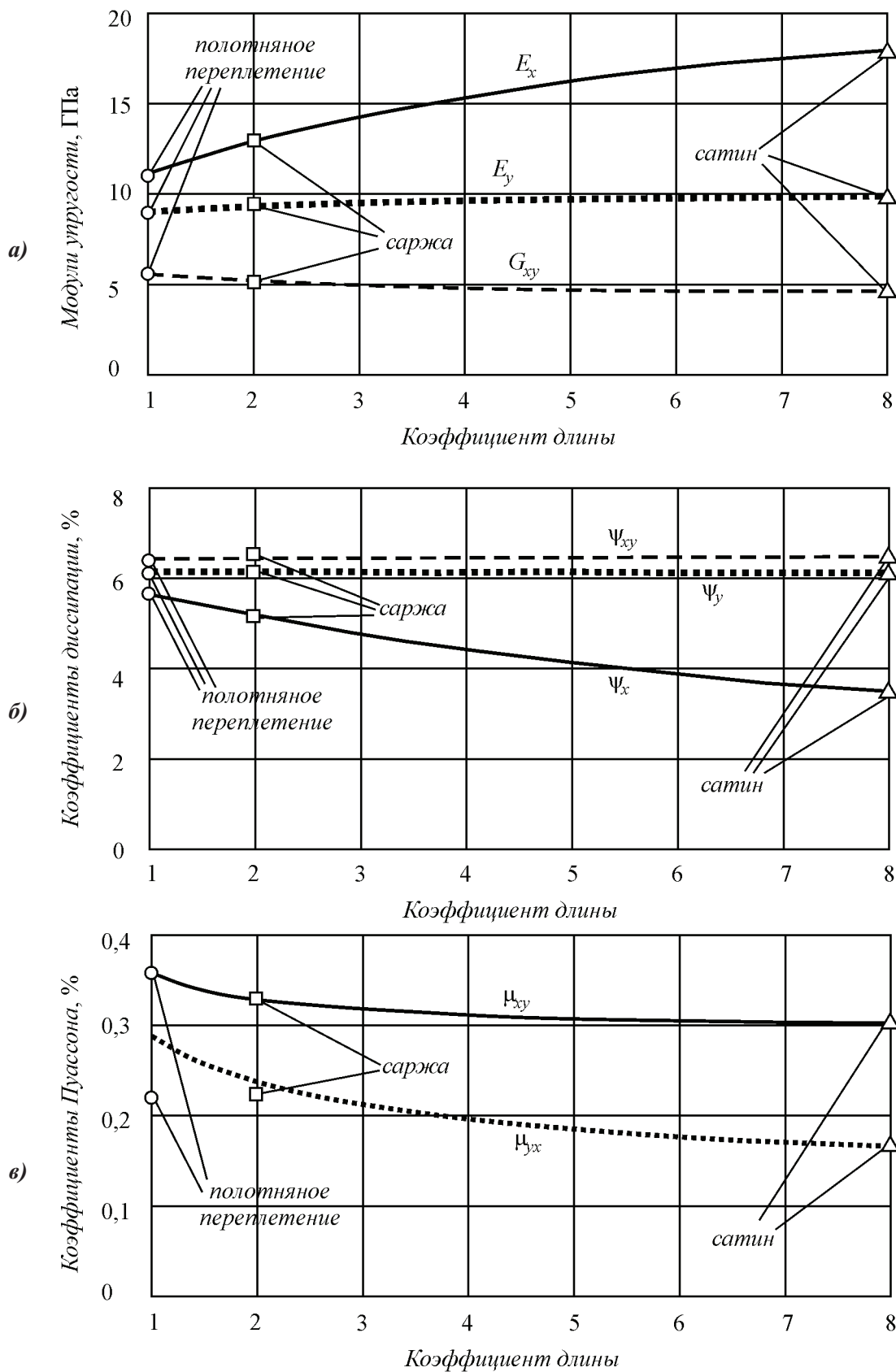


Рис. 3. Зависимость УДХ тканевых стеклопластиков от коэффициента длины нитей

Благодарности

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда энергосберегающих низкопольных трамвайных вагонов модульной конструкции» по договору № 02.G36.31.0002 между Министерством образования и науки РФ и ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ).

Литература

1. Mallick, P.K. Fiber-reinforced composites. Materials, Manufacturing and Design / P.K. Mallick. – CRC press. Taylor and Francis Group, 2008. – 619 p.
2. Gibson, R.F. Principles of composite material mechanics / R.F. Gibson. – CRC press. Taylor and Francis Group, 2007. – 579 p.
3. Скудра, А.М., Прочность армированных пластиков / А.М. Скудра, Ф.Я. Булавс. – М: Химия, 1982. – 216 с.
4. Композиционные материалы. Справочник / под ред. В.В. Васильева. – М: Машиностроение. – 1990. – 512 с.
5. Gibson, R.F. Prediction of fiber-matrix interphase effects on damping of composites using micromechanical strain energy. Finite element approach / R.F. Gibson, S.J. Hwang // Composites Engineering. – 1993. – Vol. 3, Issue 10. – P. 975–984.
6. Geometric and mechanical modelling of 3D woven composites / S. Rudov-Clark, S.V. Lomov, M.K. Bannister *et al.* // Proceedings of the 14th International Conference on Composite Materials, San Diego, USA, 14–18 July 2003.
7. Bogdanovich, A.E. Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites / A.E. Bogdanovich // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41, № 20. – P. 6547–6590.
8. Zako, M. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials / M. Zako, Y. Uetsujib, T. Kurashikia // Composites Science and Technology. – 2003. – Vol. 63, № 7. – P. 507–516.
9. Nicoletto, G. Failure mechanisms in twill-weave laminates: FEM predictions vs. experiments / G. Nicoletto, E. Riva // Composites Part A. – 2004. – Vol. 35, № 7-8. – P. 787–795.
10. Зиновьев, П.А. Диссипация энергии при колебаниях тел из волокнистых полимерных материалов. Структурная модель / П.А. Зиновьев, Ю.Н. Ермаков // Применение пластмасс в машиностроении. – 1986. – С. 37–54.
11. Ni, R.G., The damping and dynamic moduli of symmetric laminated composite beams. Theoretical and experimental results / R.G. Ni, R.D. Adams // Compos. Sci. Technol. – 1984. – № 18. – pp. 104–121.
12. The mechanical properties of woven tape all-polypropylene composites / A. Alcock, N.O. Cabrera, N.-M. Barcoula *et al.* // Composites. Part A. – 2007. – Vol. 38. – Issue 1. – P. 147–161.

Поступила в редакцию 15 июля 2013 г.

ELASTIC AND DISSIPATIVE PROPERTIES ESTIMATION FOR A WOVEN COMPOSITE

A.O. Scherbakova¹

The article considers a mathematical model for a woven composite that allows us to estimate its elastic and dissipative properties using elastic and dissipative properties of unidirectional composite having the same structural components (matrix and fibers) and a fiber volume fraction. According to the developed model a representative element of woven composite is considered to be a set of cells connected in series and in parallel and containing unidirectional composite with different directions of fiber laying. Moreover, the model takes into account a type of weave construction: plane weave, twill or satin.

Keywords: woven composite, elastic properties, dissipation factor, plane weave, twill, satin.

References

1. Mallick P.K. *Fiber-reinforced composites. Materials, Manufacturing and Design*. CRC press. Taylor and Francis Group, 2008. 619 p.
2. Gibson R.F. *Principles of composite material mechanics*. CRC press. Taylor and Francis Group, 2007. 579 p.
3. Skudra A.M., Bulavs F.Ya. *Prochnost' armirovannykh plastikov (Reinforced plastic strength)*. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 216 p. (in Russ.).
4. Vasil'ev V.V. (Ed.) *Kompozitsionnye materialy. Spravochnik (Composite materials. Reference book)*. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 512 p. (in Russ.).
5. Gibson R.F., Hwang S.J. Prediction of fiber-matrix interphase effects on damping of composites using micromechanical strain energy. Finite element approach. *Composites Engineering*. 1993. Vol. 3, Issue 10. pp. 975–984.
6. Rudov-Clark S., Lomov S.V., Bannister M.K., Mouritz A.P., Verpoest I. Geometric and mechanical modelling of 3D woven composites. *Proceedings of the 14th International Conference on Composite Materials, San Diego, USA*. 14–18 July 2003.
7. Bogdanovich A.E. Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites. *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41, no. 20. pp. 6547–6590.
8. Zako M., Uetsujib Y., Kurashikia T. *Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials*. Composites Science and Technology. 2003. Vol. 63, no. 7. pp. 507–516.
9. Nicoletto G., Riva E. Failure mechanisms in twill-weave laminates: FEM predictions vs. experiments. *Composites Part A*. 2004. Vol. 35, no. 7-8. pp. 787–795.
10. Zinov'ev P.A., Ermakov Yu.N. *Primenenie plastmass v mashinostroenii*. 1986. pp. 37–54. (in Russ.).
11. Ni R.G., Adams R.D. The damping and dynamic moduli of symmetric laminated composite beams. Theoretical and experimental results. *Compos. Sci. Technol*. 1984. no. 18. pp. 104–121.
12. Alcock B., Cabrera N.O., Barkoula N.-M., Spoelstra A.B., Loos J., Peijs T. The mechanical properties of woven tape all-polypropylene composites. *Composites. Part A*. 2007. Vol. 38. Issue 1. pp. 147–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.01.003>

Received 15 July 2013

¹ Scherbakova Alla Olegovna is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural state university.
E-mail: AllaScherbakova@list.ru