

УДК 539.3

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ МОДУЛИ ТКАНОГО КОМПОЗИТА ПОЛОТНЯНОГО ПЛЕТЕНИЯ С ЛОКАЛЬНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

© 2014 Д.В. Дедков, А.В. Зайцев, А.А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 12.12.2014

Спрогнозированы эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с поликристаллической матрицей и керамическими волокнами. Проведена оценка влияния локальных технологических дефектов и масштабного фактора на величины эффективных модулей Юнга и коэффициентов Пуассона.

Ключевые слова: *тканый композит, искривленные волокна, поликристаллическая матрица, дефект*

Тканые композиты с поликристаллической матрицей получили широкое распространение в авиационной и космической промышленности. Из таких материалов изготавливают несущие панели крыла, оперения и фюзеляжа самолетов, лопатки турбин, сопловые блоки, носовые обтекатели ракетных двигателей, уплотнительные элементы для трубопроводов гидро- и пневмосистем и многие другие элементы конструкций, эксплуатируемые в условиях интенсивного теплового (или криогенного) и механического воздействия [1]. Отличительной особенностью процесса изготовления готовых изделий из этих материалов является раскрой и выкладка на оправку слоев ткани с искривленными волокнами (полотняной, сатиновой, саржевой и др.), а также прошивка этих слоев между собой. Полученный армирующий каркас насыщается поликристаллической матрицей, в результате чего происходит одновременное создание самого элемента конструкции и материала, из которого он изготовлен.

При производстве изделий из тканых композитов неизбежны технологические дефекты, снижающие эксплуатационные свойства изделий. К числу типичных локальных дефектов относятся пропуск волокон основы или утка,

разрывы нитей армирующего каркаса при прошивке слоев, которые обнаруживаются только на этапе выходного ультразвукового контроля элементов конструкций. Гарантированное обеспечение наличия в этих участках поликристаллической матрицы (при осаждении из газовой фазы или при карбонизации полимеров после пропитки под давлением, вакуумирования и доуплотнения армирующего каркаса), матрицы на основе терморасширенного графита (после прокатки слоев фольги) или керамики затруднено [2]. Это связано с тем, что образующиеся на поверхности нитей слой осаждаемого материала препятствует дальнейшему насыщению каркаса.

Применение тканых композитов для изготовления элементов конструкций ответственного назначения, работающих в условиях многократно изменяющихся внешних нагрузок в течение длительного срока эксплуатации, предопределяет необходимость прогнозирования эффективных упругих свойств. В настоящей статье представлены результаты оценки влияния сложной геометрии армирующего каркаса и локальных технологических дефектов на эффективные модули Юнга и коэффициенты Пуассона слоя композита полотняного плетения (саржа 1/1 с равными рапортами по основе и утку), которые были получены при помощи разработанной ранее двухуровневой модели тканого материала с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей [3-5]. Выбор полотняного переплетения обеспечил наиболее короткие перекрытия нитей, наибольшую прочность, плотность и повышенную жесткость, однородную, геометрически идентичную с лицевой и изнаночной стороны поверхность ткани.

Дедков Денис Владимирович, младший научный сотрудник кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций». E-mail: denis.v.dedkov@gmail.com

Зайцев Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций». E-mail: zav@pstu.ru

Ташкинов Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ректор. E-mail: rector@pstu.ru

Исследовался слой тканого композита толщиной $2,5 D$ с армирующим каркасом полотняного переплетения, образованного волокнами круглого поперечного сечения постоянного диаметра D . Следуя [3-6], искривление волокон основы и утка ткани описывалось дугой окружности с центральным углом $\alpha=\pi/4$ и участком прямой. В силу малости деформаций предполагалась неизменность углов α при нагружении слоя.

Построение геометрической модели было осуществлено с использованием препроцессора, входящего в состав платформы SALOME-MECA, предназначенной для решения задач механики сплошных сред, термо- и гидродинамики, акустики и магнетизма, выполнения расчетов для строительных конструкций и сооружений [7]. На рис. 1 представлены фрагменты слоя тканого композита с коэффициентами армирования $\alpha_1=\alpha_3=0,14$. Здесь и далее оси x_1 и x_3 ортогональной декартовой системы координат будут принадлежать плоскости слоя.

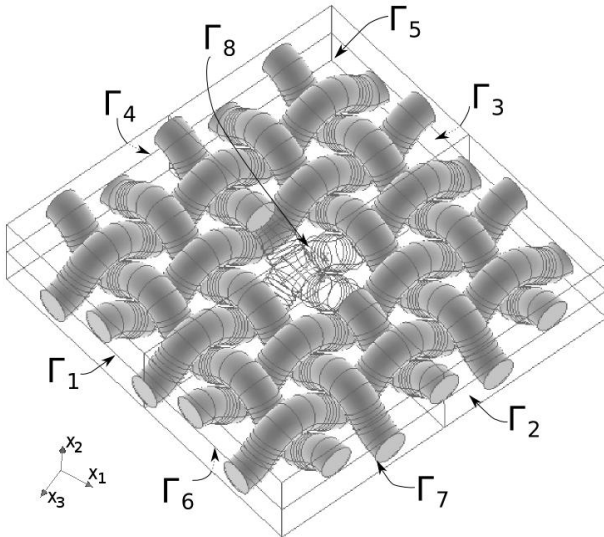


Рис. 1. Фрагмент слоя тканого композита полотняного плетения с локальным технологическим дефектом в виде локального разрыва нитей основы и утка

Были рассмотрены наиболее типичные локальные технологические дефекты: полости, связанные со случайными разрывами основы или основы и утка (рис. 1), которые появляются при сшивке слоев, но могут присутствовать в исходной ткани до прошивки. Размеры рассматриваемых дефектов были соизмеримы с характерными размерами неоднородностей, не изменяли значительно интегральные коэффициенты армирования композита, могли быть частично или полностью заполнены материалом матрицы. Волокна и матрица слоя тканого композита предполагались изотропными, линейно упругими, не изменяющими геометрию, взаимное

расположение и тип симметрии при нагружении. Поэтому компоненты тензора напряжений $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ удовлетворяли уравнениям равновесия, а компоненты тензора малых деформаций $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})$ были связаны с компонентами вектора перемещений $u_i(\mathbf{r})$ соотношениями Коши

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{r})=0, \quad 2\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})=u_{i,j}(\mathbf{r})+u_{j,i}(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Описание геометрии слоя тканого композита проводилось при помощи единичной, кусочно-однородной индикаторной функции $\lambda(\mathbf{r})$ радиус-вектора $\mathbf{r}$, принимавшей значение 1, если точка принадлежала волокнам основы или утка и 0, если матрице. Это позволило записать определяющие соотношения следующим образом:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r})=\{C_{ijkl}^f\lambda(\mathbf{r})+C_{ijkl}^m[1-\lambda(\mathbf{r})]\}\varepsilon_{kl}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где верхними индексами f и m отмечены материальные коэффициенты, которые относились к нитям армирующего каркаса и матрице соответственно.

Краевая задача (1)-(2) была дополнена условиями симметрии:

$$\begin{aligned} u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_4}=u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_3}=u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_6}=0, \\ \sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_4}=\sigma_{23}(\mathbf{r})|_{\Gamma_4}=\sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_3}=\sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_3}=0, \\ \sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_5}=\sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_5}=\sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_6}=\sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_6}=0 \end{aligned} \quad (3)$$

и условиями идеального сопряжения

$$\begin{aligned} [\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^+}=[\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^-}, \\ [u_i(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^+}=[u_i(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^-}, \end{aligned} \quad (4)$$

на границах раздела фаз Γ_7 (рис. 1), на которых предполагалось отсутствие химических реакций и фазовых переходов в процессе нагружения слоя. Равенства (4) позволили описать совместную работу нитей и поликристаллической матрицы при нагружении.

Полости, образованные при пропуске или разрыве нитей армирующего каркаса (рис. 1), моделировались исключением локальных объемов искривленных волокон. Точки образовавшейся внутренней поверхности Γ_8 не имели ограничений на перемещения, а сама поверхность была свободна от напряжений:

$$[\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j(\mathbf{r})]|_{\Gamma_8}=0. \quad (5)$$

Дополняя равенства (3)-(5) условиями:

$$u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_2} = \varepsilon_{11}^* r_1, \quad u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = 0, \quad u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_1} = 0, \quad (6)$$

$$u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_1} = \varepsilon_{33}^* r_3, \quad u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = 0, \quad u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_2} = 0, \quad (7)$$

которые обеспечивали заданное макроскопически однородное одноосное деформирование в направлениях x_1 и x_2 соответственно (при $\varepsilon_{22}^* = 0$), можно было определить эффективные модули Юнга E_i^* и коэффициенты Пуассона ν_{ij}^* из решения систем уравнений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}^* &= \frac{1}{E_1^*} (\sigma_{11}^* - \nu_{12}^* \sigma_{22}^* - \nu_{13}^* \sigma_{33}^*), \\ \varepsilon_{22}^* &= -\frac{\nu_{12}^*}{E_1^*} \sigma_{11}^* + \frac{1}{E_2^*} (\sigma_{22}^* - \nu_{23}^* \sigma_{33}^*), \\ \varepsilon_{33}^* &= -\nu_{23}^* \left(\frac{1}{E_1^*} \sigma_{11}^* + \frac{1}{E_2^*} \sigma_{22}^* \right) + \frac{1}{E_3^*} \sigma_{33}^*, \end{aligned} \quad (8)$$

предполагая, что слою тканого композита соответствовала однородная ортотропная среда. Здесь ε_{ij}^* и σ_{ij}^* – компоненты тензоров макродеформаций и макронапряжений, которые являлись заданными или вычисленными в результате усреднения по объему рассматриваемого фрагмента слоя тканого композита.

Численное решение краевой задачи (1)–(2) с граничными условиями (3)–(6) или (3)–(5), (7) проводилось методом конечных элементов с помощью некоммерческого пакета Code-Aster, входящего в состав платформы SALOME-MECA [7]. Степень дискретизации фрагментов на 16-узловые тетраэдральные и 20-узловые гексаэдральные изопараметрические элементы выбиралась таким образом, чтобы полученные в результате численного решения поля структурных перемещений, деформаций и напряжений в слое тканого композита без локальных дефектов и с несовершенствами ни качественно, ни количественно не изменялись при уменьшении характерных размеров конечных элементов. Этим результатам соответствовали сетки с не менее, чем 78000 20-узловых гексаэдральных и 406000 16-узловых тетраэдральных элементов.

В табл. 1 представлены эффективные упругие свойства слоя тканого композита с поликристаллической матрицей, прогнозирование которых для фрагментов с различными локальными технологическими дефектами было осуществлено при следующих свойствах фаз: $E_f = 280$ ГПа и $\nu_f = 0,20$ (модуль Юнга и коэффициент

Пуассона материала нитей армирующего каркаса) [8], $E_m = 0,28$ ГПа и $\nu_m = 0,40$ (модули поликристаллической матрицы).

При определении эффективных свойств возникла необходимость интегрирования по объему изменяющихся внутри конечных элементов полей структурных напряжений и деформаций для вычисления соответствующих макроскопических значений, входящих в систему уравнений (8). Поскольку эта операция не предусмотрена пакетом Code-Aster [7], был разработан и программно реализован модуль расширений платформы SALOME-MECA на языке Python. Интегрирование методом Гаусса-Лежандра по объему 20-узловых гексаэдральных изопараметрических элементов производилось по 8 точкам, а 10-узловых тетраэдральных конечных элементов – по 5 точкам, координаты которых, весовые коэффициенты, а также функции формы соответствовали работам [7, 9]. Для увеличения производительности в разработанном модуле интегрирования было предусмотрено выполнение параллельных вычислений с использованием нескольких процессоров. Многопроцессорность была достигнута с помощью пакетов Parallel Python и MPI4PY, продемонстрировавших одинаковые результаты линейного кратного уменьшения временных затрат на проведение операций с плавающей точкой. Так, например, использование 4 процессоров позволило сократить время вычисления значений компонент тензоров макронапряжений и макродеформаций в 4 раза.

Результаты прогнозирования эффективных упругих модулей (табл. 1) показали существенное влияние на искомые величины (по сравнению с материалом идеальной периодической структуры) локальных технологических дефектов. Так, например, обнаружено существенное (до 13 раз) снижение модуля Юнга E_2^* в направлении оси x_2 , перпендикулярной плоскости слоя, и уменьшение в 3 раза модулей E_1^* в направлении x_1 , совпадающем с направлением пропущенной нити основы. Вместе с тем, наличие в тканом композите локального разрыва волокон основы или основы и утка лишь в 1,25 раза снижают эффективные модули E_1^* и E_3^* в плоскости слоя.

Дополнительное насыщение материалом матрицы полости, возникающей на месте пропуска волокна или разрыва нитей, как показали ранее полученные результаты [3–5], привело локальному изменению (на масштабах, соизмеримых с характерным размером волокон) симметрии армирующего каркаса и, как следствие к

существенному снижению коэффициентов концентрации напряжений и смене механизмов разрушения. Однако значительного изменения эффективных модулей Юнга и коэффициентов Пуассона не наблюдалось. Этот неожиданный

результат может быть объяснен тем, что упругие модули фаз армирующего каркаса и поликристаллической матрицы у исследуемого материала различались на два порядка.

Таблица 1. Эффективные упругие модули тканого композита с локальными технологическими дефектами

Тип локального дефекта	E_1^* , ГПа	E_2^* , ГПа	E_3^* , ГПа	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
идеальная периодическая структура	167,686	125,679	167,675	0,447	0,016	0,033
пропуск волокна основы	$\frac{52,609}{54,214}$	$\frac{9,594}{11,842}$	$\frac{132,611}{132,215}$	$\frac{0,378}{0,465}$	$\frac{0,003}{0,004}$	$\frac{0,034}{0,034}$
разрыв волокна основы	$\frac{135,057}{135,200}$	$\frac{9,391}{15,919}$	$\frac{165,202}{166,059}$	$\frac{0,279}{0,470}$	$\frac{0,003}{0,005}$	$\frac{0,027}{0,027}$
разрыв волокон основы и утка	$\frac{135,124}{135,807}$	$\frac{10,171}{11,351}$	$\frac{135,130}{135,811}$	$\frac{0,411}{0,465}$	$\frac{0,006}{0,002}$	$\frac{0,034}{0,035}$

Примечание: внутренняя полость, образованная дефектом, остается незаполненной (числитель) или заполняется материалом матрицы (знаменатель)

Проведено исследование влияния масштабного эффекта на значения эффективных упругих модулей слоя тканого композита плотного плетения на основе численного решения краевых задач для различных фрагментов материала, которые содержали один (рис. 1), два и три слоя окружающих локальные технологические дефекты ячеек, образованных переплетением нитей основы и утка. Результаты вычислительных экспериментов показали, что включение в геометрическую модель второго слоя ячеек позволяет уточнить результаты прогнозирования эффективных характеристик на 3,5 %, а третьего слоя – еще на 1,5%.

Выводы: концентрация (количество разрывов или пропусков нитей) отдельных локальных технологических дефектов, находящихся на расстоянии, как минимум, двух-трех характерных размеров ячеек, образованных переплетением нитей армирующего каркаса, в элементе конструкции, изготовленном из тканого композита, не является ключевым фактором, существенно влияющим на значения эффективных упругих модулей, однако предопределяющим сценарии развития процесса разрушения.

Исследования проведены в рамках задания № 2014/152 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ (код проекта – 1911).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Буланов, И.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов
2. Суровикин, В.Ф. Новые направления в технологии получения углерод-углеродных материалов. Применение углерод-углеродных материалов / В.Ф. Суровикин, Ю.В. Суровикин, М.С. Цеханович // Рос. хим. журнал. (Ж-л Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2007. № 4. С. 111-118.
3. Дедков, Д.В. Концентрация напряжений в слое тканого композита с закрытыми внутренними технологическими порами / Д.В. Дедков, А.В. Зайцев, А.А. Таишинов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. №4. С. 29-36.
4. Дедков, Д.В. Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами при чистом формоизменении / Д.В. Дедков, А.А. Таишинов // Вычислит. механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 1. С. 103-109.
5. Дедков, Д.В. Концентрация напряжений в слое тканого композита с локальными дефектами при двухосном однородном равнокомпонентном деформировании / Д.В. Дедков, А.В. Зайцев // Вестник Самарского гос. технич. ун-та, 2013. № 4(33). С. 66-75.
6. Иманкулова, А.С. Текстильные композиты. – Бишкек: Изд. центр «МОК», 2005. 152 с.
7. Bergeaud, V. SALOME 6. The Open Source integration platform for numerical simulations. 2012 // V. Bergeaud, V. Lefebvre, E. Rossignon. <http://salome-platform.org/user-section/salome-brochure>.
8. Тарнапольский, Ю.М. Конструкционные особенности материалов, армированных высокомолекулярными волокнами / Ю.М. Тарнапольский, А.В. Розе, И.Г. Жигун, Г.М. Гуняев // Механика полимеров. 1971. №4. С. 676-685.
9. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. – М: Наука, 1975. 544 с.

/ И.В. Буланов, В.В. Воробей. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 507 с.

EFFECTIVE ELASTIC MODULES OF WOVEN LINEN WEAVING COMPOSITE WITH LOCAL TECHNOLOGICAL DEFECTS

© 2014 D. V. Dedkov, A.V. Zaytsev, A.A. Tashkinov

Perm national research polytechnical university

I came to edition 12.12.2014

Effective elastic modules of woven linen weaving composite with polycrystalline matrix and ceramic fibers are predicted. The assessment of influence the local technological defects and large-scale factor at sizes of effective Young's modules and Poisson's ratios is carried out.

Key words: *woven composite, bent fibers, polycrystalline matrix, defect*

*Denis Dedkov, Minor Research Fellow at the Department
"Mechanics of Composite Materials and Constructions".*

E-mail: denis.v.dedkov@gmail.com

*Aleksey Zaitsev, Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Professor at the Department "Mechanics of
Composite Materials and Constructions". E-mail:*

zav@pstu.ru

*Anatoliy Tashkinov, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor, Rector. E-mail: rector@pstu.ru*