

DOI: [10.7242/1999-6691/2013.6.1.13](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.1.13)

УДК 539.3

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОЕ ТКАНОГО КОМПОЗИТА С ЛОКАЛЬНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ ПРИ ЧИСТОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ

Д.В. Дедков, А.А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Разработана модель слоя тканого композита с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей. При чистом формоизменении на основе численного решения краевых задач методом конечных элементов определены значения коэффициентов концентрации напряжений, вызванной наличием локальных технологических дефектов вида: разрыв волокна основы; разрыв волокон и основы, и утка; закрытая пора. Показано, что с помощью дополнительных технологических операций, обеспечивающих заполнение материалом матрицы образующихся полостей, можно снизить концентрацию напряжений и повысить способность материала сопротивляться внешним силовым нагрузкам. Установлены механизмы, инициирующие разрушение поликристаллической матрицы.

Ключевые слова: тканый композит с искривленными волокнами, поликристаллическая матрица, локальный технологический дефект, контакт с трением, разрыв волокна

STRESS CONCENTRATION COEFFICIENTS OF A WOVEN TEXTILE COMPOSITE LAYER WITH LOCAL PROCESSING DEFECTS UNDER PURE FORMING CONDITIONS

D.V. Dedkov and A.A. Tashkinov

Perm State National Research Polytechnic University, Perm, Russia

A new model has been developed to simulate a woven textile composite layer with a polycrystalline matrix. Based on the numerical solution of the boundary-value problem by the finite-element method, the values of stress concentration caused by local processing defects (break in a fiber, closed internal pore) in pure forming are obtained. It is shown that application of additional processing operations to fill the formed voids by matrix material can decrease stress concentration and increase the ability of a material to withstand external force loads. The mechanisms responsible for initiation of damages in a polycrystalline matrix are determined.

Key words: woven textile composite, polycrystalline matrix, local processing defect, contact with friction, break in a fiber

1. Введение

Создание элементов конструкций из тканых композитов с керамическими волокнами и полимерными (насыщенными полиэфирными или эпоксидными смолами) или поликристаллическими (из терморасширенного графита, керамики или осаждаемых из газовой фазы продуктов термического разложения углеводородов) матрицами является одним из приоритетных направлений развития техники и технологий. Преимущества таких материалов заключаются в высокой теплостойкости, малой плотности, стойкости к тепловому удару и облучению. Кроме того, эти материалы обладают хорошими прочностными характеристиками при обычной и повышенной температурах.

Производство тканых композитов неразрывно связано с производством самого изделия из этого типа материала. Его конструктивный вид формируется при помощи выкладки на оправку слоев ткани (полотняной, сатиновой, саржевой и другой) с искривленными волокнами, прошивкой этих слоев между собой и последующим насыщением полученного каркаса, например, эпоксидными смолами или поликристаллической матрицей. При производстве тканых композитов неизбежны технологические дефекты, снижающие эксплуатационные свойства изделий. Пропуски волокон основы или утка в процессе выработки ткани, разрывы нитей при сшивке и внутренние поры, образующиеся из-за недостаточного насыщения армирующего каркаса материалом матрицы, являются основными примерами таких дефектов [1].

Применение тканых композитов для изготовления элементов конструкций ответственного назначения, работающих в условиях многократно изменяющихся внешних нагрузок в течение длительных сроков эксплуатации, приводит к необходимости уточненного анализа их механического поведения. Последнее, в свою очередь, делает актуальным использование методов вычислительной механики при определении поведения слоев этих материалов с локальными дефектами в условиях многоосного квазистатического нагружения.

Исследованию механического поведения тканых композитов с искривленными волокнами и переплетениями различного типа посвящены многочисленные публикации сотрудников Левенского католического университета (Бельгия), которые на протяжении последних десяти лет занимаются разработкой специализированных пакетов прикладных программ для описания геометрии и численного

решения краевых задач методом конечных элементов [2, 3]. Установлению закономерностей неупругого деформирования и описанию процессов накопления повреждений при циклическом нагружении посвящены статьи [4, 5]. В работе [6] проведено сравнение вычислительных и натурных экспериментов с элементами конструкций из тканых композитов при многоосном нагружении. Однако изучению влияния локальных технологических дефектов на механическое поведение, прочностные и деформационные свойства тканых композитов уделяется недостаточное внимание.

Данная статья посвящена математическому моделированию испытания при чистом формоизменении слоя композита саржевого плетения с равными раппортами по основе и утку (полотняное плетение) с керамическими волокнами, полимерной или поликристаллической матрицей. Представлены результаты вычисления значений коэффициентов концентрации напряжений, вызванных сложной геометрией искривления армирующего каркаса и наличием локальных технологических дефектов (разрывов нитей основы и утка и внутренних пор, образовавшихся вследствие недостаточного насыщения слоя материалом матрицы). Полотняное переплетение гарантирует высокую плотность ткани и, как следствие, наибольшую прочность и повышенную жесткость. Кроме того, благодаря равномерному распределению нитей основы и утка обе стороны ткани получаются геометрически идентичными по своей структуре.

2. Геометрическая модель

Для решения задачи деформирования построим модель слоя тканого композита толщиной $2,5D$, где D — характерный размер образующих ткань нитей. Геометрия поперечного сечения нити определяется технологическими операциями свивания и кручения филаментов (волосков) и волоконца в нить, типом переплетения нитей, их плотностью расположения в ткани и силами натяжения. Для простоты ограничимся рассмотрением нитей круглого поперечного сечения постоянного диаметра D и плетения полотняного типа. Коэффициенты армирования ткани традиционно определяются отношением суммарной площади поперечных сечений нитей по основе (утку) к площади соответствующего поперечного сечения слоя и для исследуемого вида ткани в обоих направлениях составляют 0,14. Оси x_1 и x_3 ортогональной декартовой системы координат лежат в плоскости слоя (Рис. 1, *a*). Изогнутую ось нити и основы, и утка ткани представим как кривую линию, состоящую из дуг окружностей и линейных участков [7]. Начальные изгибные напряжения нити, возникающие из-за искривления волокон, проигнорируем.

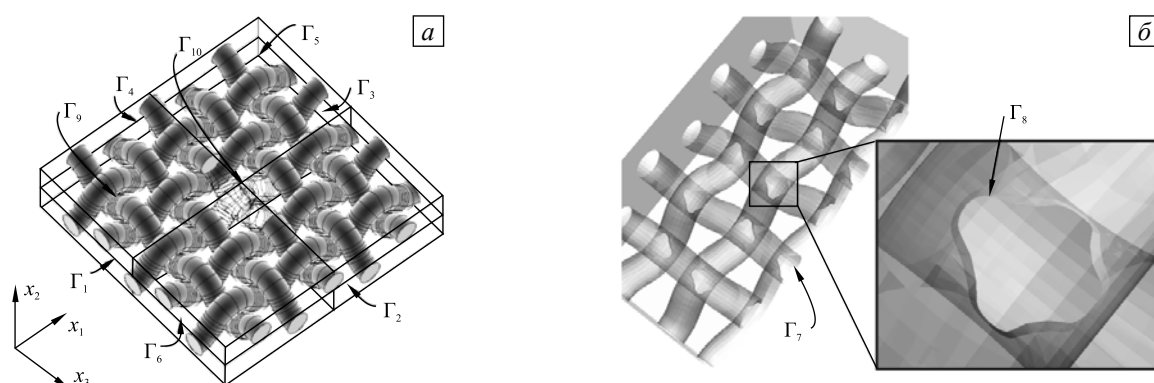


Рис. 1. Фрагменты слоя тканого композита полотняного плетения с технологическими дефектами: локальный разрыв нитей основы и утка (*a*), внутренняя технологическая пора (*b*)

Ввиду малости возникающих деформаций, обусловленной высокой жесткостью керамических нитей армирующего каркаса и высокой плотностью ткани, считаем, что форма поперечного сечения и геометрия переплетения волокон заданы и остаются постоянными во всем диапазоне изменения внешних нагрузок. Предполагаем также, что искривленные волокна, принадлежащие слою тканого композита с поликристаллической матрицей, не всегда окружены гарантированной прослойкой матрицы и могут соприкасаться между собой в местах наибольшей кривизны.

В настоящей работе рассматриваются типичные дефекты тканых композитов: разрывы волокон утка; разрывы волокон основы и утка (Рис. 1, *a*), образующиеся при сшивке слоев либо в процессе насыщения каркаса материалом матрицы; герметичные технологические поры — полости (Рис. 1, *b*), расположенные вблизи участков наибольшего искривления нитей. Все они являются локальными концентраторами напряжений. Полости, возникающие в результате разрывов волокон в процессе сшивания, могут заполняться материалом матрицы с помощью дополнительных технологических операций или оставаться незаполненными.

Твердотельную модель слоя тканого композита идеальной периодической структуры с учетом внутренних технологических дефектов будем строить с помощью геометрического модуля GEOM, входящего в состав платформы SALOME-MECA с открытыми исходными кодами и предназначенного для численного решения краевых задач механики сплошных сред, термо- и гидродинамики, акустики и магнетизма, выполнения расчетов для строительных конструкций и сооружений [8].

3. Краевая задача

Если предположить, что волокна и матрица, составляющие слой модельного тканого композита, изотропные, линейно упругие, не изменяющие ни геометрию, ни взаимное расположение, ни тип симметрии при нагружении, то компоненты тензора напряжений $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ будут удовлетворять условиям равновесия

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{r}) = 0, \tag{1}$$

а компоненты тензора малых деформаций $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})$ — уравнениям связи с компонентами вектора перемещений $u_i(\mathbf{r})$ — геометрическим соотношениям Коши

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} [u_{i,j}(\mathbf{r}) + u_{j,i}(\mathbf{r})]. \tag{2}$$

Геометрию слоя модельного тканого композита опишем с помощью единичной кусочно-однородной функции $\lambda(\mathbf{r})$ радиус-вектора \mathbf{r} , принимающей значение 1 в случае принадлежности точки фазе волокон основы или утка, и 0, если эта точка принадлежит матрице. С учетом сказанного определяющие соотношения запишутся следующим образом:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = \{C_{ijkl}^f \lambda(\mathbf{r}) + C_{ijkl}^m [1 - \lambda(\mathbf{r})]\} \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}), \tag{3}$$

где верхними индексами f и m отмечены материальные коэффициенты, относящиеся к волокнам и матрице соответственно.

Дополним краевую задачу (1)–(3) условиями на внешних границах фрагмента слоя модельного композита, обеспечивающими его макрооднородное чистое формоизменение в собственной плоскости

$$\begin{aligned} u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_2} &= u_1^0, \quad u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_1} = -u_1^0, \\ u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_4} &= u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_3} = u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_6} = 0, \\ \sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_4} &= \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_4} = \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_3} = \sigma_{23}(\mathbf{r})|_{\Gamma_3} = 0, \\ \sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} &= \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = \sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_6} = \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_6} = 0, \end{aligned} \tag{4}$$

и условиями идеального сопряжения

$$[\sigma_{ij}(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^+} = [\sigma_{ij}(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^-}, \quad [u_i(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^+} = [u_i(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^-} \tag{5}$$

на границах раздела фаз Γ_7 плетеного армирующего каркаса и матрицы (Рис. 1, б). Также на поверхностях Γ_7 постулируем отсутствие химических реакций и фазовых переходов во всем диапазоне температур эксплуатации и величин прикладываемых внешних нагрузок.

Если гарантированная прослойка матрицы между нитями основы и утка композита отсутствует, при нагружении слоя возможно скольжение искривленных нитей армирующего каркаса относительно друг друга по соответствующим контактным поверхностям Γ_9 , положение и геометрия которых считаются заданными и неизменными в процессе приложения внешней нагрузки. На этих поверхностях выполним условия контакта с кулоновским трением:

– при $[\sigma_{nr}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^+} < [f|\sigma_{nm}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^-}$

$$[\sigma_{nr}(\mathbf{r})n_n]_{\Gamma_9^+} = [\sigma_{nr}(\mathbf{r})n_n]_{\Gamma_9^-}, \quad [u_n(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^+} = [u_n(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^-}; \quad (6)$$

– при $[\sigma_{nr}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^+} \geq [f|\sigma_{nm}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^-}$

$$[\sigma_{nr}(\mathbf{r})n_n]_{\Gamma_9^+} \geq [\sigma_{nm}(\mathbf{r})n_n]_{\Gamma_9^-}, \quad [u_n(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^+} = [u_n(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^-}, \quad (7)$$

где f — статический коэффициент трения, а индексы n и τ определяют направление внешней нормали и касательной к поверхности Γ_9 .

Еще одной особенностью геометрии армирующего каркаса с искривленными нитями является наличие внутренних пор (Рис. 1, б), недоступных для проникновения матрицы даже в том случае, когда в технологическом процессе получения тканого композита принимаются меры по принудительному насыщению подобного рода полостей матрицей. Последнее оказывается возможным, например, при пропитке слоя полимерным связующим под давлением и последующей карбонизации (дополнительном осаждении углерода из газовой фазы). Технологические поры имеют внутреннюю поверхность Γ_8 , на которой отсутствуют ограничения на перемещения, а сама поверхность свободна от напряжений

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j|_{\Gamma_8} = 0. \quad (8)$$

Полости, образовавшиеся в результате разрыва нити, моделируются внутренними пустотами в матрице, и их геометрия идентична геометрии волокна. Если полость остается не заполненной материалом матрицы, то ее внутренняя поверхность предполагается также свободной от напряжений

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j|_{\Gamma_{10}} = 0, \quad (9)$$

а ее точки не имеют ограничений на перемещения. В случае насыщения внутренней поры соответствующие объемы материала обладают свойствами матрицы.

4. Локальная концентрация напряжений

Краевая задача (1)–(3) с граничными условиями (4)–(9) решена численно, методом конечных элементов, с помощью программного пакета Code-Aster, выпускаемого под свободной лицензией, входящего в состав платформы SALOME-MECA. Данный пакет разработан и сертифицирован для французской энергетической отрасли и позволяет решать линейные и нелинейные статические и динамические краевые задачи механики деформируемого твердого тела.

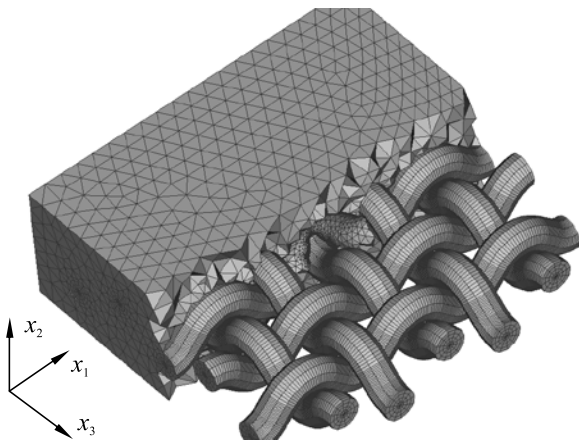


Рис. 2. Дискретизация областей матрицы и искривленных нитей армирующего каркаса слоя тканого композита

На рисунке 2 показана конечно-элементная сетка исследуемого фрагмента слоя тканого композита с полотняным переплетением, состоящая из 14-узловых тетраэдральных и 20-узловых гексаэдральных изопараметрических элементов. Характерные размеры конечных элементов выбирались таким образом, чтобы полученные в результате численного решения значения структурных перемещений, деформаций и напряжений в слое тканого композита ни качественно, ни количественно не изменялись при их уменьшении. В окрестностях внутренних пор, расположенных в местах с наибольшей кривизной волокон, производилось сгущение сетки конечных элементов. В таблице 1 представлены параметры сетки, удовлетворяющие вышеперечисленным условиям.

Таблица 1. Параметры конечно-элементной сетки

Вид структуры	Условие контакта между нитями	Тип элементов и их количество	
		Тетраэдральные	Гексаэдральные
Бездефектная идеальная периодическая	Наличие гарантированной прослойки матрицы	298 255	77 760
	Контакт с трением	405 480	77 760
С разрывами волокна основы	Наличие гарантированной прослойки матрицы	285 466	75 168
	Контакт с трением	405 480	75 168
С разрывами волокон основы и утка	Наличие гарантированной прослойки матрицы	279 276	72 576
	Контакт с трением	405 480	72 576

Для сопряжения конечно-элементных сеток армирующего каркаса и матрицы на этапе дискретизации выделялись «главная» и «подчиненная» поверхности. На этапе расчета узловые точки «подчиненной» поверхности (например, принадлежащие матрице) проецировались на те ближайшие конечные элементы, грани которых расположены на «главной» поверхности, и считались принадлежащими этим элементам. Перемещения точек «подчиненной» поверхности заменялись перемещениями их проекций на элемент «главной» поверхности [9].

Для проверки сходимости решалась задача определения напряженно-деформированного состояния при двухосном деформировании слоя тканого композита для сеток с разным количеством элементов и проводилось сравнение максимальных значений интенсивностей напряжений $\sigma_{l_{\max}}$ в точке, находящейся в геометрическом центре слоя тканого композита с бездефектной идеальной периодической структурой. Для 195 167 конечных элементов максимальные значения интенсивностей напряжений равнялись $\sigma_{l_{\max}} = 33,6$ МПа, для 242 484 — $\sigma_{l_{\max}} = 32,0$ МПа, для 321 723 — $\sigma_{l_{\max}} = 31,1$ МПа, для 376 015 — $\sigma_{l_{\max}} = 31,2$ МПа.

На рисунке 3 показаны распределения интенсивностей напряжений в искривленных нитях основы и утка при чистом макроскопически однородном формоизменении слоя тканого композита. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона материала волокон взяты из работы [10]: $E_f = 280$ ГПа, $\nu_f = 0,20$. Упругие модули матрицы принимались равными $E_m = 0,28$ ГПа и $\nu_m = 0,40$. Статический коэффициент трения f соответствовал скольжению керамического волокна по поверхности поликристаллической матрицы, осаждаемой из газовой фазы: $f = 0,12$. Из рисунка видно, что распределение искомым полей напряжений в рассматриваемом случае удовлетворяет условиям симметрии и периодичности исследуемого фрагмента тканого композита и соответствует приложенной внешней нагрузке. Это, в свою очередь, может свидетельствовать о корректности разработанной модели и полученного на ее основе численного конечно-элементного решения.

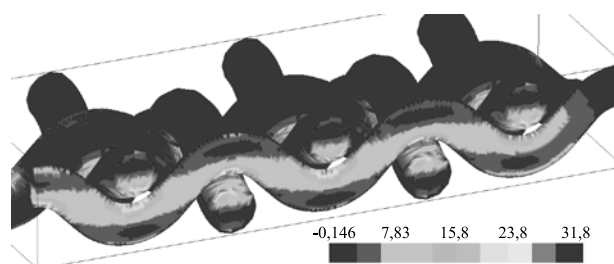


Рис. 3. Поля интенсивностей напряжений в нитях армирующего каркаса

Определим безразмерные коэффициенты концентрации напряжений как отношение компонент тензора напряжений в точке слоя тканого композита с дефектом к соответствующим компонентам тензора напряжений в слое бездефектного материала с идеально периодической структурой в этой же точке: $K_{\sigma_{ij}} = \sigma_{ij} / \sigma_{ij}^{per}$.

Для обработки массива данных, полученных с помощью Code-Aster, и расчета значений коэффициентов концентраций привлекался дополнительный пакет прикладных программ, написанный на языке Python, который является простым и в то же время мощным интерпретируемым объектно-ориентированным языком программирования. Для увеличения скорости обработки большого объема данных использовалась встраиваемая база данных SQLite.

На рисунке 4 показано распределение коэффициентов концентраций интенсивностей напряжений в слое тканого композита при макроскопически однородном чистом формоизменении. Области, в которых

интенсивности напряжений имеют максимальную величину, располагаются строго периодически в местах, где нити армирующего каркаса имеют наибольшую кривизну. Исключение составляют области вблизи локальных разрывов утка (Рис. 4, *a*) или основы и утка (Рис. 4, *в*), где анализируемый параметр поля напряжений превышает соответствующее значение, найденное для фрагмента с идеальной периодической структурой, в 1,4 и 1,6 раза. Кроме того, вычислительные эксперименты показали, что если для искривленных нитей не исключена возможность контакта с трением, а также в материале присутствуют закрытые внутренние полости, не насыщенные матрицей, то значения коэффициентов концентрации интенсивности напряжений для рассматриваемых случаев увеличиваются до 2,5 (Рис. 4, *б*, *з*).

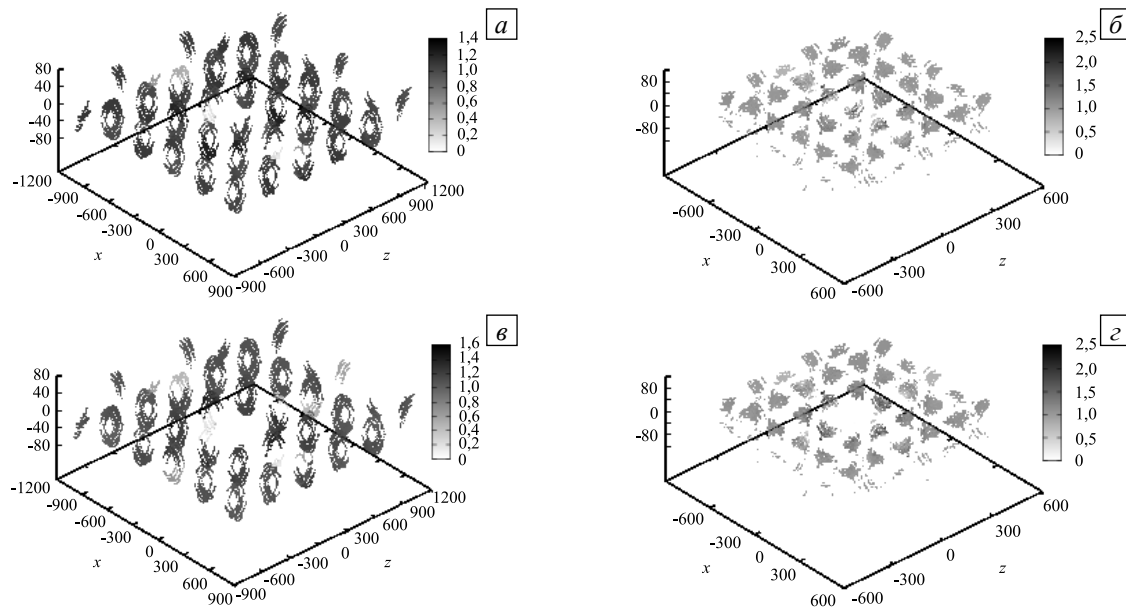


Рис. 4. Распределение коэффициентов концентрации интенсивностей напряжений во фрагменте тканого композита с локальным разрывом нити основы (*a*, *б*), с локальным разрывом нитей основы и утка (*в*, *з*) при следующих условиях контакта между нитями: наличие гарантированной прослойки матрицы (*a*, *в*); контакт с трением и присутствие пустот (*б*, *з*)

В таблице 2 представлены максимальные значения коэффициентов $K_{\sigma_{ij}}$ в матрице слоя тканого композита в геометрическом центре межволоконного пространства вблизи дефекта. Области, в которых анализировалось напряженное состояние, выбирались так, чтобы исключались точки сингулярности поля напряжений, которые могут возникать на границах полостей технологических дефектов [11]. Как видим, в случаях разрыва нитей и при условии, что каждое волокно композита окружено гарантированным слоем матрицы (Рис. 4, *a*), наибольший вклад в величины коэффициентов концентрации напряжений вносит нормальная (σ_{33}) составляющая тензора напряжений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при макроскопически однородном чистом формоизменении фрагмента тканого композита разрушение матрицы в рассматриваемой точке может быть инициировано по механизму отрыва в направлении утка.

Таблица 2. Максимальные коэффициенты концентрации напряжений в матрице слоя тканого композита

Вид локального дефекта	Условие контакта между нитями	Значения коэффициентов концентрации					
		$K_{\sigma_{11}}$	$K_{\sigma_{22}}$	$K_{\sigma_{33}}$	$K_{\sigma_{12}}$	$K_{\sigma_{13}}$	$K_{\sigma_{23}}$
Разрыв нити основы	Наличие гарантированной прослойки матрицы	1,34	1,02	2,00	1,21	1,06	1,15
	Контакт с трением	1,39	1,86	2,72	1,31	1,13	1,32
Разрыв нити основы и дополнительное насыщение образующейся поры	Наличие гарантированной прослойки матрицы	1,36	1,13	1,99	1,15	0,96	1,09
	Контакт с трением	1,30	3,44	5,41	0,99	0,88	1,87
Разрыв нитей основы и утка	Наличие гарантированной прослойки матрицы	1,50	1,47	2,24	1,24	0,98	1,30
	Контакт с трением	1,41	2,00	1,05	1,41	1,05	1,76
Разрыв нитей основы и утка и дополнительное насыщение образующейся поры	Наличие гарантированной прослойки матрицы	1,38	1,21	2,16	1,18	1,06	1,32
	Контакт с трением	1,24	4,68	1,39	1,07	0,96	2,08

При наличии контакта с трением между искривленными волокнами тканого композита значения коэффициентов концентрации напряжений увеличиваются в $1,4 \div 2,7$ раз (Табл. 2). Это связано, прежде всего, с тем, что в этом случае в слое армированного материала кроме концентраторов, вызванных контактом с трением, в местах наибольшего искривления переплетенных нитей появляются внутренние замкнутые области, не содержащие материала связующего. Дополнительное насыщение полости, возникающей на месте разрыва основы и утка, не приводит к смене механизма возможного разрушения слоя: как и прежде, начало потери несущей способности соответствует появлению отрыва в направлении оси x_3 . В случае такого дефекта как разрыв нити основы насыщение материалом матрицы полости, возникающей в месте разрыва, влечет за собой локальное изменение симметрии армирующего каркаса (в масштабах, соизмеримых с характерным размером волокон) и, как следствие, смену механизма разрушения (об этом свидетельствует увеличение в $1,9 \div 2,3$ раза значения коэффициента $K_{\sigma_{22}}$). Здесь доминирующим механизмом разрушения является разрыв матрицы в направлении, перпендикулярном плоскости слоя.

5. Заключение

В работе построена математическая модель слоя тканого композита с полимерными или поликристаллическими матрицами и искривленными керамическими волокнами плотного переплетения с наличием локальных технологических дефектов в виде разрывов волокон основы и утка, а также внутренних технологических пор. Определены величины коэффициентов концентрации напряжений при чистом макроскопически однородном формоизменении. Установлены механизмы, инициирующие разрушение матрицы при том или ином типе дефектов. Показано, что в условиях контакта с трением заполнение материалом связующего полостей, образованных разрывами нитей, меняет механизм разрушения матрицы: разрыв матрицы тканого композита происходит в направлении, перпендикулярном плоскости слоя.

При включении в технологический цикл выработки ткани дополнительных операций, обеспечивающих проникновение материала матрицы в полости, образованные локальными дефектами, можно снизить концентрацию напряжений и тем самым повысить способность материала сопротивляться внешним силовым нагрузкам. В противном случае количество дефектов будет увеличиваться и инициировать разрушение материала матрицы по механизмам сдвига и расслоения тканого композита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-96033-р_урал_a).

Литература

1. Суровикин В.Ф., Суровикин Ю.В., Цеханович М.С. Новые направления в технологии получения углерод-углеродных материалов. Применение углерод-углеродных материалов // Российский химический журнал. – 2007. – Т. LI, № 4. – С. 111-119.
2. Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H., Hirose S. Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms // Compos. Sci. Technol. – 2007. – V. 67, N. 9. – P. 1870-1891. DOI
3. Verpoest I., Lomov S.V. Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis // Compos. Sci. Technol. – 2005. – V. 65, N. 15-16 Spec. Iss. – P. 2563-2574. DOI
4. Shokrieh M.M., Lessard L.B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part II: Material characterization and model verification // J. Compos. Mater. – 2000. – V. 34, N. 13. – P. 1081-1116. DOI
5. Nishikawa Y., Okubo K., Fujii T., Kawabe K. Fatigue crack constraint in plain-woven CFRP using newly-developed spread tows // Int. J. Fatigue. – 2006. – V. 28, N. 10. – P. 1248-1253. DOI
6. Hufenbach W., Błażejowski W., Kroll L., Böhm R., Gude M., Czulak A. Manufacture and multiaxial test of composite tube specimens with braided glass fibre reinforcement // J. Mater. Process. Tech. – 2005. – V. 162-163. – P. 65-70. DOI
7. Иманкулова А.С. Текстильные композиты. – Б.: Издательский центр «МОК», 2005. – 152 с.
8. Bergeaud V., Lefebvre V., Rossignon E. SALOME 6. The Open Source integration platform for numerical simulations. – 2012. <http://salome-platform.org/user-section/salome-brochure> (дата обращения: 11.02.2013).
9. Abbas M. Discrete formulation of the contact-friction. – 2011. – 55 p. (URL: http://www.code-aster.org/V2/doc/v10/en/man_r/r5/r5.03.50.pdf)
10. Тарнопольский Ю.М., Розе А.В., Жигун И.Г., Гуняев Г.М. Конструкционные особенности материалов, армированных высокомодульными волокнами // Механика полимеров. – 1971. – № 4. – С. 676-685.
11. Матвеев В.П., Федоров А.Ю. Оптимизация геометрии составных упругих тел как основа совершенствования методик испытаний на прочность клеевых соединений // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4, № 4. – С. 63-70. DOI

Поступила в редакцию 04.02.13; опубликована в электронном виде 25.04.13

Сведения об авторах

Дедков Денис Владимирович, ст. преп., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 15/Д; E-mail: Denis.v.dedkov@gmail.com
Ташкинов Анатолий Александрович, д.ф.м.н., проф., ректор, ПНИПУ; E-mail: rector@pstu.ru