

# Механика деформируемого твёрдого тела

УДК 539.3

## КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОЕ ТКАНОГО КОМПОЗИТА С ЛОКАЛЬНЫМИ ДЕФЕКТАМИ ПРИ ДВУХОСНОМ ОДНОРОДНОМ РАВНОКОМПОНЕНТНОМ МАКРОДЕФОРМИРОВАНИИ

*Д. В. Дедков, А. В. Зайцев*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29.

E-mails: denis.v.dedkov@gmail.com, zav@pstu.ru

*Разработана модель слоя тканого композита полотняного плетения с поликристаллической матрицей. При двухосном равнокомпонентном макродеформировании на основе численного решения краевых задач методом конечных элементов определены коэффициенты концентрации напряжений, вызванные наличием локальных технологических дефектов в виде разрыва нитей утка и закрытых пор. Численное решение краевых задач методом конечных элементов проведено с использованием неkomмерческого пакета Code-Aster, входящего в состав платформы SALOME-MECA. Определены области внутри слоя тканого композита, в которых коэффициенты концентрации напряжений достигают максимальных значений. Установлено, что контакт с трением между нитями армирующего каркаса (по сравнению с обеспечением условий наличия гарантированного слоя матрицы вокруг каждого волокна) является причиной значительного увеличения значений коэффициентов концентрации напряжений, а главными механизмами, инициирующими разрушение поликристаллической матрицы, являются сдвиги. Показано, что с помощью технологических операций, обеспечивающих заполнение материалом матрицы полостей локальных дефектов, можно снизить концентрацию напряжений и повысить способность материала сопротивляться внешнему силовому воздействию.*

**Ключевые слова:** *тканый композит с искривлёнными волокнами, поликристаллическая матрица, локальный технологический дефект, внутренняя пора, контакт с трением, разрыв волокна, коэффициенты концентрации напряжений, двухосное равнокомпонентное макродеформирование.*

**Введение.** В настоящее время тканые композиционные материалы получили широкое распространение в авиационной, космической и автомобильной промышленности, судостроении, строительстве, производстве медицинского оборудования и спортивного снаряжения. Отличительной особенностью процесса изготовления готового изделия из этих материалов является раскрой и выкладка на оправку слоев ткани (полотняной, сатиновой, саржевой и др.), а также прошивка этих слоев между собой. Полученный армирующий каркас насыщается полимерной или поликристаллической матрицей, в результа-

---

*Денис Владимирович Дедков, старший преподаватель, каф. механики композиционных материалов и конструкций. Алексей Вячеславович Зайцев (к.ф.-м.н., доц.), доцент, каф. механики композиционных материалов и конструкций.*

те чего происходит одновременное создание самого элемента конструкции и композиционного материала, из которого он изготовлен [1].

При производстве тканых композитов неизбежны технологические дефекты (обнаруживаются только на этапе выходного ультразвукового контроля), снижающие эксплуатационные свойства изделий. К числу типичных дефектов относятся отсутствие (пропуск) нитей основы или утка в исходных слоях ткани, разрывы волокон при сшивке слоев, а также герметичные внутренние поры, которые возникают при соприкосновении нитей армирующего каркаса в процессе изготовления ткани или выкладке слоёв. Эти области труднодоступны для проникновения полимерного связующего при вакуумировании, доуплотнении или пропитке под давлением. Гарантированное обеспечение наличия в этих участках поликристаллической матрицы (углеродной, осаждаемой из газовой фазы или получаемой при карбонизации полимеров), матрицы на основе терморасширенного графита или керамики также затруднено. Это связано прежде всего с тем, что, во-первых, образующийся на поверхности нитей слой осаждаемого материала препятствует дальнейшему насыщению каркаса поликристаллической матрицей и, во-вторых, заполнение внутренних пор исключается самими переплетенными волокнами основы и утка.

Использование тканых композитов в элементах конструкций ответственного назначения, работающих в условиях многократно изменяющихся внешних нагрузок в течение длительных сроков эксплуатации, предопределяет необходимость не только прогнозирования эффективных деформационных характеристик, но и проведения уточнённого прочностного анализа. Это, в свою очередь, актуализирует построение математических моделей поведения слоев этих материалов с локальными дефектами при комбинированных многоосных квазистатических нагружениях [2, 3].

В настоящей работе решена более частная задача по определению коэффициентов концентрации напряжений в слое композита с поликристаллической матрицей, вызванных сложной геометрией полотняного плетения нитей (саржа 1/1 с равными рапортами по основе и утку) и наличием локальных технологических дефектов (внутренними порами и локальными разрывами нитей), а также по выявлению механизмов, определяющих сценарии начального разрушения материала, при двухосном пропорциональном макродеформировании.

**1. Геометрическая модель.** Рассмотрим слой тканого композита с армирующим каркасом полотняного переплетения, образованного волокнами круглого поперечного сечения постоянного диаметра  $D$ , толщина которого составляет  $2,5D$ . Будем считать, что искривление нитей основы и утка ткани задаётся дугой окружности  $a$  с центральным углом  $\alpha = \pi/4$  и прямой  $b$  [4].

Выбор полотняного переплетения обеспечивает, с одной стороны, наиболее короткие перекрытия нитей, наибольшую прочность, плотность и повышенную жесткость, однородную, геометрически идентичную с лицевой и изнаночной стороны поверхность ткани, с другой — наличие внутренних технологических пор. В тканых композитах армирующий каркас несёт силовую нагрузку, а матрица служит для перераспределения напряжений между нитями. В процессе изготовления композита не удаётся исключить соприкосновения нитей основы и утка. Поэтому будем предполагать, что искривленные волокна, принадлежащие слоям с идеальной периодической структурой,

не всегда окружены гарантированным слоем поликристаллической матрицы и содержат локальные замкнутые технологические поры.

Технологические напряжения в нитях армирующего каркаса, возникающие из-за предварительного закручивания и/или искривления волокон при переплетении, а также изменения внутренней структуры при предварительном нагреве (особенно актуально для полиамидных нитей) могут оказывать существенное влияние на механическое поведение ткани при нагружении. Однако определение этих напряжений и их учёт представляют отдельные самостоятельные задачи, выходящие за рамки проведённого исследования. Несмотря на высокую жёсткость керамических нитей и высокую плотность ткани полотняного плетения, деформации армирующего каркаса при нагружении могут быть конечными и приводить к изменению конфигурации петель, изменению ориентации и удлинению, смещению точек контакта между волокнами основы и утка. Так, например, известен эффект «пантографа», наблюдаемый при растяжении тканей на основе углеродных волокон [5, 6]. Этот эффект заключается в значительном искажении геометрии ячеек ткани и поперечного сечения арматуры при наличии неподвижных точечных контактов в местах наибольшей кривизны соприкасающихся нитей. Однако насыщение армирующего каркаса матрицей практически полностью исключает эти искажения, поэтому регистрируемые в экспериментах деформации можно считать малыми. А форму поперечного сечения и геометрию переплетения волокон (углы  $\alpha$ ) при построении модели тканого композита можно считать заданными и остающимися неизменными при нагружении слоя.

Построение геометрической модели слоя тканого композита будем проводить с помощью геометрического модуля **GEOM**, входящего в состав платформы **SALOME-MECA** с открытыми исходными кодами, которая представляет собой набор пре- и постпроцессинга. Первоначально задуманная как программное обеспечение **CAD-CAE**, **SALOME** реализует возможности параллельных вычислений, объединяет модули, применяемые в различных приложениях численного моделирования и **CAIP**<sup>1</sup>. Так, например, платформа **SALOME** используется как база для проекта **NURESIM** (European Platform for **NU**clear **RE**actor **SIM**ulations), предназначенного для полномасштабного моделирования реакторов.

На рис. 1 представлены фрагменты слоя тканого композита, армирующий каркас которого образован полотняным переплетением утка и основы (с коэффициентами армирования  $\alpha_1 = \alpha_3 = 0,14$  соответственно). Здесь и далее оси  $x_1$  и  $x_3$  ортогональной декартовой системы координат будут принадлежать плоскости слоя.

В рассматриваемом случае локальными концентраторами напряжений являются технологические поры, вызванные короткими перекрытиями нитей армирующего каркаса и соприкосновением волокон с целью обеспечения наибольшей плотности материала. Эти поры возникают в областях, расположенных вблизи участков волокон с наибольшей кривизной (рис. 2), а дефекты, связанные со случайными разрывами нитей утка (рис. 1, а) или основы и утка (рис. 1, б), возникают в процессе прошивки слоёв. Обратим внимание на то, что локальные разрывы нитей армирующего каркаса могут иметь место и в исходной ткани до прошивки. Размеры образующейся в результате по-

<sup>1</sup>[http://files.salome-platform.org/Salome/Common/SALOME6\\_brochure.pdf](http://files.salome-platform.org/Salome/Common/SALOME6_brochure.pdf)

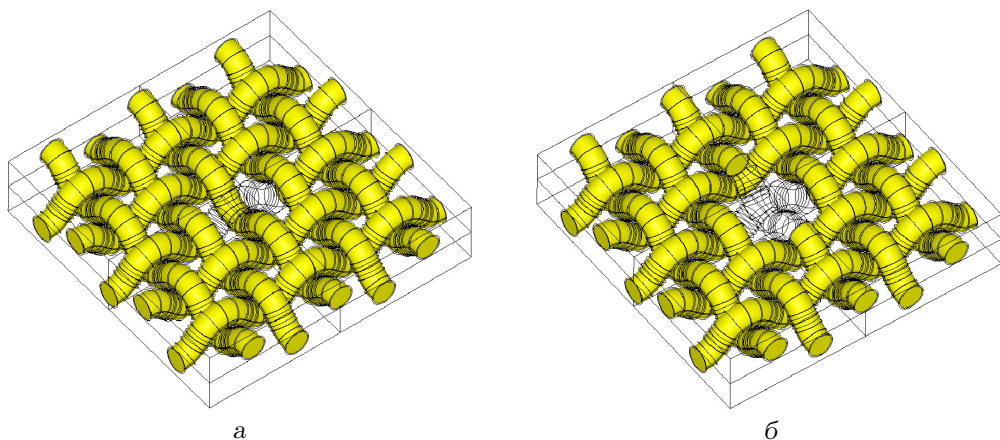


Рис. 1. Локальные разрывы армирующих нитей слоя тканого композита полотняного плетения

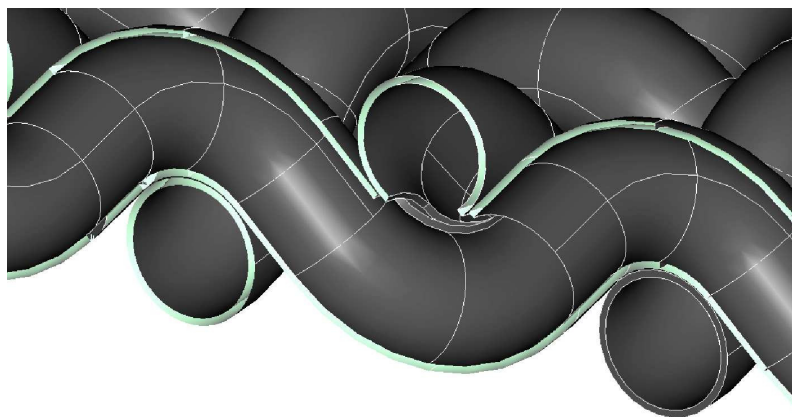


Рис. 2. Герметичная внутренняя технологическая пора при полотняном переплетении армирующих нитей

лости соизмеримы с характерными размерами неоднородностей, не изменяют значительно интегральные коэффициенты армирования композита, могут оказаться заполненными материалом матрицы, если технологический процесс предусматривает дополнительную пропитку полимерным связующим с последующей карбонизацией или досаждением поликристаллического материала из газовой фазы, или оставаться незаполненными.

**2. Краевая задача.** Будем, для простоты, предполагать, что волокна и матрица слоя модельного тканого композита, занимающего область  $\Omega$ , изотропные, линейно упругие, не изменяющие геометрию, взаимное расположение и тип симметрии при нагружении. Тогда компоненты тензора напряжений  $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$  удовлетворяют уравнениям равновесия

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

а компоненты тензора малых деформаций  $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})$  связаны с компонентами век-

тора перемещений  $u_i(\mathbf{r})$  геометрическими соотношениями Коши

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

Введём для описания геометрии слоя тканого композита единичную ку-сочно-однородную индикаторную функцию  $\lambda(\mathbf{r})$  радиус-вектора  $\mathbf{r}$ , которая принимает значения 1 и 0 в зависимости от того, принадлежит ли точка армирующим нитям (основе или утку) или матрице. Тогда определяющие соотношения могут быть записаны следующим образом:

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

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

Краевая задача (1)–(3) дополняется граничными условиями

$$\begin{aligned} [\hat{\varepsilon}_1^* x_1] |_{\Gamma_2} &= u^0, & [\hat{\varepsilon}_3^* x_3] |_{\Gamma_1} &= u^0, \\ u_1(\mathbf{r}) |_{\Gamma_4} &= u_3(\mathbf{r}) |_{\Gamma_3} = u_2(\mathbf{r}) |_{\Gamma_5} = u_2(\mathbf{r}) |_{\Gamma_6} = 0, \\ \sigma_{12}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_4} &= \sigma_{13}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_4} = \sigma_{13}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_3} = \sigma_{23}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_3} = 0, \\ \sigma_{12}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_5} &= \sigma_{13}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_5} = \sigma_{12}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_6} = \sigma_{13}(\mathbf{r}) |_{\Gamma_6} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

обеспечивающими заданное однородное равнокомпонентное макродеформирование в плоскости слоя. Здесь

$$\varepsilon_{ij}^* = \hat{\varepsilon}_k^* \delta_{ik} \delta_{jk} = \frac{1}{\text{mes}\Omega} \int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) d\Omega.$$

Условия идеального сопряжения

$$\begin{aligned} [\sigma_{ij}(\mathbf{r}) n_j] |_{\Gamma_7^+} &= [\sigma_{ij}(\mathbf{r}) n_j] |_{\Gamma_7^-}, \\ [u_i(\mathbf{r})] |_{\Gamma_7^+} &= [u_i(\mathbf{r})] |_{\Gamma_7^-} \end{aligned} \quad (5)$$

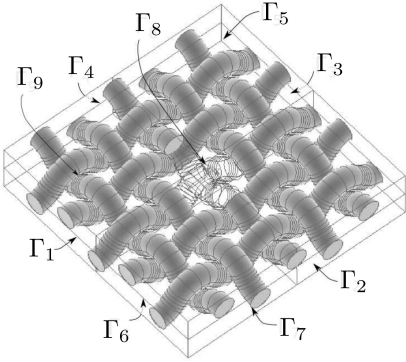


Рис. 3. Фрагмент тканого композита плотняного плетения с локальными технологическими дефектами

на границах раздела фаз  $\Gamma_7$  (рис. 3) описывают совместное деформирование армирующего каркаса и поликристаллической матрицы. Будем предполагать, что на этих границах также отсутствуют химические реакции и фазовые переходы в процессе нагружения слоя.

В случае, если в модельном материале не исключается возможность контакта нитей основы и утка, на соответствующих поверхностях  $\Gamma_9$  (положение и геометрия которых заданы и неизменны в процессе нагружения слоя [5, 6]) считаются справедливыми условия контакта с кулоновским трением: если  $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^+} < [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^-}$ , то

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

а если  $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^+} \geq [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})|]_{\Gamma_9^-}$  или  $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^-} \geq [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})|]_{\Gamma_9^+}$ , то

$$[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^+} \geq [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})|]_{\Gamma_9^-}, \quad [\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^-} \geq [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})|]_{\Gamma_9^+}, \quad (7)$$

$$[u_n(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^+} = [u_n(\mathbf{r})]_{\Gamma_9^-}.$$

Здесь  $f$  — статический коэффициент трения, индексы  $n$  и  $\tau$  определяют направление внешней нормали и касательной к поверхности  $\Gamma_9$ .

Герметичные внутренние поры — полости, недоступные для материала матрицы, имеют внутреннюю поверхность  $\Gamma_8$ , на которой отсутствуют ограничения на перемещения, а сама поверхность свободна от напряжений:

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

**3. Влияние локальных концентраторов напряжений.** Краевая задача (1)–(3) с граничными условиями (4)–(8) решается численно методом конечных элементов в некоммерческом пакете **Code-Aster**, входящем в платформу **SALOME-MECA**. Этот пакет был разработан и сертифицирован специально для французской энергетической отрасли и предназначен для решения задач механики сплошных сред, термо- и гидродинамики, акустики и магнетизма, выполнения расчётов для строительных конструкций и сооружений.

Дискретизация фрагмента проводилась на 16-узловые тетраэдральные и 20-узловые гексаэдральные изопараметрические элементы. На рис. 4 представлена дискретизация области матрицы слоя модельного тканого композита полотняного плетения. Сетка сгущалась в областях, имеющих наибольшую кривизну и располагающихся вблизи поверхности контакта нитей армирующего каркаса, а также в местах расположения внутренних технологических пор. Степень дискретизации 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 условиям удовлетворяют конечно-элементные сетки, параметры которых представлены в табл. 1.

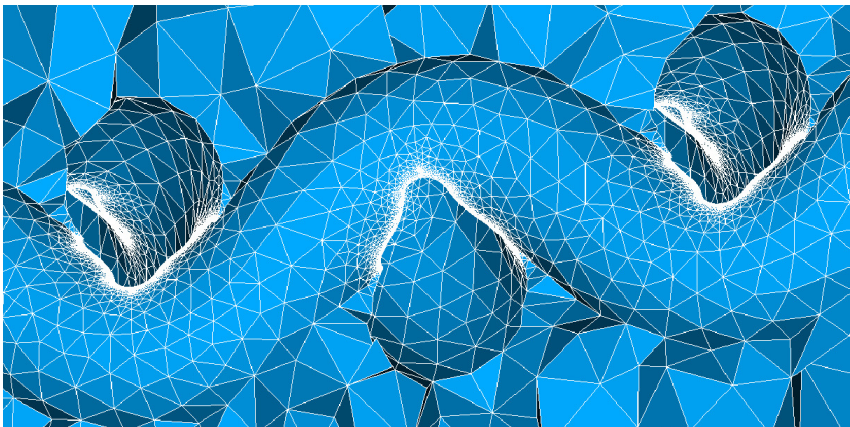


Рис. 4. Дискретизация объемов поликристаллической матрицы слоя тканого композита

Значения, стоящие в числителе, соответствуют слою модельного тканого композита, в котором каждая нить армирующего каркаса окружена гарантированным слоем матрицы, а в знаменателе — материалу, в котором нити основы и утка имеют общую поверхность контакта с трением. В работах [2, 3] описан алгоритм учёта контактов между нитями с кулоновским трением и представлены результаты исследования сходимости численных решений при чистом формоизменении слоя полотняного плетения.

В табл. 2 представлены максимальные безразмерные коэффициенты  $K_{\sigma_{ij}} = \sigma_{ij}(\mathbf{r})/\sigma_{ij}^{per}(\mathbf{r})$  при равнокомпонентном двухосном однородном макродеформировании, которые вычисляются отношениями значений компонент тензора напряжений в геометрическом центре межволоконного пространства в слое модельного тканого композита вблизи локального дефекта к соответствующим компонентам в слое материала идеальной периодической структуры в той же точке. Такой выбор точки обусловлен необходимостью исключить сингулярности напряжений, возникающие на границах полостей технологических дефектов. Значения в числителе были определены в случае, когда каждая нить армирующего каркаса окружена гарантированным слоем матрицы, а в знаменателе — в случае, когда нити основы и утка имеют общую поверхность контакта с трением, а между участками с наибольшей кривизной располагается внутренняя пора. При численном решении краевых задач модуль Юнга  $E_f = 280$  ГПа и коэффициент Пуассона  $\nu_f = 0,20$  волокон соответствовали данным работы [7], а упругие модули поликристаллической матрицы были выбраны следующими:  $E_m = 0,28$  ГПа и  $\nu_m = 0,40$ . Статический коэффициент трения  $f = 0,12$  соответствовал случаю скольжения волокна по поверхности поликристаллической матрицы.

Как видим, в случаях локального разрыва нити основы и при условии, что каждое волокно композита окружено гарантированным слоем матрицы,

Таблица 1

**Параметры конечно-элементной сетки**

Вид структуры	Тип элементов и их количество	
	тетраэдральные	гексаэдральные
Бездефектная идеальная периодическая	298 255	77 760
	405 480	77 760
Разрыв волокна основы	285 466	75 168
	405 480	75 168
Разрыв волокон основы и утка	279 276	72 576
	405 480	72 576

Таблица 2

**Максимальные коэффициенты концентрации напряжений в матрице слоя тканого композита**

Вид локального дефекта	Значения коэффициентов концентрации					
	$K_{\sigma_{11}}$	$K_{\sigma_{22}}$	$K_{\sigma_{33}}$	$K_{\sigma_{12}}$	$K_{\sigma_{13}}$	$K_{\sigma_{23}}$
Разрыв нити основы	1,47	2,33	1,71	0,97	1,96	1,47
	1,38	3,90	1,71	1,07	1,62	1,07
Разрыв нити основы (доуплотнение)	1,29	1,13	0,94	1,16	1,27	1,24
	1,17	3,18	2,29	0,91	1,65	1,38
Разрыв нитей основы и утка	1,32	1,09	0,96	0,95	2,90	1,55
	1,32	4,16	1,85	1,16	1,64	2,27
Разрыв нитей основы и утка (доуплотнение)	1,18	0,98	0,98	1,01	1,06	1,14
	1,47	2,48	1,80	0,97	1,47	1,34

наибольший вклад в величины коэффициентов концентрации напряжений вносят нормальная  $\sigma_{22}$  и касательная  $\sigma_{12}$  составляющие тензора напряжений. Контакт с трением между волокнами увеличивает в 1,67 и в 1,10 раз значения коэффициентов  $K_{\sigma_{22}}$  и  $K_{\sigma_{12}}$  (табл. 2) при заметном снижении других коэффициентов. Это, прежде всего, связано с изменением типа напряжённо-деформированного состояния из-за совместного влияния контактных условий и внутренних замкнутых областей, не содержащих материала матрицы, в местах наибольшего искривления переплетённых нитей. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разрушение матрицы в рассматриваемых случаях может быть инициировано механизмами межслойного отрыва и продольного сдвига.

Одновременный локальный разрыв нитей основы и утка приводит к локальному изменению симметрии армирующего каркаса (в масштабах, соизмеримых с характерным размером волокон) и, как следствие, к смене механизмов разрушения. Наиболее опасными с точки зрения разрушения матрицы, слой которой гарантированно окружает каждое волокно, являются поперечные и продольные сдвиги. Вместе с тем потеря несущей способности, вызванная отрывом по причине растяжения в направлении нитей основы, также может произойти. Об этом свидетельствуют значения коэффициентов  $K_{\sigma_{11}}$ ,  $K_{\sigma_{13}}$  и  $K_{\sigma_{23}}$  (табл. 2). Несмотря на отмеченные выше закономерности, при равнокомпонентном макродеформировании наличие в материале точечных контактов с трением и внутренних замкнутых полостей, не содержащих материала матрицы, свидетельствует о доминировании механизмов межслойного отрыва и продольного сдвига в плоскости  $x_2x_3$ .

Обратим внимание на то, что дополнительное насыщение полости, возникающей на месте разрыва нитей основы (или основы и утка), материалом матрицы связано с ещё большим локальным изменением симметрии слоя тканого композита. При равнокомпонентном макродеформировании это приводит к значительному (до 2,73 раз) снижению значений коэффициентов концентрации напряжений в тканом композите, весь армирующий каркас которого окружён слоем матрицы. Если в материале не исключены точечные контакты между переплетёнными нитями и присутствуют закрытые полости, процедура доуплотнения материалом матрицы областей, образующихся в результате одновременного локального разрыва волокон основы и утка, приводит к снижению коэффициентов концентрации напряжений (до 1,68 раза), а процедура доуплотнения пор, вызванных разрывом только нитей основы, — к росту в 1,34 раза коэффициента  $K_{\sigma_{33}}$  при снижении остальных. Это свидетельствует о смене доминирующего механизма разрушения: потеря несущей способности слоя тканого композита происходит по механизму отрыва, вызванного локальным растяжением матрицы в направлении утка.

Результаты расчётов показали, что расположение областей, в которых интенсивность напряжений достигает максимальных значений в местах, где искривленные волокна основы или утка имеют наибольшую кривизну, строго периодически. Исключение составляют области, расположенные вблизи локального разрыва утка или одновременного разрыва основы и утка, где интенсивность напряжений превышает соответствующее значение, определённое для композита идеальной периодической структуры в 1,4 и в 1,6 раз в случае, если нить армирующего каркаса окружена гарантированным слоем



матрицы. Если в слое тканого композита не исключена возможность контакта с кулоновским трением искривленных нитей, а также присутствуют локальные поры в местах наибольшей кривизны волокон, то коэффициенты концентрации для рассматриваемых случаев увеличиваются до 2,5.

**Заключение.** На основе построенной модели слоя тканого композита плотняного плетения с поликристаллической матрицей определены коэффициенты концентрации напряжений, вызванные наличием локальных технологических дефектов в виде разрыва нити утка, одновременного разрыва нитей основы и утка, а также наличия закрытых пор при однородном двухосном равнокомпонентном макродеформировании, определены механизмы, инициирующие разрушение матрицы.

Полученные результаты позволяют также сделать вывод о том, что для повышения способности тканого композита сопротивляться внешнему силовому воздействию необходимо предусмотреть в технологическом процессе операции, обеспечивающие проникновение матрицы в полости технологических локальных дефектов, а также дополнительную пропитку связующим, доуплотнение с последующей карбонизацией или доосаждение поликристаллической матрицы из газовой фазы в случае, если в результате ультразвукового контроля готового изделия обнаруживаются локальные разрывы нитей армирующего каркаса или закрытые внутренние поры.

Авторы признательны д.ф.-м.н., профессору А. А. Ташкинову за постоянное внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект РФФИ–Урал № 11–01–96033).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. Ф. Суrowикин, Ю. В. Суrowикин, М. С. Цеханович, “Новые направления в технологии получения углерод-углеродных материалов. Применение углерод-углеродных материалов” // *Рос. хим. ж.* (*Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева*), 2007. Т. LI, № 4. С. 111–118; англ. пер.: V. F. Surovikin, Yu. V. Surovikin, M. S. Tsekhanovich, “New fields in the technology for manufacturing carbon-carbon materials. Application of carbon-carbon materials” // *Rus. J. Gen. Chem.*, 2007. Vol. 77, no. 12. Pp. 2301–2310.
2. Д. В. Дедков, А. В. Зайцев, А. А. Ташкинов, “Концентрация напряжений в слое тканого композита с закрытыми внутренними технологическими порами” // *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2011. № 4. С. 29–36. [D. V. Dedkov, A. V. Zaitsev, A. A. Tashkinov, “Stress concentration at a hooked-fiber textile composite layer with closed internal pores” // *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2011. no. 4. Pp. 29–36].
3. Д. В. Дедков, А. А. Ташкинов, “Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами при чистом формоизменении” // *Вычислительная механика сплошных сред*, 2013. № 6. С. 103–109. [D. V. Dedkov, A. A. Tashkinov, “Stress concentration coefficients of a woven textile composite layer with local processing defects under pure forming conditions” // *Computational Continuum Mechanics*, 2013. no. 6. Pp. 103–109].
4. А. С. Иманкулова, *Текстильные композиты*. Бишкек: МОК, 2005. 152 с. [A. S. Imankulova, *Textile Composites*. Bishkek: МОК, 2005. 152 pp.]
5. J. Cao, R. Akkerman, P. Boisse, J. Chen, H. S. Cheng, E. F. de Graaf, J. L. Gorczyca, P. Harrison, G. Hivet, J. Launay, W. Lee, L. Liu, S. V. Lomov, A. Long, E. de Luycker, F. Morestin, J. Padvoiskis, X. Q. Peng, J. Sherwood, Tz. Stoilova, X. M. Tao, I. Verpoest, A. Willems, J. Wiggers, T. X. Yu, B. Zhu, “Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results” // *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 2008. Vol. 39, no. 6. Pp. 1037–53.
6. P. Harrison, M. J. Clifford, A. C. Long, “Shear characterisation of viscous woven textile

composites: a comparison between picture frame and bias extension experiments" // *Composites Sci. Technol.*, 2004. Vol. 64, no. 10–11. Pp. 1453–1465.

7. Ю. М. Тарнопольский, А. В. Розе, И. Г. Жигун, Г. М. Гуняев, "Конструкционные особенности материалов, армированных высокомодульными волокнами" // *Механика полимеров*, 1971. № 4. С. 676–685; англ. пер.: Yu. M. Tarnopol'skii, A. V. Roze, I. G. Zhigun, G. M. Gunyaev, "Structural characteristics of materials reinforced with high-modulus fibers" // *Polymer Mechanics*, 1971. Vol. 7, no. 4. Pp. 600–609.

Поступила в редакцию 07/X/2013;  
в окончательном варианте — 15/XI/2013.

MSC: 74G70, 74E30; 74E25, 74M10

## STRESS CONCENTRATION AT A HOOKED-FIBER TEXTILE COMPOSITE LAYER WITH LOCAL TECHNOLOGICAL DEFECTS UNDER BIAxIAL TENSION ON TRANSVERSAL ORIGIN

*D. V. Dedkov, A. V. Zaitsev*

Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy Prospekt, Perm, 614990, Russia.

E-mails: denis.v.dedkov@gmail.com, zav@pstu.ru

*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) under symmetric biaxial macrodeformation are obtained. The numerical solution by the finite-element method is received using the part of SALOME-MECA framework, the non-commercial package Code-Aster. The regions of maximum stress disturbance coefficients in the textile composite layer are determined. The cause of marked increase of stress disturbance coefficients is the contact with friction between the fibers of reinforcing skeleton and the shifts are the main mechanisms of polycrystalline matrix damaging. 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.*

**Keywords:** *woven textile composite, polycrystalline matrix, local processing defect, contact with friction, break in a fiber, stress concentration factors, symmetric biaxial macrodeformation.*

Original article submitted 07/X/2013;  
revision submitted 15/XI/2013.