



Дедков Денис Владимирович

**Математическая модель механического  
поведения тканых композитов с локальными  
технологическими дефектами**

05.13.18 — Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,*  
*профессор,*

*Ташкинов Анатолий Александрович*

Официальные оппоненты: *Панин Сергей Викторович,*

*доктор технических наук, профессор,*  
*зам. директора по научной работе, зав. лабораторией*  
*«Механика полимерных композиционных материалов»,*  
*ФГБУН «Институт физики прочности и*  
*материаловедения СО РАН»*

*Устинов Константин Борисович, кандидат*  
*физико-математических наук, старший*  
*научный сотрудник лаборатории геомеханики,*  
*ФГБУН «Институт проблем механики*  
*им. А. Ю. Ишлинского РАН»*

Ведущая организация: *ФГБОУ ВПО «Самарский государственный*  
*технический университет»*

Защита состоится «07» апреля 2015 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.188.08 при ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», расположенном по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета ([www.pstu.ru](http://www.pstu.ru)).

Автореферат разослан «11» февраля 2015 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.188.08,  
кандидат физико-математических наук, доцент



*А. И. Швейкин*

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Производство композиционных материалов увеличивается с каждым годом. Создание новых материалов играет ключевую роль в развитии энергетических, космических, химических и биотехнологических систем, строительстве и других отраслях промышленности. Так, например, в аэрокосмической технике из композитов с керамическими волокнами изготавливают несущие панели крыла оперения и фюзеляжа самолетов, обшивки панелей крупногабаритных антенн, работающих в космосе, лопадки турбин, сопловые блоки, носовые обтекатели и многие другие изделия, эксплуатируемые в условиях интенсивного термомеханического воздействия.

Совершенство технологии изготовления изделий из композиционных материалов определяется выбором оптимальных параметров процесса, техническим уровнем используемого оборудования и оснастки, наличием надежных методов неразрушающего контроля элементов конструкций и полуфабрикатов для их производства. При производстве тканых композитов неизбежны технологические дефекты, снижающие эксплуатационные свойства конструкций. К числу типичных дефектов относятся пропуск нитей основы или утка, разрывы нитей при прошивке слоев, а также внутренние поры, обнаруживаемые, как правило, на этапе выходного контроля изделия.

Использование тканых композитов в элементах конструкций, работающих в условиях многократно изменяющихся внешних нагрузок в течение длительных сроков эксплуатации, предопределяет необходимость прогнозирования механического поведения материалов с учетом технологических дефектов. Изучению механического поведения композитов посвящены многочисленные исследования, результаты которых обобщены в монографиях Г. А. Ванина, В. В. Васильева, С. Д. Волкова, Ю. И. Димитриенко, Р. Кристенсена, Б. Е. Победри, Ю. М. Тарнопольского, Т. Д. Шермергора и др. Математические модели процессов деформирования композитов с учетом неоднородности их структуры разрабатывались и изучались А. Н. Аношкиным, В. Э. Вильдеманом, А. В. Гордеевым, А. В. Зайцевым, Р. А. Каюмовым, В. М. Корневым, А. С. Креггерсом, Н. К. Кучером, В. И. Кучерюком, С. А. Лурье, А. Г. Николаевым, В. А. Скрипняком, Ю. В. Соколкиным, А. А. Ташкиновым, В. Е. Шавшуковым, S. Abrate, R. L. Actis, P. P. Camanho, J. Fish, S. Ghosh, J. G. Goree, T. G. Gutowski, S. S. Kessler, R. V. Kohn, H. A. Whitworth и др. Мо-

делированию механического поведения тканых композитов с искривленными волокнами и переплетениями различного типа посвящены многочисленные публикации сотрудников Католического университета Лёвена (научные группы С. В. Ломова и И. Ферпуста), которые на протяжении последних десяти лет занимаются разработкой специализированных пакетов прикладных программ для описания геометрии и численного решения краевых задач методом конечных элементов. Однако изучению влияния локальных технологических дефектов на механическое поведение, прочностные и деформационные свойства тканых композитов уделяется недостаточное внимание. Прежде всего это связано со сложностью построения дискретных моделей для трехмерных неоднородных структур с учетом искривления и переплетения волокон, отсутствием эффективных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов в задачах механики тканых композитов с технологическими дефектами, вычислительными трудностями получения результатов расчета параметров внутреннего состояния неоднородных материалов при сложном напряженном состоянии на макро- и микроуровне. Что, в свою очередь, делает актуальной разработку новых математических моделей поведения слоев этих материалов с локальными технологическими дефектами при многоосном деформировании.

**Целью диссертационной работы** являлось создание математической модели для описания закономерностей деформирования матрицы и волокон тканых композитов с локальными технологическими дефектами при сложном макроскопически однородном напряженно-деформированном состоянии. Для достижения поставленных целей решались следующие основные задачи:

- разработка математической модели для описания механического поведения слоя тканого композита с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей, учитывающей сложную геометрию полотняного плетения и контакта нитей армирующего каркаса, а также наличие локальных технологических дефектов;
- разработка модуля расширений платформы численного моделирования SALOME-MECA, основанной на методе конечных элементов, для обработки больших массивов данных — параметров напряженно-деформированного состояния;
- получение новых численных результатов моделирования механического

поведения слоя тканого композита, оценка влияния типа дефектов на напряжения и деформации в матрице и волокнах армированных тканями композитов при сложном напряженном состоянии;

- формулировка рекомендаций для технологов и инженеров-конструкторов по снижению концентрации напряжений, вызванных локальными технологическими дефектами в элементах конструкций, изготовленных из тканых композитов.

Основные научные результаты диссертационной работы были получены в рамках исследований, проводимых на кафедре «Механика композиционных материалов и конструкций» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) с участием автора в рамках задания №2014/152 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности (базовая часть госзадания Минобрнауки РФ, код проекта – 1911) и гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ–Урал №11–01–96033).

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

- построена новая математическая модель для описания деформирования слоя тканого композита с искривленными волокнами и локальными технологическими дефектами;
- разработаны, обоснованы и верифицированы эффективные вычислительные алгоритмы для обработки больших массивов данных параметров напряженно-деформированного состояния с применением современных компьютерных технологий;
- впервые получены численные решения краевых контактных задач для слоя тканого композита с локальными технологическими дефектами при различных сложных макроскопически однородных напряженно-деформированных состояниях.

**Практическая значимость работы.** Разработанный и программно реализованный модуль расширений платформы SALOME-MECA может быть применен исследователями и инженерами-конструкторами для математического моделирования механического поведения армированных тканями материалов с разными типами локальных технологических дефектов. Сформулированы рекомендации для технологов и инженеров-конструкторов по снижению концентрации напряжений, вызванных наличием локальных техноло-

гических дефектов (пропуск волокна основы, разрыв волокон основы и/или утка, внутренняя пора) в элементах конструкций.

Теоретические результаты диссертационной работы были использованы при разработке рабочих программ по дисциплинам «Численные методы механики композитов» и «Вычислительная механика», читаемым в ПНИПУ студентам, обучающимся по направлению 150100.64 — Материаловедение и технология материалов (профиль бакалавриата: 04 — Конструирование и производство изделий из композиционных материалов), нашли отражение при формулировке заданий на исследовательские курсовые проекты и выпускные квалификационные работы.

**Достоверность результатов** подтверждается удовлетворительным соответствием в частных задачах результатов вычислительных экспериментов известным приближенным аналитическим решениям механики тканых композитов, соответствием полей внутренних параметров состояния условиям симметрии и периодичности решаемых задач.

**На защиту** выносятся следующие основные результаты и положения:

- математическая модель для описания поведения фрагмента слоя тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами при произвольно заданном макрооднородном нагружении в плоскости слоя;
- модуль, расширяющий платформу численного моделирования SALOME-MECA в части дополнительных возможностей сравнения значений параметров напряженно-деформированного состояния в узлах топологически близких конечно-элементных сеток и позволяющий обрабатывать большие массивы данных, полученных при численном решении краевых задач;
- результаты численного решения краевых задач по определению структурных напряжений и деформаций в слое тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами (пропуск волокна основы, разрывы волокон основы и/или утка, внутренняя пора).

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 всероссийских и 5 международных конференциях: XL и XLI Международной научной школе «Актуальные проблемы механики» (Санкт-Петербург, 2012–13 гг.), Международной конференции «Ак-

туальные проблемы механики сплошных сред» (Цахкадзор, Армения, 2012 г.), Международной конференции «Иерархически организованные системы живой и неживой природы» (Томск, 2013 г.), VII Всероссийской (с международным участием) конференции по механике деформируемого твердого тела (Ростов-на-Дону, 2013 г.), VI Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (Москва, 2012 г.), XVIII Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2013 г.), III Всероссийской конференции и IV Всероссийском симпозиуме «Механика наноструктурированных материалов и систем» (Москва, 2011–12 гг.), VII Российской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2012 г.), VIII Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2014 г.).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр «Механика композиционных материалов и конструкций» (рук. зав. кафедрой, Заслуженный деятель науки РФ, д-р физ.-мат. наук, профессор Ю. В. Соколкин), «Вычислительная математика и механика» (рук. зав. кафедрой, д-р технических наук, профессор Н. А. Труфанов), «Математическое моделирование систем и процессов» (рук. зав. кафедрой, Заслуженный деятель науки РФ, д-р физ.-мат. наук, профессор П. В. Трусков) ПНИПУ и Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН, д-р техн. наук, профессор В. П. Матвеевко).

**Публикации.** Научные результаты диссертационной работы опубликованы в трех статьях в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ [1–3]; в 18 статьях в материалах и тезисах докладов Всероссийских и международных конференций, основные из которых [4–8]. На разработанные и программно реализованные алгоритмы получено 1 свидетельство Роспатента об официальной регистрации программы для ЭВМ [9].

**Личный вклад автора** заключается в разработке математической модели, разработке, тестировании и программной реализации модуля расширений платформы численного моделирования SALOME-MECA для обработки больших массивов данных — параметров напряженно-деформированного состояния; численном решении задач исследования сложного напряженно-деформированного состояния фрагмента слоя тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами. Постановка задачи

была сформулирована научным руководителем, с которым обсуждались все полученные новые научные результаты.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 112 страницах, содержит 43 рисунка и 32 таблицы. Библиография включает 117 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** приведен краткий обзор, отражающий современное состояние вопросов исследования, сделано заключение об актуальности темы, сформулированы цели диссертационной работы, полученные новые научные результаты и их практическая ценность, приведено краткое содержание диссертационной работы по главам.

**В первой главе** рассмотрена физическая модель тканых композиционных материалов с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей. Описаны технологические операции изготовления элементов конструкций из тканых материалов, которые могут приводить к возникновению локальных технологических дефектов, а также методы неразрушающего контроля, позволяющие выявить подобные дефекты.

**Во второй главе** описана математическая модель тканого композита полотняного плетения идеальной периодической структуры, а также с наличием локальных технологических дефектов. Описывается программное обеспечение, используемое для построения геометрической модели. Принимаются гипотезы для постановки задачи исследования деформирования слоя композита. На примере задачи о двухосном макродеформировании в плоскости слоя проводится тестирование разработанной модели. Приводятся диаграммы классов и спроектированная инфологическая модель базы данных модуля, расширяющего возможности платформы численного моделирования SALOME-MECA, для обработки больших массивов данных — параметров напряженно-деформированного состояния.

Построена геометрическая модель слоя тканого композита с армирующим каркасом полотняного плетения идеальной периодической структуры и с типичными локальными технологическими дефектами: пропуск нити основы (рис. 1, а), разрыв основы и утка (рис. 1, в и г), внутренняя технологическая пора. Армирующая ткань образована волокнами круглого поперечного

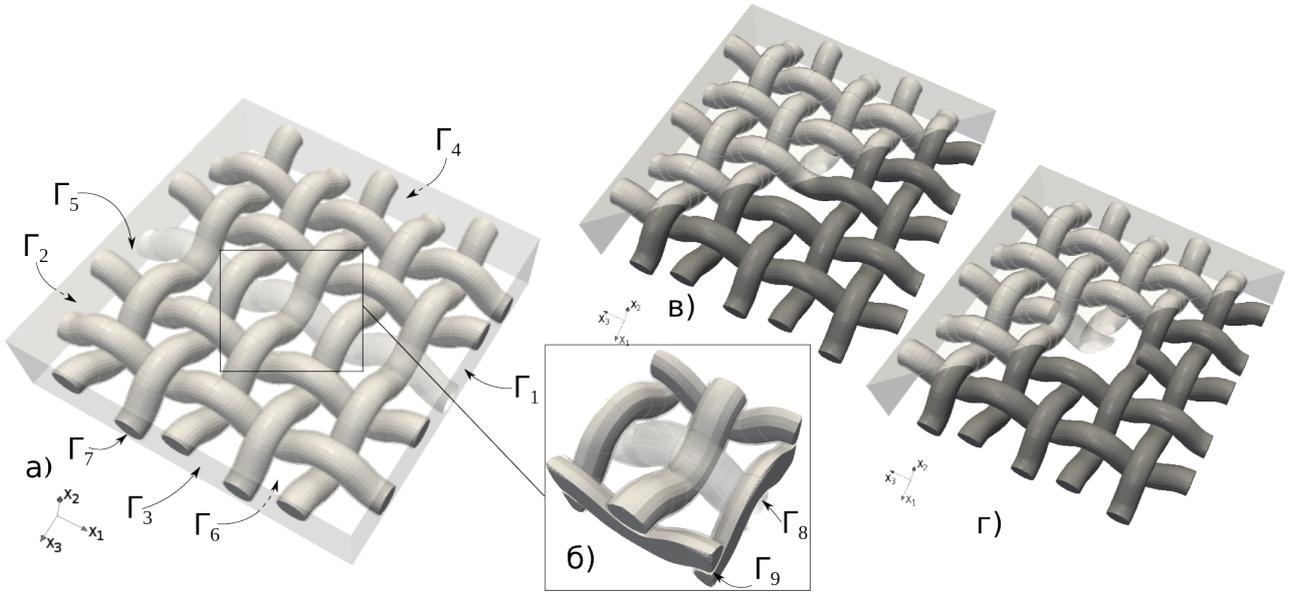


Рис. 1: Типы локальных технологических дефектов

сечения постоянного диаметра  $D$ , а толщина слоя композита составляет  $2,5D$ , что соответствует материалу с коэффициентами армирования  $\mu_1 = \mu_3 = 0,14$ . Искривление нитей основы и утка задавалось дугой окружности  $a$  с центральным углом  $\alpha = \pi/4$  (неизменным при нагружении слоя) и прямой  $b$ .

Волокна и матрица тканого композита полагались изотропными, линейно упругими, не изменяющими геометрию, взаимное расположение и тип симметрии при нагружении. Поле структурных напряжений  $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$  удовлетворяет уравнениям равновесия, а компоненты тензора структурных деформаций  $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})$  связаны с компонентами вектора структурных перемещений  $u_i(\mathbf{r})$  геометрическими соотношениями Коши:

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

Определяющие соотношения записывались следующим образом:

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

где верхними индексами  $f$  и  $m$  отмечены материальные коэффициенты, относящиеся к волокнам и матрице соответственно, а  $\lambda(\mathbf{r})$  — индикаторная функция радиус-вектора  $\mathbf{r}$ , которая принимала значение 1, если точка принадлежит армирующему каркасу, и 0, если  $\mathbf{r}$  принадлежит матрице.

Краевая задача (1)–(2) была дополнена условиями симметрии на грани-

цах  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_4$  и  $\Gamma_6$  фрагмента слоя (рис. 1, а):

$$\begin{aligned} u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_2} = u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_4} = u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_6} = 0, \\ \sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6} = \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6} = \sigma_{23}(\mathbf{r})|_{\Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

и условиями идеального сопряжения на границах раздела фаз  $\Gamma_7$  (рис. 1, а):

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

Здесь  $n_j(\mathbf{r})$  — компоненты вектора внешней нормали. На внутренней поверхности  $\Gamma_8$  полостей, вызванных пропуском нити основы, утка или их разрывами (рис. 1, б) отсутствовали ограничения на перемещения, сама поверхность была свободна от напряжений:

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

В случае насыщения внутренних полостей материалом матрицы предполагалось, что соответствующие объемы имеют свойства матрицы.

Если в слое тканого композита не исключено соприкосновение волокон, вблизи мест с максимальной кривизной волокон остаются герметичные области, незаполненные материалом матрицы. Будем предполагать что на поверхностях этих областей отсутствовали ограничения на перемещения, а сама поверхность также была свободна от напряжений. Поэтому граничные условия на этих поверхностях были аналогичны (5).

Положение и геометрия поверхностей контакта  $\Gamma_9$  (рис. 1, б), которые вызваны соприкосновением нитей ткани, считались неизменными в процессе нагружения слоя. На  $\Gamma_9$  были заданы условия кулоновского трения: если  $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})]|_{\Gamma_9^+} < [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})]|_{\Gamma_9^-}$ , то

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

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

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

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

Выражения (3) — (7) были дополнены условиями, обеспечивающими заданное двухосное деформирование в плоскости слоя:

$$u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_1, \Gamma_3} = \langle \varepsilon_{11} \rangle x_1 + \langle \varepsilon_{13} \rangle x_3, \quad u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_1, \Gamma_3} = \langle \varepsilon_{13} \rangle x_1 + \langle \varepsilon_{33} \rangle x_3. \quad (8)$$

Здесь  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$  — усредненные по объему фрагмента слоя тканого композита компоненты тензора структурных деформаций  $\varepsilon_{ij}$ .

Краевая задача (1) – (2) с граничными условиями (3) – (8) решалась численно методом конечных элементов с помощью открытой интегрируемой платформы SALOME-MECA, которая предназначена для решения задач механики сплошных сред, термо- и гидродинамики, акустики и магнетизма, выполнения расчетов для строительных конструкций и сооружений. Степень дискретизации выбиралась таким образом, чтобы полученные значения деформаций и напряжений в слое тканого композита идеальной периодической структуры и с локальными технологическими дефектами ни качественно, ни количественно не изменялись при уменьшении характерных размеров конечных элементов. Так, например, для фрагмента слоя идеальной периодической структуры этим условиям удовлетворяют сетки с 298 255 10-узловыми тетраэдральными и 77 760 20-узловыми гексаэдральными элементами.

Тестирование разработанной модели проводилось при следующих характеристиках:  $E^f = 280$  ГПа и  $E^m = 0,28$  ГПа,  $\nu^f = 0,20$  и  $\nu^m = 0,40$  — модули Юнга и коэффициенты Пуассона волокон и матрицы соответственно, а статический коэффициент трения принимался равным  $f = 0,12$ . Было показано, что полученные численно методом конечных элементов распределения интенсивностей напряжений в слое тканого композита полотняного плетения с идеальной периодической структурой удовлетворяли условиям симметрии, периодичности геометрии и приложенной внешней нагрузки.

Для верификации построенной модели проводилось сравнение численного и аналитического решения задач по нахождению эффективных свойств слоя тканого композита идеальной периодической структуры. Вычисление эффективных упругих модулей слоя тканого композита осуществлялось при помощи разработанного расширения платформы SALOME-MECA, выполненного в виде подключаемого модуля на языке Python с возможностью реализации многопроцессорных параллельных вычислений. 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. По-

лученные численные значения эффективных модулей Юнга в направлениях нитей основы и утка не превышают значения, рассчитанные по приближенным аналитическим формулам Ю. М. Тарнапольского, И. Г. Жигуна и В. А. Полякова на 3,5%. Это свидетельствовало об адекватности построенной модели и корректности полученного численного решения.

Для анализа напряженного состояния слоя тканого композита был разработан модуль, позволяющий сравнивать результаты решения различных краевых задач для топологически близких конечно-элементных моделей, с использованием языка программирования Python и СУБД SQLite [9].

**В третьей главе** с помощью платформы SALOME-MECA и разработанного модуля, расширяющего ее возможности по обработке больших массивов данных, получены численные решения краевых задач о макроскопически однородных напряженно-деформированных состояниях слоя тканого композита полотняного плетения и определены значения безразмерных коэффициентов концентрации напряжений, вызванных наличием локальных технологических дефектов при наличии гарантированной прослойки матрицы вокруг нитей армирующего каркаса, а также контакта с трением. Безразмерные коэффициенты концентрации напряжений  $K_{\sigma_{ij}} = \sigma_{ij}(\mathbf{r})/\sigma_{ij}^{per}(\mathbf{r})$  были определены как отношение компонент тензора напряжений в слое модельного тканого композита с локальным технологическим дефектом  $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$  к соответствующим компонентам  $\sigma_{ij}^{per}(\mathbf{r})$  в слое материала идеальной периодической структуры. Точки, в которых  $\sigma_{ij}^{per}(\mathbf{r}) = 0$ , исключались из рассмотрения.

Для исключения влияния масштабных факторов на значения коэффициентов  $K_{\sigma_{ij}}$  в межволоконном пространстве вблизи локальных технологических дефектов были решены задачи с различным количеством нитей основы и утка в исследуемых фрагментах слоя тканого композита. Области, в которых анализировалось напряженное состояние, были выбраны так, чтобы исключить точки сингулярности поля напряжений, которые могут возникать на границах раздела фаз и в областях (границы полостей, вызванных пропуском или разрывами основы и утка, а также герметичные области, не заполненные материалом матрицы, при соприкосновении искривленных волокон), где происходит изменение типа граничных условий. Было показано, что увеличение количества нитей с 5 до 7 приводит к изменению вычисляемых коэффициентов концентрации напряжений в матрице не более чем на 3%. Это позволило

Таблица. Коэффициенты  $K_{\sigma_{ij}}$  при двухосном равнокомпонентном макроскопически однородном деформировании в плоскости слоя<sup>1</sup>

Тип локального дефекта	$K_{\sigma_{11}}$	$K_{\sigma_{22}}$	$K_{\sigma_{33}}$	$K_{\sigma_{12}}$	$K_{\sigma_{13}}$	$K_{\sigma_{23}}$
Пропуск волокна основы	$\frac{0.93}{0.97}$	$\frac{0.94}{0.98}$	$\frac{0.93}{0.97}$	$\frac{0.91}{0.92}$	$\frac{4.23}{3.10}$	$\frac{1.00}{0.92}$
Разрыв волокна основы	$\frac{0.96}{0.97}$	$\frac{0.96}{0.98}$	$\frac{0.95}{0.97}$	$\frac{0.94}{0.94}$	$\frac{4.58}{3.57}$	$\frac{0.84}{0.85}$
Разрыв волокон основы и утка	$\frac{0.95}{0.98}$	$\frac{0.95}{0.98}$	$\frac{0.93}{0.96}$	$\frac{0.95}{0.97}$	$\frac{4.54}{2.41}$	$\frac{0.94}{0.93}$

<sup>1</sup> Примечание: полость, образованная технологическим дефектом, остается незаполненной материалом матрицы (числитель), полость заполняется материалом матрицы (знаменатель)

ограничиться фрагментами, содержащими по 5 нитей основы и утка.

В табл. представлены вычисленные значения коэффициентов  $K_{\sigma_{ij}}$  в точках, соответствующих центрам межволоконного пространства слоя тканого композита с керамическими волокнами и поликристаллической матрицей, находящегося в состоянии двухосного равнокомпонентного макроскопически однородного деформирования в плоскости слоя. Наибольший вклад в концентрацию напряжений для всех типов локальных технологических дефектов вносит касательная составляющая  $\sigma_{13}$  тензора напряжения. Для определения сценариев возможного начального разрушения матрицы были вычислены отношения компонент тензора напряжений в точке, соответствующей центру межволоконного пространства, к усредненным по объему матрицы значениям компонент тензора напряжений  $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle_m$ . Эти значения не превышали коэффициентов  $K_{\sigma_{ij}}$  для всех макрооднородных напряженно-деформированных состояний в плоскости слоя, за исключением деформации одноосного растяжения в направлении волокон основы. Это свидетельствовало о том, что причиной начала разрушения матрицы в указанной точке являлся локальный технологический дефект. Поэтому при наличии пропуска волокна основы, разрыва волокна основы или одновременного разрыва волокон основы и утка может произойти разрушение матрицы по механизмам сдвигов в плоскости слоя. Если в технологическом процессе изготовления элемента конструкции из тканого композита были предусмотрены операции насыщения материалом матрицы полостей, образованных дефектами, то коэффициенты  $K_{\sigma_{ij}}$  снижались в 1,3 – 1,9 раза.

На рис. 2 показаны распределения коэффициентов концентрации интенсивностей напряжений в слое тканого композита, каждая нить армирующего

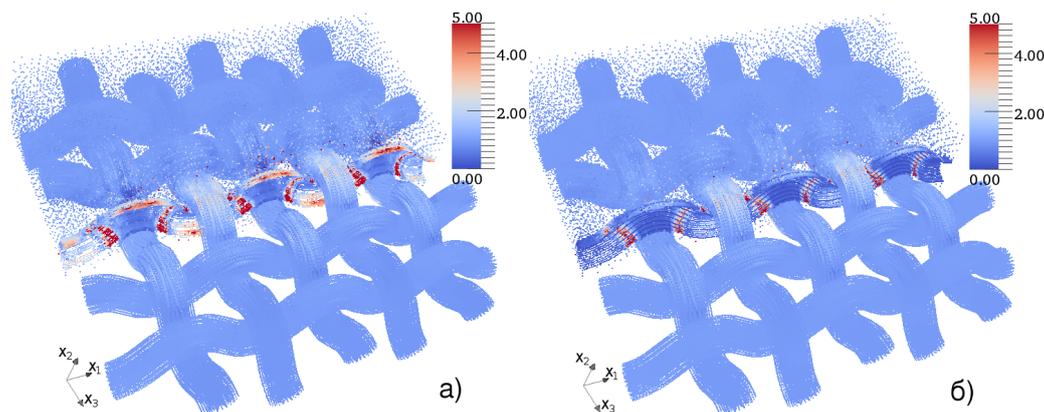


Рис. 2: Распределение коэффициентов концентрации интенсивностей напряжений в слое тканого композита с пропуском нити основы: без (а) и с дополнительным насыщением полости дефекта материалом матрицы (б)

каркаса которого была окружена прослойкой матрицы. Расположение областей вблизи наибольших кривизн волокон, в которых интенсивность напряжений достигала максимальных значений, было строго периодичным во всем объеме композита, за исключением окрестности локальных дефектов. При этом максимальные значения коэффициентов  $K_{\sigma_{ij}}$  соответствовали точкам, принадлежащим поликристаллической матрице. Было обнаружено, что дополнительное насыщение полостей, образующихся при пропуске волокон основы, материалом матрицы приводило к снижению коэффициентов концентрации интенсивностей напряжений.

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы в целом.

**В приложении** размещена копия свидетельства о регистрации программного продукта.

## Основные выводы

1. Построена математическая модель для описания поведения слоя тканого композита с искривленными волокнами полотняного плетения с идеальной периодической структурой, а также с наличием локальных технологических дефектов при наличии гарантированной прослойки матрицы между волокнами и с наличием контакта с трением между волокнами.
2. Разработан модуль, расширяющий возможности программного комплекса SALOME-MECA, для обработки больших массивов данных параметров напряженно-деформированного состояния.

3. Численно решены задачи о макроскопически однородном напряженно-деформированном состоянии слоя тканого композита с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей при наличии локальных технологических дефектов в виде пропуска волокна основы, разрыва волокна основы, разрыва волокон основы и утка, внутренней технологической поры.
4. Вычислены значения напряжений, деформаций и их инвариантов в модельном фрагменте слоя тканого композита полотняного плетения с идеальной периодической структурой и с наличием локальных технологических дефектов при сложных макрооднородных напряженно-деформированных состояниях.

## Основные публикации

1. Дедков Д. В., Зайцев А. В. Концентрация напряжений в слое тканого композита с локальными дефектами при двухосном однородном равнокомпонентном макродеформировании // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. 2013. № 4. С. 66–75. **Входит в перечень ВАК РФ.**
2. Дедков Д. В., Ташкинов А. А. Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами при чистом формоизменении // Вычислительная механика сплошных сред – Computational continuum mechanics. 2013. Т. 6, № 1. С. 103–109. **Входит в перечень ВАК РФ.**
3. Дедков Д. В., Зайцев А. В., Ташкинов А. А. Эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 4(3). С. 526–530. **Входит в перечень ВАК РФ.**
4. Дедков Д. В., Зайцев А. В., Ташкинов А. А. Концентрация напряжений в слое тканого композита с закрытыми внутренними технологическими порами // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. Т. 4, № 4. С. 29–36.
5. Дедков Д. В. Концентрация напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами // XXXVIII Гагаринские чтения:

- Тр. межд. молод. научн. конф. (10–14 апреля 2012 г., Москва). Т. 1. Москва: Изд-во «МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского», 2012. С. 143–145.
6. Дедков Д. В., Зайцев А. В., Ташкинов А. А. Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами // Актуальные проблемы механики сплошных сред: Тр. межд. конф., посвященной 100-летию акад. НАН Армении Н. Х. Арутюняна. (8–12 октября 2012, Цахкадзор, Армения). Т. 1. Изд-во ЕГУАС, 2012. С. 223–227.
7. Дедков Д. В., Зайцев А. В., Ташкинов А. А. Концентрация напряжений в слое тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами в поликристаллической матрице // Иерархически организованные системы живой и неживой природы: Мат. межд. конф. (9–13 сентября 2013, Томск). Томск: Изд-во ИФПМ СО РАН, 2013. С. 233–236.
8. Дедков Д. В., Ташкинов А. А. Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита полотняного плетения с поликристаллической матрицей // Тр. VII Всероссийской (с междун. участием) конф. по механике деформируемого твердого тела. (15–18 октября 2013, Ростов-на-Дону). Т. 1. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного фед. ун-та, 2013. С. 184–188.
9. Дедков Д. В., Зайцев А. В. Свидетельство Роспатента об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014661722. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.11.2014. Заявка №2014619501, дата поступления 23.09.2014. Правообладатель: Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Подписано в печать 04.02.2015 года

Формат 60 x 90/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л./1. Тираж 100 экз. Заказ 613/2015.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства

Пермского национального исследовательского  
политехнического университета.

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, к. 113.

Тел. (342) 219-80-33.