

УДК: 539.3

## Моделирование вида структурного элемента гибких тканых композитов при статическом растяжении с применением метода конечных элементов в ANSYS

А. К. Любимов, Д. А. Кожанов

ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского»,  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23  
E-mail: pbk996@mail.ru

*Получено 28 сентября 2015 г.*

В статье приведен пример конечно-элементного моделирования структурного элемента гибких тканых композитов. Армирующей тканью является полотняное переплетение нитей из трощеного жгута. Нити представляются упругим материалом. Матрицей рассматриваемого материала является мягкий полимер с возможностью возникновения необратимых деформаций. Учтена возможность возникновения повреждений в структуре материала при высоких нагрузках. Построена полная диаграмма деформирования при одноосном растяжении. Достоверность модели подтверждается проведенными натурными экспериментами.

Ключевые слова: гибкий тканый композиционный материал, диаграмма деформирования, накопление повреждений, предварительное повреждение, метод конечных элементов, эксперимент, полотняное переплетение, структура переплетения

### Modeling the structural element of flexible woven composites under static tension using the method of finite element in ANSYS

A. K. Lyubimov, D. A. Kozhanov

*Nizhny Novgorod State University, 23 Gagarin av., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

**Abstract.** — The article gives the example of finite-element modeling of the structural element is a flexible woven composites. The reinforcing cloth is a plain weave of threads of assembled harness. Threads are represented by elastic material. The matrix of the material is a soft polymer with the possibility of irreversible deformations. Taken into account the possibility of the occurrence of damage in the structure of the material under high loads. Built detailed diagram of deformation under uniaxial tension. The accuracy of the model is conrmed by in situ experiments.

Keywords: flexible woven composite material, deformation diagram, the accumulation of damage, a preliminary damage, finite element method, experiment, plain weave, weave structure

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 113–120 (Russian).

Гибкие тканые композиционные материалы — это класс композитов, в которых армированием является ткань различных переплетений, матрицей, например, мягкие полимерные материалы, такие как полиуретан. Тип переплетения, используемый при создании гибких тканых композитов, выбирается исходя из конструкторских назначений создаваемого объекта. Основными часто используемыми двухмерными типами переплетений являются сатиновое и полотняное. В данной работе рассматривается полотняное переплетение, где имеется два взаимно ортогональных направления плетения — вдоль нити утка и вдоль нити основы, которые поочередно проходят друг над другом. Полотняные переплетения различаются по различным толщинам и объемной доле армирующих нитей и геометрическими характеристиками. Этот факт, безусловно, влияет на механические характеристики материала, и, учитывая большое количество используемой архитектуры полотняного переплетения и конструкторского назначения композиционного материала, необходима универсальная модель, позволяющая учесть влияние структуры материала на его механические свойства при различных нагрузках.

Экспериментальные исследования не являются целесообразными, так как для каждого типа микроструктуры гибкого тканого композита результаты существенно отличаются [Naik, 1994]. Микромеханические модели с выделением периодических элементов переплетения, которые принято называть элементарно-периодическими ячейками (ЭПЯ), позволяют сохранить капиталовложения, затрачиваемые на проведение трудоемких экспериментов и описать поведение образца материала с различной микроструктурой используемой армирующей ткани.

Основные применяемые модели, характеризующиеся на описании структуры тканых композитов, применимы лишь к «жестким» композитам, в которых в качестве наполнителя выступают твердые полимеры, такие как, например, эпоксидная смола после воздействия отвердителя [Naik, 1994; Zhu, 2003; Shortiya, Sottos, 2005; Man, Swan, 2007; Дедков, Зайцев, 2013; Кравченко, Вильдеман, 1997]. Для таких материалов можно пренебречь геометрической нелинейностью [Дедков, Зайцев, 2013; Кравченко, Вильдеман, 1997], так как деформации, возникающие при нагружении, малы. Для гибких тканых композиционных материалов геометрическая нелинейность оказывает существенное влияние на механические характеристики [Багмунтов, 2005; Мангушева, 2012]. Она связана с типом матрицы композита и особенностью деформирования нитей армирующей ткани, которые распрямляются в процессе деформирования, изменяют жесткость [Берендеев, 2013] и переходят из состояния изгиба в центральное растяжение. Еще одним критерием выступает учет накопления повреждений в образцах материала [Багмунтов, 2005; Берендеев, 2013; Степанов, 2006]. Существующие модели гибких тканых композитов достаточно хорошо качественно и количественно соотносятся с экспериментальными данными [Берендеев, 2006], однако большая часть этих работ основывается на ламинатных теориях [Багмунтов, 2005], не учитывает упругопластическое деформирование [Степанов, 2006; Foye, 1992] и определяет лишь некоторые механические характеристики композитов без построения полной диаграммы деформирования [Багмунтов, 2005; Мангушева, 2012].

В связи с построением модели структурного элемента (ЭПЯ) возникает необходимость точного описания внутренних усилий [Федосеев, 1967], возникающих в поперечных сечениях нитей основы и утка. Исходя из геометрических характеристик рассматриваемого полотняного переплетения, длина нитей основы и утка по отношению к толщине нити отличается не более чем на один порядок, что позволяет сделать вывод о необходимости учета изгибающих моментов нитей в ЭПЯ [Гречухин, 2013]. Данный факт подтверждает и работа [Степанов, 2006], где наличие изгиба в зоне взаимодействия нитей основы и утка подтверждено экспериментально. Наличие изгиба ведет к возникновению областей сжатия в нитях ткани. Для моделирования упругопластического поведения нитей более корректно использование теории течения с кинематическим упрочнением [Федосеев, 1967]. Изотропное линейное упрочнение, используемое для моделирования поведения нитей армирования в работе [Мангушева, 2012] с моделью идеально пластического материала, позволяет построить отдельные участки диаграммы деформирования кусочно-линейными прямыми, но не позволяет построить полную диаграмму деформирования.

В статье приведен пример конечно-элементного моделирования элементарной периодической ячейки для образца гибких тканых композитов, позволяющий получить полную диаграмму

му деформирования образца материала в целом и визуально определить наиболее опасные области полотняного переплетения. В рассматриваемом случае нить плетения является композиционным материалом, состоящим из упругих волокон и упругопластической матрицы с линейным кинематическим упрочнением. Учтено влияние накопления повреждений и геометрическая нелинейность структуры материала.

## Основные вводимые предположения

Будем описывать процесс одноосного статического деформирования гибких тканых композитов полотняного переплетения в условиях «жесткого» нагружения. Рассматриваемая ткань полотняного плетения (рис. 1) имеет регулярную структуру, в которой можно выделить элементарный периодический элемент (ЭПЯ). Принято считать, что для рассматриваемых материалов ЭПЯ имеет вид, выделенный на рис. 1 прямоугольником.

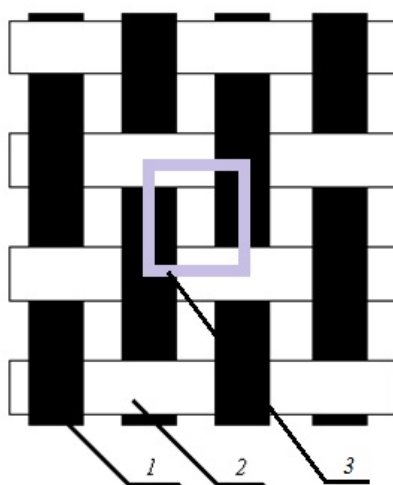


Рис. 1. Схема полотняного переплетения (вид сверху): 1 — нить основы; 2 — нить утка; 3 — элементарная периодическая ячейка

С учетом особенности вида переплетения, без ограничения общности, считаем, что закон изменения формы нитей сохраняется по всему материалу ткани как для нитей основы, так и для нитей утка. Выберем направление основы в качестве базового и более подробно рассмотрим вид ЭПЯ. При рассмотрении полотняного переплетения в продольном сечении в направлении основы (рис. 2) нить основы имеет форму, приближенную к синусоидальной кривой.

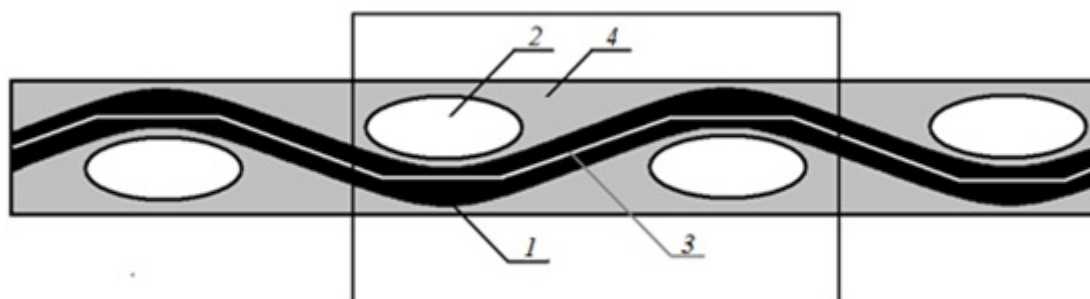


Рис. 2. Продольное сечение вдоль нити основы: 1 — нить основы; 2 — нить утка; 3 — линейная аппроксимация синусоидальной формы нити основы; 4 — матрица (заполнитель) гибкого тканого композита

Для упрощения моделирования структуры ЭПЯ гибких тканых композитов, применяя принцип из работ [Naik, 1994; Берендеев, 2013; Гречухин, 2013], синусоидальная кривая аппроксимируется набором прямолинейных участков. Эллипсоидное поперечное сечение нитей аппроксимируем формой прямоугольника. Результатом выделения структурного элемента и упрощения геометрии переплетения является ЭПЯ более низкого уровня (рис. 3).

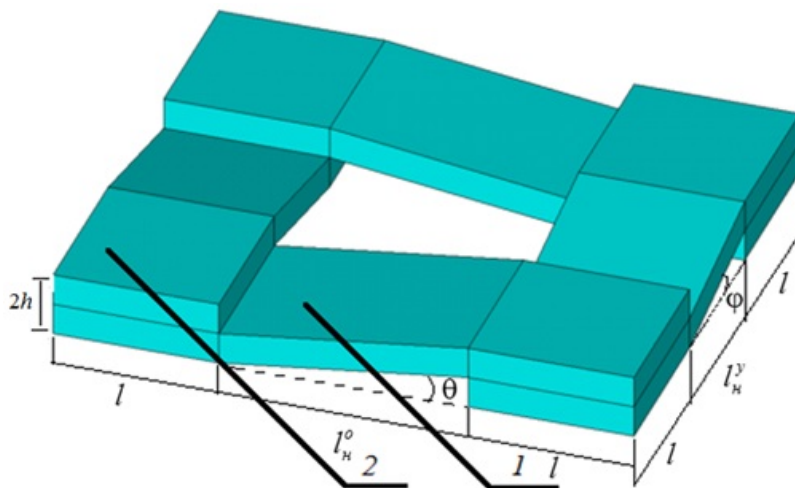


Рис. 3. Элементарная периодическая ячейка армирующих нитей (ЭПЯ) гибкого тканого композита: 1 — нить основы; 2 — нить утка

ЭПЯ рассматривается в условиях одноосного растяжения вдоль нитей основы. В этом случае основную нагрузку испытывают нити вдоль направления основы, а нити утка не позволяют ткани потерять заданную форму плетения. Предполагается, что на границах соприкосновения нити «жестко» склеены друг с другом и имеют одинаковые перемещения и деформации с учетом непроникновения друг в друга.

ЭПЯ гибкого тканого композиционного материала состоит из нитей армирования и заполнителя. Для полноты описания структуры ЭПЯ гибкого тканого композита нити армирования (основы и утка) моделируются однонаправленным композитом, состоящими из матрицы нитей (заполнителя нитей) и армирующих волокон (трощеных жгутов). Армирование вводится индивидуально для каждого линейного участка ЭПЯ и совпадает с ориентацией направления нити в соответствии с характеристиками рассматриваемой схемы переплетения. Исходя из природы армирующих нитей (трощенные жгуты), предполагается, что материал элементов армирования (волокон) упругий, с модулем упругости  $E_f$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_f$ . В рассматриваемых тканых композитах объемное содержание волокон армирования для любой нити в ЭПЯ принимается постоянной величиной  $r = \text{const}$ .

Предполагается, что волокна в нитях не взаимодействуют между собой по боковым поверхностям и полностью окружены вторым компонентом, которым в рассматриваемом случае является поливинилхлоридная матрица, обеспечивающая совместную работу жгутов в нитях. Вводится предположение о упругопластическом поведении заполнителя нитей и заполнителя всей ЭПЯ композита исходя из проведенных экспериментов [Берендеев, 2006]. Упругопластическое поведение вводится линейным кинематическим упрочнением

В процессе деформирования гибких тканых композиционных материалов, в связи с нарушением адгезии между волокнами армирования и связующим, возможно вычленение волокон в нитях армирования и возникновение повреждений в матрице нитей. Эти процессы описываются зарождением «размазанных трещин» [Anthonmy R. Ingraffea, 2010; Берендеев, Кожанов, Любимов, 2015]. Принцип данного метода основывается на изменении матрицы жесткости материала при появлении разрыва. Трещина явным образом не вводится. Более подробно о критерии зарождения «размазанной трещины» и ее влияния на жесткостные характеристики приве-

дены в [Anthony R. Ingraffea, 2010; Берендеев, Кожанов, Любимов, 2015; Ansys documentation, 2013; Васильев, Тарнопольский, 1990; Кожанов, 2014].

Расчет ЭПЯ гибкого тканого композита будет описываться в приращениях в связи с геометрической нелинейностью задачи и возможным изменением жесткости материала в процессе деформирования.

## Схема нагружения и конечно-элементное моделирование

Для получения диаграммы деформирования ЭПЯ гибкого тканого композита при одноосном растяжении вдоль нитей основы на границе  $A$  запрещается перемещение в направлении растяжения  $u_x|_A = 0$ , на границе  $B$  задается перемещение  $u_x|_B = u^*$ , на границах  $C$  и  $D$  — условия симметрии.

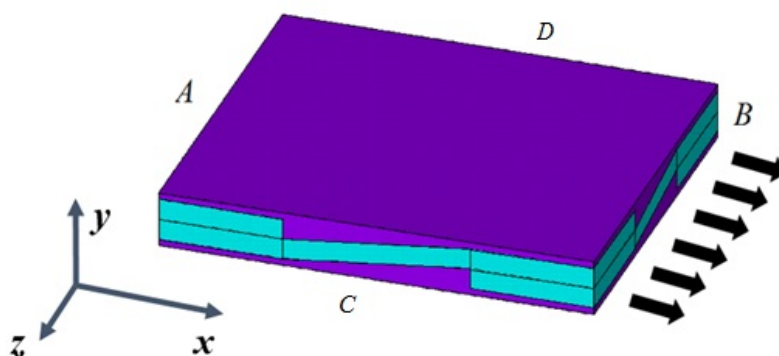


Рис. 4. ЭПЯ гибкого тканого композита при одноосном растяжении

Поставленная задача решается методом конечных элементов (рис. 5). Матрица (заполнитель) ЭПЯ гибкого тканого композита моделируется 8-мью узловыми конечными элементами solid 185 [Ansys documentation, 2013]. Это основной элемент, имеющий три степени свободы, позволяющий моделировать твердотельные тела в ПК ANSYS и учитывать возможные большие деформации. Нити армирования моделируются 8-мью узловыми конечными элементами solid 65, которые позволяют учесть наличие элементов армирования с заданной ориентацией внутри моделируемого тела и объемной долей содержания армирующих волокон внутри композитных нитей, а также учесть материал, из которого состоят элементы армирования. Еще одним фактором, влияющим на выбор конечного элемента solid 65, является возможность учета влияния «размазанных трещин» внутри матрицы армирующих нитей.

## Сравнение с результатами экспериментальных данных и оценка достоверности модели

Для оценки достоверности предложенной модели процесса деформирования гибких тканых композитов проведено сравнение с экспериментальными данными. Были проведены экспериментальные исследование для получения диаграммы деформирования гибких тканых композитов при одноосном растяжении. В эксперименте были использованы образцы материалов тканого композита с армированием из трощеных нитей и полиуретановой матрицей. Из материала вырезались образцы таким образом, чтобы направление основы совпадало с осью образца. После этого проводились испытания на растяжение с постоянной скоростью, равной 0.3 мм/с.

Используемые в работе образцы имели следующие геометрические параметры структуры (рис. 3):  $l = 1$  мм,  $l_n^o = 1,5$  мм,  $l_n^y = 1$  мм,  $h = 0,2$  мм,  $\theta \approx 8^\circ$ ,  $\varphi \approx 11^\circ$ , толщина композита с за-

полнителем  $H = 0,3$  мм и объемное содержание волокон армирования в нитях направления и основы  $r = 80$  %.

Для анализа экспериментальных данных была проведена систематизация вида диаграммы деформирования. На основе анализа экспериментальных данных было принято предположение о трехсегментном виде диаграммы деформирования (рис. 5).

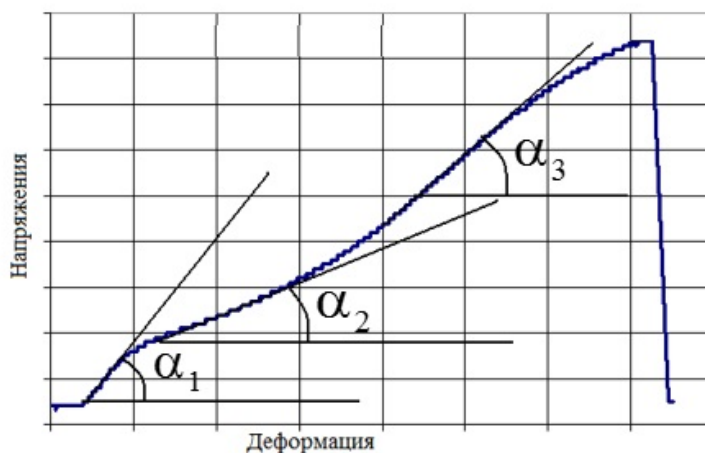


Рис. 5. Схематизация диаграммы деформирования

Механические характеристики материалов, используемых при моделировании, представлены в таблице 1 [18], где  $E$  — модуль упругости при упругом деформировании,  $E_t$  — модуль упругости при упругопластическом деформировании,  $\sigma_t$  — предел текучести.

Таблица 1

Тип материала	Материал	$E$ , МПа	$\nu$	$\sigma_t$ , МПа	$E_t$ , МПа
Армирующие волокна нитей основы и утка ЭПЯ	Полиэфирное волокно	$15 \cdot 10^3$	0,2	–	–
Матрица (заполнитель) нитей основы и утка	Поливинилхлорид с полиуретаном	40	0,35	20	20
Матрица ЭПЯ гибкого тканого композита	Винил	30	0,3	18	16

На рис. 6 представлены осредненная диаграмма, полученная при экспериментальных исследованиях (1), и расчетная диаграмма деформирования образца гибкого тканого композита (2). Анализ результатов моделирования с помощью МКЭ показывает хорошее качественное и количественное соотношение с результатами экспериментов и построенной ранее теоретической структурной моделью [Кожанов, 2014]. На расчетной диаграмме явно отображаются предел текучести образца материала и изменение жесткости в процессе одноосного деформирования. Вместе с тем есть некоторые различия по длине второго участка [Кожанов, 2014]. В качестве причины этого явления может выступать тот факт, что модель построена для одной ЭПЯ, когда образец материала состоит из множества ЭПЯ. Кроме этого, приведенная модель не учитывает статистического разброса неоднородности волокон армирования, что ведет к неравномерному вступлению в работу армирующих волокон в нитях основы и утка.

Количественное сравнение представлено в таблице 2 и имеет следующие обозначения параметров:  $S$  — среднее квадратичное отклонение,  $V$  — коэффициент вариации и  $\delta$  — относительная погрешность. Анализ указанных параметров показывает, что погрешность модели не превышает 7 %. Максимальные отклонения от результатов экспериментальных данных возни-

кают на третьем сегменте диаграммы деформирования, на котором происходит разрушение образца материала. В качестве причины количественного разброса может выступать предположение о разрушении по методу «размазанной трещины», которое не предполагает наличие трещины как фактора увеличения степени свободы и учета коэффициента интенсивности напряжений, влияющих на поведение материала при деформировании.

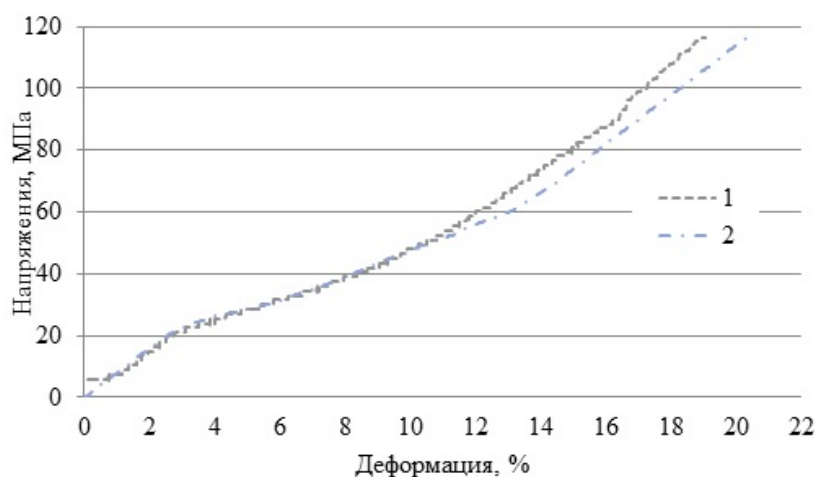


Рис. 6. Диаграммы деформирования при растяжении вдоль нити основы: 1 — эксперимент, 2 — метод конечных элементов

Таблица 2

Параметр	Эксперимент, МПа	Расчетный, МПа	$S$ , МПа	$V$ , %	$\delta$ , %
$\text{tg } \alpha_1$	687,5	701,6	7,05	1,02	2,05
$\text{tg } \alpha_2$	305,5	310,1	2,3	0,75	1,51
$\text{tg } \alpha_3$	687,5	640	23,75	3,58	6,91

## Заключение

В работе представлена модель поведения ЭПЯ гибкого тканого композита как структурного элемента, описывающего процесс деформирования образцов гибких тканых композитов. Получена расчетная диаграмма деформирования. Проведенная оценка достоверности модели показывает хорошее качественное и количественное совпадение с результатами эксперимента. Учтено влияние геометрической нелинейности и процесса накопления повреждений при деформировании.

## Список литературы

- Багмутов В. П. Особенности построения единой структурной модели упругопластического деформирования слоистых волоконных композитов при статическом и циклическом нагружении // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2005. — № 3. — С. 90–96.
- Берендеев Н. Н. и др. Экспериментальное исследование деформационных свойств тканых композитов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. — Вып. 68. — С. 213–220.
- Берендеев Н. Н. Описание поведения тканого композита при статическом нагружении с использованием структурной модели // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского.



- чевского. — № 4 (4). — Н. Новгород: Издательство ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2013. — С. 173–179.
- Берендеев Н. Н., Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Структурная модель гибкого тканого композита // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник. — Н. Новгород: ННГУ; 2015. — С. 162–171.
- Гречухин А. П., Селиверстов В. Ю.* Исследование формы нити в ткани полотняного переплетения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2013. — № 5. — С. 41–44.
- 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. — Сер. Физико-математические науки. — 2013. — Вып. 4 (33). — С. 66–75.
- Кожанов Д. А.* Структурная модель гибких тканых, предварительно поврежденных композитов в условиях одноосного растяжения // Научно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки. — № 4 (206). — С.-Петербург: Издательство СПбПУ, 2014. — С. 107–114.
- Композиционные материалы: Справочник // Под ред. В. В. Васильева и Ю. М. Тарнопольского. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.
- Кравченко О. Д., Вильдеман В. Э.* Модели неупругого деформирования перекрестно армированных слоистых композитов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 1997. — № 5. — С. 49–55.
- Мангушева А. Р.* Оценка кратковременной и длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2012.
- Степанов С. Г.* Математическая модель равновесия основной нити в зоне формирования однослойной ткани // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2006. — № 1. — С. 47–51.
- Феодосьев В. И.* Соппротивление материалов. — М.: Наука, 1967. — 552 с.
- ANSYS release 14.5. Documentation for ANSYS [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. — Электрон. дан. и прогр. — [б. м.], 2013.
- Foye R. L.* Finite element analysis of the stiffness of fabric reinforced composites. NASA CR-189597. — 1992. — 137 p.
- Ingraffea A. R.* Computational Fracture Mechanics // Erwin Stein. Encyclopedia of Computational Mechanics. Volume 2: Solids and Structures: John Wiley & Sons, Ltd., 2010. — P. 375–402.
- Man X., Swan C. C.* A The mathematical modeling framework for analysis of functional clothing // J. Eng. Fibers and Fabrics. — 2007. — Vol. 2, No. 3. — P. 10–27.
- Naik R. A.* Analysis of woven and braided fabric reinforced composites. NASA CR-194930. — 1994. — 46 p.
- Shrotriya P., Sottos N. R.* Viscoelastic response of woven composite substrates // Composites Science and Technology. — 2005. — No. 65. — P. 621–634.
- Zhu Q., Shrotriya P., Sottos N. R., Geubelle Ph. H.* Three-dimensional viscoelastic simulation of woven composite substrates for multilayer circuit boards // Composites Science and Technology. — 2003. — P. 1971–1983.