

УДК: 539.3

Моделирование гибких тканых композитов в системе ANSYS Mechanical APDL

Д. А. Кожанов^{1,2,a}, А. К. Любимов¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65

E-mail: ^a pbk996@mail.ru

Получено 31.05.2018, после доработки — 14.06.2018.

Принято к публикации 01.08.2018.

В настоящей работе предложен вариант импорта в систему ANSYS Mechanical APDL модели поведения гибких тканых композиционных материалов с армирующей тканью полотняного переплетения при статическом растяжении вдоль нитей армирования. Импорт осуществлен при помощи использования, разработанного авторами и представленного в текущей работе модуля интеграции, основанного на использовании аналитической модели деформирования исследуемого материала, представленной в опубликованных ранее статьях и учитывающей изменения геометрической структуры, происходящие в армирующем слое материала в процессе деформирования, образование необратимых деформаций и взаимодействие накрест лежащих нитей армирующей ткани. Во введении кратко описаны основные вводимые характеристики полотняного переплетения армирующей ткани и аналитической модели, импортируемой в ANSYS. Аналитическая модель основана на описании процессов деформирования элементарной периодической ячейки исследуемого класса материалов. Входными параметрами модуля являются механические характеристики материалов, входящих в состав композита (связующее и материал нитей армирования), геометрические характеристики переплетения армирующей ткани. Алгоритм импорта модели основан на вычислении и передачи в ANSYS расчетных точек диаграммы деформирования материала при одноосном растяжении вдоль направления армирования и использовании вложенных в систему ANSYS пользовательской моделей материала Multilinear Kinematic Hardening. Аналитическая модель, импортируемая при помощи представленного модуля, позволяет моделировать композиционный материал с армирующей тканью без детального описания геометрии переплетения нитей при моделировании материала в целом. Выполнена верификация импортированной модели. Для верификации были проведены натурные экспериментальные исследования и численное моделирование растяжения образцов из гибких тканых композитов. В экспериментах принимали участие образцы трех марок: VP4126, VP6131 и VP6545. Погрешность импортированной в ANSYS модели составила менее 10 % относительно экспериментальных исследований для всех марок материала. Анализ полученных результатов показал хорошее качественное и количественное согласование расчетов в системе ANSYS с применением импортированной модели и натурных испытаний до величин предельных деформаций, соответствующих разрушению образцов материала для всех исследуемых марок гибких тканых композитов, что позволяет сделать вывод о возможности применения предложенного модуля при моделировании процессов деформирования гибких тканых композитов и конструкций, созданных из таких материалов при статическом одноосном растяжении вдоль нитей армирования.

Ключевые слова: гибкий тканый композиционный материал, эксперимент, модель материала, необратимые деформации, ANSYS, диаграмма деформирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-01124).

UDC 539.3

Import model of flexible woven composites in ANSYS Mechanical APDL

D. A. Kozhanov^{1,2,a}, A. K. Lyubimov¹

¹ Nizhny Novgorod State University,
23 Gagarin ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

² Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
65 Ilyinskaya st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: ^a pbk996@mail.ru

*Received 31.05.2018, after completion — 14.06.2018.
Accepted for publication 01.08.2018.*

A variant of import into ANSYS Mechanical APDL system of the model of behavior of flexible woven composite materials with reinforcing weaving cloth of linen at static stretching along the reinforcement yarns is offered. The import was carried out using an integration module based on the use of an analytical model of deformation of the material under study. The model is presented in the articles published earlier and takes into account the changes in the geometric structure occurring in the reinforcing layer of the material during the deformation process, the formation of irreversible deformations and the interaction of cross-lying reinforcing fabric threads. In the introduction input characteristics of the plain weave of the reinforcing fabric and the analytical model imported into ANSYS are briefly described. The input parameters of the module are the mechanical characteristics of the materials that make up the composite (binder and material of reinforcement yarns), the geometric characteristics of the interlacing of the reinforcing fabric. The algorithm for importing the model is based on the calculation and transfer in ANSYS of the calculated points of the material stress-strain diagram for uniaxial stretching along the reinforcement direction and using the Multilinear Kinematic Hardening model material embedded in the ANSYS. The analytical model imported with the help of the presented module allows to model a composite material with reinforcing fabric without a detailed description of the geometry of the interlacing of threads during modeling of the material as a whole. The imported model was verified. For verification full-scale experimental studies and numerical simulation of the stretching of samples from flexible woven composites were carried out. The analysis of the obtained results showed good qualitative and quantitative agreement of calculations.

Keywords: flexible woven composite, experiment, material model, permanent deformation, ANSYS, stress-strain diagram

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 789–799 (Russian).

The work was supported by RFBR (project No. 16-08-01124).

1. Введение

В настоящее время активно развиваются исследования гибких тканых композитов (пленочно-тканевых композитов, технических тканей с покрытием): разрабатываются модели их поведения [Кустов, Ибрагимов, 2017; Chen et al., 2014; Guo et al., 2015], проводятся экспериментальные исследования [Lomov et al., 2016; Behera, Dash, 2015; Stier et al., 2015; Nilakantat, Gillespie, 2013], все большее распространение получает численное моделирование процессов деформирования с использованием профессиональных программных комплексов [Моссаковский и др., 2014; Дедков и др., 2014; Rossol et al., 2015; Fagiano et al., 2014; Bednarczyk et al., 2015; Rahali et al., 2016].

Экспериментальные исследования, среди которых можно выделить работы [Behera, Dash, 2015; Nilakantat, Gillespie, 2013; Balea et al., 2014], показали, что механические характеристики гибких тканых композитов существенно зависят от внутренней геометрической структуры ткани (толщина и интервал укладки нитей, способ плетения и др.). При моделировании гибких тканых композитов методом конечных элементов (МКЭ) одной из основных проблем является необходимость адекватного описания переплетения нитей в армирующей ткани, что в совокупности с присущей таким материалам физической и геометрической нелинейностью требует значительных вычислительных ресурсов при решении задач деформирования конструкций из тканых композитов. Такие композиты относятся к классу периодически-регулярных материалов, в которых можно выделить периодический элемент (элементарную периодическую ячейку), регулярно повторяющийся в структуре материала. Зная геометрические параметры отдельной элементарной периодической ячейки (ЭПЯ), можно описать геометрические характеристики переплетения нитей в армирующем слое в целом для всего композита [Лихачева, 2011; Dixit et al., 2013]. Для исследования механических свойств самого материала достаточно описать одну ЭПЯ, однако при моделировании конструкций из таких материалов одной ЭПЯ недостаточно. Каждая конструкция или ее элемент имеют уникальные геометрические особенности и геометрическую форму, области концентрации напряжений и др., следовательно, геометрические характеристики ЭПЯ будут изменяться по области конструкции или ее элемента. Этот факт влечет за собой необходимость применения ламинатных моделей [Берендеев и др., 2015; Щербакова, 2014] или полного детального геометрического 3D-моделирования переплетения нитей в армирующей ткани [Zeng et al., 2014; Munoz et al., 2014; Isart et al., 2015; Green et al., 2014] всей конструкции. Выполненные исследования [Кожанов, Любимов, 2017] показали, что корректное использование ламинатных моделей возможно только при малых деформациях, в основном для «жестких» тканых композитов на основе эпоксидной смолы. При полном 3D-моделировании МКЭ одна ЭПЯ должна состоять как минимум из 50 000 конечных элементов [Моссаковский и др., 2014]. Образец из материала размером $16 \times 22 \text{ мм}^2$ содержит порядка 100 ЭПЯ, что требует использования при численном моделировании значительных вычислительных ресурсов.

В работах [Кожанов, Любимов, 2017; Кожанов, Любимов, 2016] предложен подход к моделированию поведения исследуемых материалов на основе аналитической модели. Подход позволяет охватить достаточно широкий класс задач моделирования поведения гибких тканых композитов при статическом растяжении и существенно сократить трудозатраты на вычисления методом конечных элементов.

Наиболее распространенным типом переплетения армирующей ткани, использующейся для армирования композитов, является полотняное. Анализ различных видов полотняных переплетений позволил выделить набор геометрических параметров, используя которые можно адекватно описать геометрию переплетения армирующей ткани в целом [Кожанов, Любимов, 2017]. К основным параметрам полотняного переплетения (рис. 1) было предложено отнести высоту h_o и h_u поперечного сечения нитей основы и утка армирующей ткани, расстояние между нитями основы d_1^o и утка d_1^u , углы подъема θ и φ наклонных участков соответствующих нитей, ширину поперечного сечения нитей основы b_o и утка b_u .

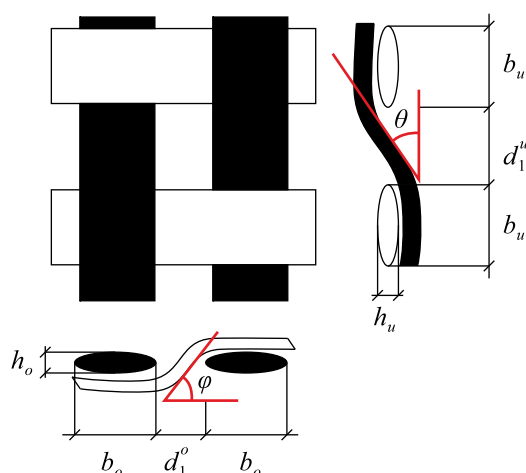


Рис. 1. Геометрические параметры полотняного переплетения, где h_o и h_u — высота поперечного сечения соответствующих нитей, b_o и b_u — ширина поперечного сечения нитей, d_1^o и d_1^u — расстояние между нитями, θ и φ — углы подъема наклонных участков соответствующих нитей

С целью создания пользовательской модели материала в ANSYS на основе предложенной в работе [Кожанов, 2017] аналитической модели был разработан программный модуль, позволяющий найти совокупность точек, определяющих диаграмму деформирования стержневой конструкции, моделирующей поведение гибких тканых композитов при статическом растяжении, и импортировать эти точки в ANSYS.

Для описания процесса деформирования исследуемого материала в аналитической модели используется ЭПЯ (рис. 1). Нить основы при растяжении в продольном направлении представляется в виде плоской рамы [Кожанов, Любимов, 2016], состоящей из трех стержней и находящейся под действием внешней растягивающей силы F и изгибающих моментов M , описывающих симметрию ЭПЯ (рис. 2).

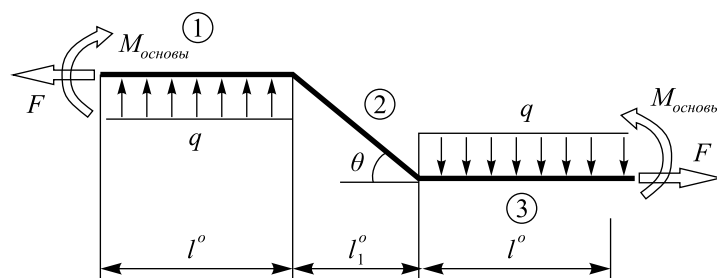


Рис. 2. Структурный элемент армирующих нитей основы в элементарной периодической ячейке (ЭПЯ), где l^o и l_1^o — длины горизонтальных и наклонного участков нитей ЭПЯ, q — распределенная нагрузка от взаимного надавливания нитей основы на нити утка, $M_{основы}$ и F — внутренние усилия, определяемые из условий симметрии и внешней растягивающей нагрузки вдоль нитей основы, θ — угол подъема наклонного участка структурного элемента ЭПЯ

Геометрические параметры рамы (структурного элемента) на рис. 2 определяются геометрией внутренней структуры материала (рис. 1), где $l^o = b_u/2$, $l_1^o = d_1^u$. Аналитическая модель позволяет получить диаграмму деформирования исследуемого материала вплоть до предельных значений натяжения, заданных изготовителями технических тканей, с учетом формоизменения геометрической структуры переплетения армирующих нитей в процессе деформирования, нелинейных деформаций и взаимодействия накрест лежащих нитей переплетения [Кожанов, 2017].

2. Модуль импорта модели гибких тканых композитов в ANSYS

В системе ANSYS развит язык параметрического проектирования, с помощью которого можно создавать пользовательские модели материалов, описывать сложную геометрию конструкций, использовать собственные функции нагрузок и геометрических параметров, а также дистанционно управлять системой.

Любое действие в интерфейсе системы ANSYS дублируется соответствующей командой на встроенном языке проектирования, поэтому создание новой модели материала можно автоматизировать [Кожанов и др., 2016]. Для этого достаточно создать текстовый файл из команд и параметров, который будет содержать все необходимые процедуры для генерации новой модели материала, и импортировать его в систему ANSYS. При помощи вложенных циклов и логических операторов определяются структура и содержание необходимого набора команд.

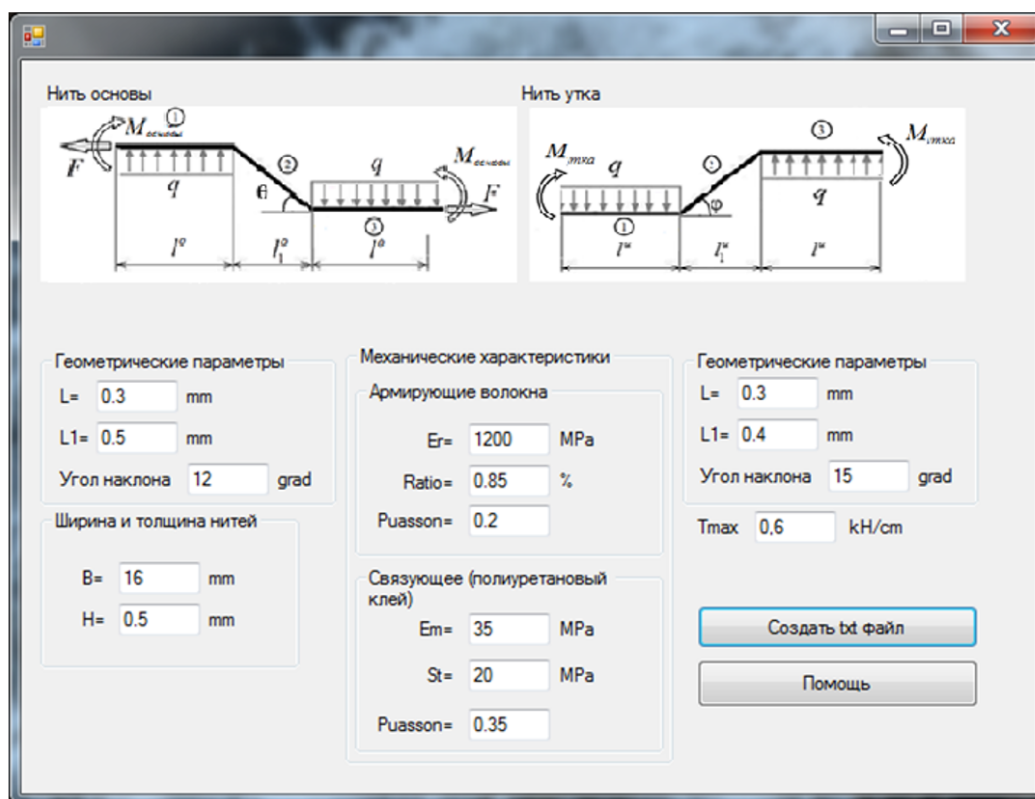


Рис. 3. Внешний вид модуля приложения для ANSYS с внесенными параметрами геометрической структуры и механическими характеристиками материалов (см. пояснения в тексте)

Для возможностей расчета исследуемых материалов при двухосном растяжении целесообразно оценить применимость предложенной модели при одноосном растяжении. В случае согласования результатов натуральных и численных экспериментов при одноосном растяжении предлагается провести исследования материала на двухосное растяжение с обобщением аналитической модели и сравнением результатов. Пользовательская модель материала при одноосном растяжении будет реализована в ANSYS на основе задания совокупности точек диаграммы деформирования $\{\sigma_i, \varepsilon_i\}$, $i = 1..n$, где n — количество расчетных точек диаграммы деформирования. Основные зависимости и формулы, необходимые для определения деформаций ЭПЯ в зависимости от величины растягивающей силы (рис. 2), получены в работах [Кожанов, Любимов, 2017; Кожанов, 2017]. Содержание текстового файла изменяется в зависимости от входных параметров модели (рис. 1), а его структура и объем остаются неизменными. Для автома-

тической генерации текстового файла с учетом введенных параметров модели создан внешний модуль приложения (рис. 3) для системы ANSYS. При введении в окно модуля геометрических параметров переплетения армирующего слоя и механических характеристик компонентов композита автоматически создается командный файл на внутреннем языке проектирования, содержащий все необходимые параметры для генерации пользовательской модели материала гибкого тканого композита в ANSYS.

В качестве «донора» для описания нелинейного поведения гибких тканых композитов [Кожанов, Любимов, 2017] и необратимых деформаций, выявленных по результатам экспериментов на разгрузку образцов материала в работе [Кожанов, 2017], используется вложенная в систему ANSYS модель Multilinear Kinematic Hardening [Ansys, 2013], соответствующая теории течения с линейным кинематическим упрочнением. Модель применяется для описания необратимых деформаций, возникающих в гибких тканых композитах при статическом одноосном непродолжительном деформировании [Кожанов, Любимов, 2017; Кожанов, 2017; Ansys, 2013].

Сгенерированная пользовательская модель материала в ANSYS позволяет моделировать поведения гибких тканых композитов без детального геометрического описания переплетения нитей в армирующем слое в целом для конструкции. Модель уже содержит в себе геометрические параметры, форму переплетения нитей армирующей ткани, особенности формоизменения геометрии армирующего слоя в процессе деформирования [Lee et al., 2013], учитывает образование необратимых деформаций [Кожанов, 2017] и др.

3. Верификация импортированной модели гибкого тканого композита

Для верификации, сгенерированной в системе ANSYS модели, были проведены экспериментальные исследования и численное моделирование растяжения образцов из гибких тканых композитов в системе ANSYS. В экспериментах, проведенных и описанных в работе [Кожанов, 2017], принимали участие образцы гибких тканых композитов трех марок, геометрические параметры армирующего слоя которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Марка композита		
	VP6545	VP6131	VP4126
Угол наклона θ , °	12	15	7
Угол наклона φ , °	15	17	8
Длина d_1^o , мм	0.4	0.35	0.4
Длина d_1^u , мм	0.5	0.45	0.5
Ширина нити основы b_o , мм	0.7		
Ширина нити утка b_u , мм			
Высота нити основы h_o , мм	0.5	0.4	0.25
Высота нити утка h_u , мм	0.5	0.4	0.25
Объемная доля содержания армирующих волокон в нитях r	0.85	0.9	0.98

Исследуемые гибкие тканые композиты были изготовлены из армирующей ткани на основе рубленых лавсановых волокон и полиуретанового связующего материала [Кожанов, 2017]. Механические характеристики материалов представлены в таблице 2, где E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона, σ_t — величина напряжения, при котором начинается образование необратимых деформаций, E_t — модуль упрочнения в области необратимых деформаций.

Таблица 2

Компоненты композита	Материал	Механические характеристики			
		E , МПа	ν	σ_t , МПа	E_t , МПа
Армирующие волокна нитей	Полиэфирные рубленые волокна (лавсан)	1.2×10^3	0.2	–	–
Связующий материал	Поливинилхлорид и полиуретан	35	0.35	20	20

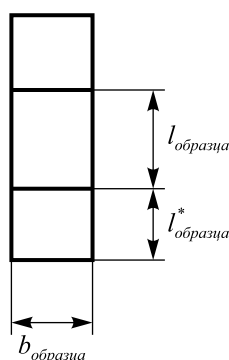


Рис. 4. Образец для испытаний, где $l_{\text{образца}}$ — длина рабочей части, $l_{\text{образца}}^*$ — длина области для захвата образца в испытательной установке, $b_{\text{образца}}$ — ширина образца

В соответствии с поставленными задачами, структурой исследуемых материалов и имеющимися рекомендациями [Кожанов, Любимов, 2017] для проведения натурных испытаний выкраивались образцы (рис. 4) со следующими геометрическими характеристиками: длина рабочей части образца $l_{\text{образца}} = 2.2$ см, ширина $b_{\text{образца}} = 1.6$ см, длина области утолщения для захвата образца $l_{\text{образца}}^* = 1.6$ см. Образцы материала по ширине имели 15 нитей, направленных вдоль основы (направление растяжения), и 20 нитей утка. Образцы вырезались таким образом, чтобы направление нитей основы совпадало с продольной осью образца.

Образцы растягивались вдоль направления нитей основы и определялись диаграммы деформирования в натурном эксперименте и при численном моделировании с использованием предложенного модуля. Натурные испытания проводились сериями по 3 эксперимента для учета статистического разброса данных и приведены в работе [Кожанов, 2017].

Краевая задача о растяжении образца в ANSYS решалась в двумерной постановке с использованием конечного элемента SHELL281. Модель материала в виде диаграммы деформирования импортировалась с использованием предложенного модуля.

Для моделирования одноосного растяжения на границе образца A (рис. 5) вводится ограничение на перемещение $u_y|_A = 0$, на границе B задается перемещение $u_y|_B = -u^*$, боковые грани свободны от нагрузок. На границах A и B возможны горизонтальные перемещения по оси ox . Размеры образцов в натурных экспериментах и при численном моделировании идентичны. В численной постановке задачи геометрические размеры конечных элементов устанавливаются значениями не менее $1/50$ от продольной длины моделируемого образца для исключения влияния полей распределения напряжений в областях приложения внешних нагрузок.

Для верификации интегрированной в модели ANSYS, производится сравнение диаграмм деформирования, полученных по результатам натурного и численного исследований. На рис. 6 приведены диаграммы деформирования образцов композитов марок VP6545, VP6131 и VP4126, полученные при экспериментальных исследованиях [Кожанов, 2017] на установке Amsler HC10 (с использованием деформометра и встроенного датчика силы) и численном моделировании в ANSYS с использованием предложенного модуля.

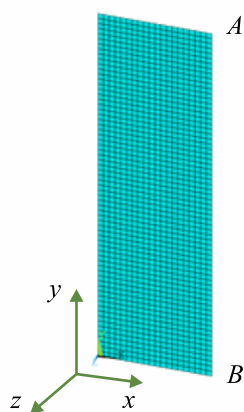


Рис. 5. Расчетная модель образца, где *A* и *B* — торцы, на которых задаются условия перемещения, идентичные условиям при натуральных испытаниях

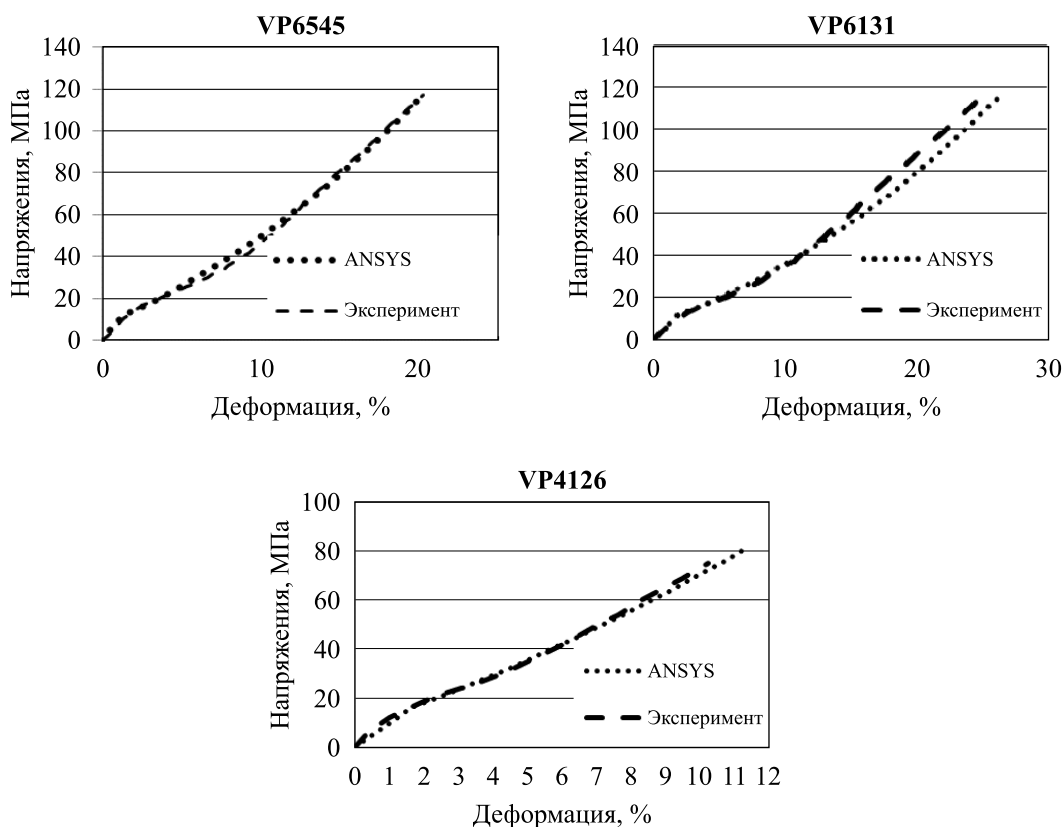


Рис. 6. Диаграммы деформирования для трех марок исследуемого материала

Анализ полученных результатов показал хорошее качественное и количественное согласование результатов до величин предельных деформаций, соответствующих разрушению образцов материала для всех исследуемых образцов гибких тканых композитов марок VP6545, VP6131 и VP4126. Погрешность модели, интегрированной в ANSYS, при решении тестовых задач составила не более 10 % относительно результатов проведенных натуральных экспериментов. Отсюда можно сделать вывод об успешной верификации модели гибких тканых композитов, интегрированной в систему ANSYS.

4. Заключение

Разработан и предложен модуль, позволяющий импортировать аналитическую модель гибкого тканого композита [Кожанов, 2017] в систему ANSYS. Аналитическая модель, импортируемая при помощи представленного модуля, позволяет моделировать композит с армирующей тканью без детального описания геометрии переплетения нитей [Wang, Wang, 2015] при моделировании конструкций в целом. Результаты, полученные при верификации модели в системе ANSYS, хорошо качественно и количественно подтверждаются результатами натуральных экспериментов, что позволяет сделать вывод о возможности применения предложенного модуля при моделировании процессов деформирования гибких тканых композитов при одноосном непродолжительном растяжении вдоль нитей армирования. Вместо полного геометрического моделирования переплетения нитей армирующей ткани в ANSYS достаточно ввести в предложенный модуль основные геометрические характеристики переплетения и механические характеристики материалов композита. Модуль импорта автоматически произведет расчет импортируемых точек диаграммы деформирования и сгенерирует соответствующую модель материала в ANSYS, что позволит моделировать материал со сложной внутренней геометрической структурой сплошной пластинкой.

Список литературы (References)

- Берендеев Н. Н., Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Структурная модель гибкого тканого композита // Проблемы прочности и пластичности. — 2015. — Т. 77. — С. 162–171.
Berendeev N. N., Kozhanov D. A., Liubimov A. K. Strukturnaia model' gibkogo tkanogo kompozita [Structural model of flexible woven composite] // Problems of strength and plasticity [Problemy prochnosti i plastichnosti]. — 2015. — Vol. 77. — P. 162–171 (in Russian).
- Дедков Д. В., Зайцев А. В., Ташкинов А. А.* Эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — Т. 16, № 4 (3). — С. 526–530.
Dedkov D. V., Zaitsev A. V., Tashkinov A. A. Effektivnye uprugie moduli tkanogo kompozita polotnianogo pleteniia s lokal'nymi tekhnologicheskimi defektami [Effective elastic moduli of a composite woven in a plain weave with local technological defects] // Proceedings of the Samara scientific center [Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk]. — 2014. — Vol. 16, No. 4 (3). — P. 526–530 (in Russian).
- Каюмов Р. А., Мангушева А. Р.* Предельный анализ для пленочно-тканевого композиционного материала // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17, № 6. — С. 95–97.
Kaiumov R. A., Mangusheva A. R. Predel'nyi analiz dlia plenочно-tkanevogo kompozitsionnogo materiala [Limit analysis for film-fabric composite material] // Bulletin of Kazan technological University [Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta]. — 2014. — Vol. 17, No. 6. — P. 95–97 (in Russian).
- Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Структурная модель гибкого тканого композита // Проблемы прочности и пластичности. — 2017. — Т. 79, № 2. — С. 156–168.
Kozhanov D. A., Liubimov A. K. Strukturnaia model' gibkogo tkanogo kompozita [Structural model of flexible woven composite] // Problems of strength and plasticity [Problemy prochnosti i plastichnosti]. — 2017. — Vol. 79, No. 2. — P. 156–168 (in Russian).
- Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Модель гибкого тканого композита, учитывающая формоизменение внутренней структуры материала // Проблемы прочности и пластичности. — 2016. — Т. 78, № 3. — С. 311–321.
Kozhanov D. A., Liubimov A. K. Model' gibkogo tkanogo kompozita, uchityvaiushchaia formoizmenenie vnutrennei struktury materiala [A model of an elastic woven composite accounting for the change of form of the internal structure of the material] // Problems of strength and plasticity [Problemy prochnosti i plastichnosti]. — 2016. — Vol. 78, No. 3. — P. 311–321 (in Russian).
- Кожанов Д. А.* Моделирование поведения гибких тканых композитов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — Национальный исследовательский ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. — 19 с.

- Kozhanov D. A.* Modelirovanie povedeniia gibkikh tkanykh kompozitov [Modelling of the behavior of flexible woven composites]: the dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of physico-mathematical Sciences [avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk]. — Nacional'nyj issledovatel'skij NNGU im. N. I. Lobachevskogo [Nizhny Novgorod State University], 2017. — 19 p. (in Russian).
- Кожанов Д. А., Кожанова К. Ю., Лихачева С. Ю.* Возможности управления системой ANSYS через программирование сторонних приложений // VI Всероссийский фестиваль науки: сборник докладов в 2-х томах. — Н. Новгород, 2016. — Т. 1. — С. 303–307. — URL: <http://www.bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/education/864865-1.pdf> (дата обращения 24.01.2018).
- Kozhanov D. A., Kozhanova K. Yu., Likhacheva S. Yu.* Vozmozhnosti upravleniia sistemoi ANSYS cherez programmirovaniye storonnikh prilozhenii [The control system programming using the ANSYS third-party applications] // VI Vserossiiskii festival' nauki: sbornic dokladov v dnuh tomah [VII Russian festival of science]. — Nizhny Novgorod, 2016. — Vol. 1. — P. 303–307 (in Russian).
- Кустов А. А., Ибрагимов А. М.* Математические модели технических тканей с покрытием // Строительные материалы. — 2017. — № 1–2. — С. 94–98.
- Kustov A. A., Ibragimov A. M.* Matematicheskie modeli tekhnicheskikh tkanei s pokrytiem [Mathematical model of technical coated fabrics] // Building material (Stroitel'nye materialy). — 2017. — No. 1–2. — P. 94–98 (in Russian).
- Лихачева С. Ю.* Численное моделирование процессов деформирования и разрушения сред с регулярной структурой // Вестник МГСУ. — 2011. — Т. 1, № 2. — С. 158–162.
- Likhacheva S. Yu.* Chislennoe modelirovanie protsessov deformirovaniia i razrusheniia sred s reguliarnoi strukturoi [Numerical modeling of processes of deformation and destruction of environments with a regular structure] // Vestnik MGSU [Vestnik MGSU]. — 2011. — Vol. 1, No. 2. — P. 158–162 (in Russian).
- Моссаковский П. А., Антонов Ф. К., Белякова Т. А., Костырева Л. А., Брагов А. М., Баландин В. В.* Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ тканых композитов в условиях ударного нагружения // Проблемы прочности и пластичности. — 2014. — Вып. 76 (1). — С. 39–45.
- Mossakovskii P. A., Antonov F. K., Belyakova T. A., Kostyreva L. A., Bragov A. M., Balandin V. V.* Eksperimental'noe issledovanie i konechno-elementnyi analiz tkanykh kompozitov v usloviakh udarnogo nagruzheniia [Experimental study and finite element analysis of woven composites under conditions of shock loading] // Problems of strength and plasticity [Problemy prochnosti i plastichnosti]. — 2014. — No. 76 (1). — P. 39–45 (in Russian).
- Щербакова А. О.* Тканевый композит. Оценка упругодиссипативных характеристик // Вестник ЮУрГУ. Сер. Математика. Механика. Физика. — 2014. — Т. 6, № 2. — С. 40–48.
- Shcherbakova A. O.* Tkanevyi kompozit. Otsenka uprugodissipativnykh kharakteristik [Fabric composite. Assessment provocatively characteristics] // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematics. Mechanics. Physics [Vestnik YUUrGU. Ser. Matematika. Mekhanika. Fizika]. — 2014. — Vol. 6, No. 2. — P. 40–48 (in Russian).
- ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS.* ANSYS Inc. Электрон. дан. и прогр. — 2013.
- Balea L., Dusserre G., Bernhart G.* Mechanical behavior of plain-knit reinforced injected composites: Effect of inlay yarns and fibre type // Composites: Part B. — 2014. — Vol. 56. — P. 20–29.
- Bednarczyk B. A., Stier B., Simon J.-W., Reese S., Pineda E. J.* Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites // Composite Structures. — 2015. — Vol. 121. — P. 258–270.
- Behera B. K., Dash B. P.* Mechanical behavior of 3D woven composites // Material and Design. — 2015. — Vol. 67. — P. 261–271.
- Chen Z., Yang F., Meguid S. A.* Multi-level modeling of woven glass/epoxy composite for multilayer printed circuit board application // International Journal of Solid and Structures. — 2014. — Vol. 51. — P. 3679–3688.
- Dixit A., Mali H. S., Misra R. K.* Unit cell model of woven fabric textile composite for multiscale analysis // Procedia Engineering. — 2013. — Vol. 68. — P. 352–358.
- Fagiano C., Genet M., Baranger E., Ladaveze P.* Computational geometrical and mechanical modeling of woven ceramic composites at the mesoscale // Composite Structures. — 2014. — Vol. 112. — P. 146–156.
- Green S. D., Long A. C., El Said B. S. F., Hallett S. R.* Numerical modelling of 3D woven preform deformations // Composite Structures. — 2014. — Vol. 108. — P. 747–756.

- Guo H., Wang B., Jia P., Yang C.* In-plane shear behaviours of a 2D-SiC/SiC composite under various loading conditions // *Ceramic International*. — 2015. — Vol. 41. — P. 11562–11569.
- Isart N., El Said B., Ivanov D. S., Hallett S. R., Mayugo J. A., Blanco N.* Internal geometric modelling of 3D woven composites: A comparison between different approaches // *Composite Structures*. — 2015. — Vol. 132. — P. 1219–1230.
- Lee M. G., Lee K. W., Hur H. K., Kang K. L.* Mechanical behavior of a wire-woven metal under compression // *Composite Structures*. — 2013. — Vol. 95. — P. 264–277.
- Lomov S. V., Verpoest I., Xu J., Daggumati S., Paepegem W., Degrieck J.* A comparative study of twill weave reinforced composites under tension-tension fatigue loading: Experiments and meso-modelling // *Composite Structures*. — 2016. — Vol. 135. — P. 306–315.
- Munoz R., Martinez V., Sket F., Gonzalez C., LLorca J.* Mechanical behavior and failure micromechanisms of hybrid 3D woven composites in tension // *Composites: Part A*. — 2014. — Vol. 59. — P. 93–104.
- Nilakantat G., Gillespie J. W. Jr.* Yarn pull-out behavior of plain woven Kevlar fabrics: Effect of yarn sizing, pullout rate, and fabric pre-tension // *Composite Structures*. — 2013. — Vol. 101. — P. 215–224.
- Rahali Y., Goda I., Ganghoffer J. F.* Numerical identification of classical and nonclassical moduli of 3D woven textiles and analysis of scale effects // *Composite Structures*. — 2016. — Vol. 135. — P. 122–139.
- Rossol M. N., Rajan V. P., Zok F. W.* Effect of weave architecture on mechanical response of 2D ceramic composites // *Composites: Part A*. — 2015. — Vol. 74. — P. 141–152.
- Stier B., Simon J.-W., Reese S.* Comparing experimental to numerical meso-scale approach for woven fiber reinforced plastics // *Composite Structures*. — 2015. — Vol. 122. — P. 553–560.
- Wang H., Wang Z.* Quantification of effects of stochastic feature parameters of yarn on elastic properties of plain-weave composite. Part 1: Theoretical modeling // *Composites: Part A*. — 2015. — Vol. 78. — P. 84–94.
- Zeng X., Drown L. P., Endruweit A., Matveev M., Long A. C.* Geometrical modelling of 3D woven reinforcements for polymer composites: Prediction of fabric permeability and composite mechanical properties // *Composites: Part A*. — 2014. — Vol. 56. — P. 150–160.