

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ

Стородубцева Т.Н.<sup>1</sup>, Аксомитный А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж, Россия (394087, г. Воронеж, ВГЛТА, ул. Тимирязева, 8), e-mail: tamara-tns@yandex.ru

**Определение сложного напряженного и деформированного состояний древесины и полимерной матрицы – является крайне не изученным. Одной из основных задач исследований явился анализ состояний в кубе из древесного стекловолоконного композиционного материала под действием усадки и набухания при всестороннем увлажнении и, в особенности, стесненного набухания древесного наполнителя, в который диффузионно при адсорбции из полимера проникает вода. По результатам вычислений были созданы компьютерные имитационные модели возникающих напряжений и деформаций, построены графики нормальных напряжений в сечениях куба из композиционного материала, произведен анализ двух вариантов напряженного и деформированного состояния в кубике из древесины. Найдены величины главных напряжений, определены через направляющие косинусы положения главных площадок, а затем величины главных относительных деформаций.**

Ключевые слова: модель, древесина, напряжения, деформации, прочность, упругость, усадка, набухание.

## MODELLING OF THE DIFFICULT TENSION OF WOOD AND POLYMERIC MATRIX

Storodubtseva T.N.<sup>1</sup>, Aksomitny A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> "Voronezh State Forestry Academy", Voronezh, Russia, (394087, Voronezh, VGLTA, Timiryazev St., 8), e-mail: tamara-tns@yandex.ru

**Definition difficult strained and deformed conditions of wood and a polymeric matrix – is extremely not studied. One of the main objectives of researches was the analysis of states cubed from a wood glass-fiber composite material under the influence of shrinkage and swelling at comprehensive moistening and, in particular, the constrained swelling of wood filler into which diffuzionno at adsorption from polymer water gets. By results of calculations computer imitating models of the arising tension and deformations were created, schedules of normal tension in cube sections are constructed of a composite material, the analysis of two options strained and deformed is made states in a cube from wood. Sizes of the main tension are found, sizes of the main relative deformations are determined through directing cosines of provision of the main platforms, and then.**

Keywords: model, wood, tension, deformations, durability, elasticity, shrinkage, swelling.

Современная тенденция развития транспортного строительства в России направлена на использование в производстве материалов техногенного сырья, в частности промышленных отходов. Рециклинг отходов способствует защите окружающей среды от загрязнения, решает проблему утилизации опасных отходов и обеспечивает промышленность дешевым сырьём. Наиболее перспективными материалами на сегодняшний день являются композиционные материалы (КМ) на основе древесных и промышленных отходов. В России использование КМ в сфере транспортного строительства принимает промышленные масштабы. Расширение области применения и создание новых КМ обуславливает предъявление соответствующих требований по физико-механическим характеристикам, в частности по прочностным параметрам, что приводит к необходимости разработки новых методов и средств математического моделирования свойств композитов [2].

В настоящее время в достаточной мере проработаны положения общей теории математического моделирования, созданы теоретические основы общей методологии моделирования КМ. Однако существующие методы расчета характеристик элементов транспортного строительства, как правило, основаны на предположениях о характере распределения микронапряжений в матрице и волокнах, что позволяет получить относительно простые аналитические соотношения напряженного и деформированного состояний композитов. Такие методы часто не обеспечивают необходимой точности расчетов.

Таким образом, на данный момент весьма актуальным является создание новых научных основ технологии получения эффективных и экологически безопасных композиционных материалов с использованием отходов лесной, нефтехимической, полиэтиленовой и других отраслей промышленности, что позволит создать новые элементы и изделия, используемые в транспортном строительстве [4].

Весьма актуальным является исследование физических свойств природных полимеров, к которым относится древесина. Композиционный материал чаще всего работает в условиях сложного напряженного и деформированного состояний (НДС). Это утверждение полностью относится и к изделиям транспортного строительства, таким как шпалы, плиты, блоки и т.д., состоящим, в основном, из композита и заполнителя в виде древесины [5]. Однако существующие в настоящее время приборы для механических испытаний композиционного материала реализуют в испытываемых образцах, как правило, простое НДС – одноосное растяжение-сжатие, простой или чистый сдвиг, изгиб.

Обратим внимание на то, что нормальные напряжения являются внешней удельной силой, которая приложена к образцу определенной формы и меняет внутренние напряжения, это условные напряжения, или условный эквивалент внутренних напряжений, т.к. обязательным условием являются форма образца и определенный порядок проведения испытаний. Что такое внутренние напряжения, как и где они возникают, можно понять, только разобравшись в физике процесса сопротивляемости материала деформированию (понятие элементарного объема из механики разрушения, в котором и происходят характерные изменения материала при его деформировании).

Мы можем измерить продольные и поперечные деформации вдоль и поперек оси приложенной силы, которые определяются как алгебраические суммы проекций векторов внутренних физических деформаций.

Это несоответствие усложняет задачу прогнозирования механических свойств композита, работающих в различных изделиях специального назначения в реальных условиях эксплуатации. На основе экспериментов, проведенных в простом НДС, с помощью чисто рас-

четных методов трудно с хорошей точностью рассчитать свойства композита в сложном НДС.

В настоящее время механические свойства композиционных материалов для шпал, плит и др. задаются при проектировании в большинстве случаев всего двумя характеристиками (модулями Юнга и всестороннего сжатия) [6]. Сколько и какие характеристики надо включать в расчетный метод проектирования композита, какими зависимостями описывать механические свойства – такие вопросы в настоящее время исследованы недостаточно. Если мы не будем изучать этот вопрос - не поймем, как правильно включить свойства материалов в расчетные методы, и попытки приблизить результат расчета к реальности не приведут к требуемому повышению качества изделия [3].

Появление высокопроизводительной и недорогой вычислительной техники, а также программное обеспечение к ней значительно облегчает многие трудоемкие математические расчеты.

Рассмотрим спроектированные составы древесного полимерпесчаного композиционного материала (ДППКМ) для изделий транспортного строительства, расчет которых был основан на обеспечении прочности и жесткости при различных видах механических нагрузок – кратковременных, длительно действующих и динамических, остались мало изученными и неучтенными в нем целый ряд физических воздействий – усадка, набухание под действием воды и их сочетания. Сложным и совершенно не изученным являются напряженное и деформированное состояния в окрестности произвольной точки объема элемента конструкции из древесного композита, возникающие в нем под действием вышеназванных факторов.

В связи с изложенным в качестве одной из основных задач исследований явился анализ напряженного и деформированного состояний в кубе из ДППКМ под действием усадки и набухания при всестороннем увлажнении и, в особенности, стесненного набухания древесного заполнителя, в который диффузионно при адсорбции из полимера проникает вода.

За объект исследований был принят куб из ДППКМ, представляющий собой кубик из древесины сосны (рис. 1), выпиленный из ее ствола в соответствии с тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии и заключенный в полимерную оболочку из полимерпесчаного КМ (рис. 2).

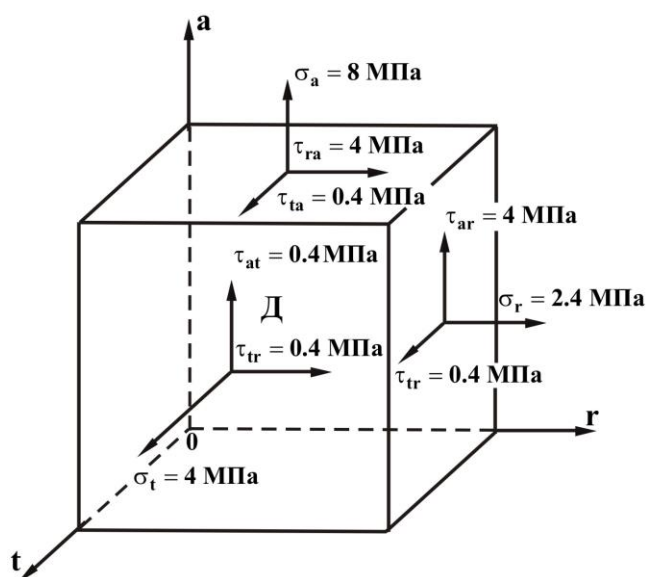


Рис. 1. Объемное напряженное состояние у произвольной точки «О» в объеме кубика из древесины сосны под действием усадочных напряжений в полимерной оболочке из ППКМ и давления набухания.

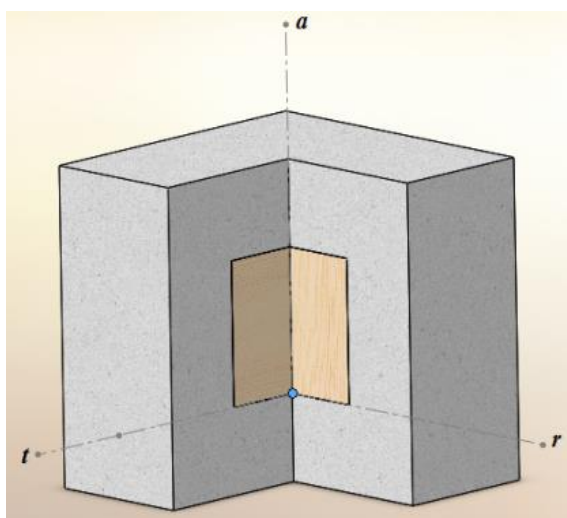


Рис. 2. Куб из древесины сосны, помещенный в полимерную оболочку из ППКМ.

Это позволило, ввиду малого объема кубика, пренебречь кривизной годичных слоев и приписать древесине свойства ортогональной анизотропии, т.е. считать ее ортотропным телом, имеющим три взаимно перпендикулярные плоскости упругой симметрии. Две из них продольные (по отношению к годичным слоям) – это радиальная и тангенциальная плоскости, третья – перпендикулярная к направлению волокон [1].

Направления, нормальные к плоскостям упругой симметрии, называют главными направлениями упругости. Их совмещают с направлениями координатных осей и обознача-

ют соответственно:  $a$  – вдоль волокон,  $r$  – радиальное направление поперек волокон,  $t$  – тангенциальное направление поперек волокон.

Таким образом, модель объекта испытаний выглядит следующим образом (рис. 3).

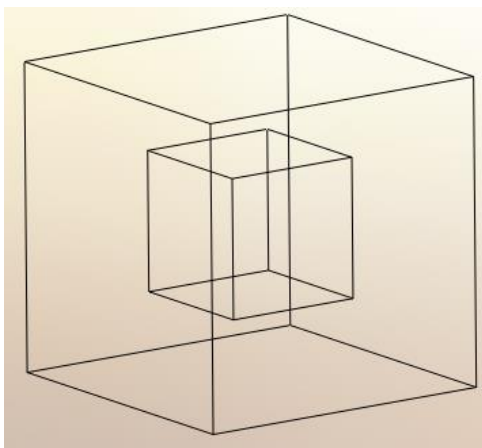
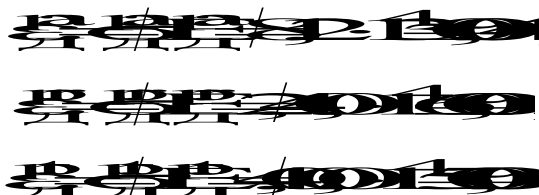


Рис. 3. Модель объекта исследований.

Для определения главных напряжений, положения главных площадок, а также главных упругих относительных деформаций и их направления, помимо нормальных напряжений, изображенных на рисунке 1, использовали (при  $T=20$  °C и  $W=12\%$ ) следующее.

Упругие относительные деформации кубика из древесины, растяжение (рис. 1):



Модули сдвига:  $G_{ra}=0,114 \cdot 10^4$  МПа,  $G_{tr}=0,005 \cdot 10^4$  МПа,  $G_{ta}=0,071 \cdot 10^4$  МПа.

Положительные по своему направлению касательные напряжения:

$$|\tau_{ar}|=|\tau_{ra}| = 4 \text{ МПа}; \quad |\tau_{rt}|=|\tau_{tr}| = 0,4 \text{ МПа}; \quad |\tau_{at}| = |\tau_{ta}| = 0,4 \text{ МПа}.$$

В результате произведен анализ напряженного состояния в кубике древесины сосны (рис. 1), определены компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_t = 0,4 \text{ МПа}, \quad \sigma_r = 2,4 \text{ МПа}, \quad \sigma_a = 8,0 \text{ МПа},$$

$$|\tau_{ar}| = |\tau_{ra}| = 4,0 \text{ МПа}; \quad |\tau_{rt}| = |\tau_{tr}| = 0,4 \text{ МПа}; \quad |\tau_{at}| = |\tau_{ta}| = 0,4 \text{ МПа};$$

$$\text{инварианты: } I_1 = \sigma_t + \sigma_r + \sigma_a; \quad I_1 = 14,4, \quad I_2 = \sigma_r \sigma_t + \sigma_r \sigma_a + \sigma_t \sigma_a - \tau_{tr}^2 - \tau_{ar}^2 - \tau_{at}^2; \quad I_2 = -44,48, \quad I_3 = \sigma_r \sigma_t \sigma_a + \sigma_r \sigma_a \tau_{tr}^2 + \sigma_t \sigma_a \tau_{ar}^2 + \sigma_r \tau_{at}^2 + 2\tau_{tr} \tau_{ar} \tau_{at}; \quad I_3 = 12,416.$$

Произведен поиск корней полинома ( $r_i$ ) с использованием определителя «М», т.е. найдены значения главных напряжений (учитывая, что  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , МПа):

$$\sigma_1=10,37; \sigma_2=3,97; \sigma_3=0,311.$$

Произведен анализ деформированного состояния, найдены компоненты тензора деформаций:

$$\varepsilon_a=0,00065; \gamma_{ra}=\tau_{ra}/G_{ra}; \gamma_{tr}=\tau_{tr}/G_{tr}; \gamma_{ta}=\tau_{ta}/G_{ta}; \gamma_{ra}=3,509 \cdot 10^{-3}; \gamma_{tr}=8,0 \cdot 10^{-3}; \gamma_{ta}=5,634 \cdot 10^{-4}.$$

Главные деформации для осей a-t:

$$\varepsilon_{a1}=\varepsilon_a; \varepsilon_{a2}=\varepsilon_a; \varepsilon_{a3}=\varepsilon_a; \varepsilon_{t1}=\varepsilon_t; \varepsilon_{t2}=\varepsilon_t; \varepsilon_{t3}=\varepsilon_t.$$

Главные деформации для осей t-r:

$$\varepsilon_{t1}=\varepsilon_t; \varepsilon_{t2}=\varepsilon_t; \varepsilon_{t3}=\varepsilon_t; \varepsilon_{r1}=\varepsilon_r; \varepsilon_{r2}=\varepsilon_r; \varepsilon_{r3}=\varepsilon_r.$$

Главные деформации для осей a-r:

$$\varepsilon_{a1}=\varepsilon_a; \varepsilon_{a2}=\varepsilon_a; \varepsilon_{a3}=\varepsilon_a; \varepsilon_{r1}=\varepsilon_r; \varepsilon_{r2}=\varepsilon_r; \varepsilon_{r3}=\varepsilon_r.$$

Проведенные расчеты показали, что наибольшее главное напряжение, равное  $\sigma_1=10,37$  МПа, меньше, чем предел прочности ППКМ при растяжении ( $\sigma_{\text{по.пч}}^p=19,87$  МПа), но несколько выше предела пропорциональности ( $\sigma_{\text{по.пч}}^p=9,69$  МПа), но наибольшую опасность представляет собой величина главной относительной деформации по направлению между осями t-r, равная  $10 \cdot 10^{-3}$ , которая превышает даже максимальные относительные деформации при трещинообразовании, равные  $6,6 \cdot 10^{-3}$ , т.е. действие воды ухудшило напряженное и деформированное состояния внутри куба из ДППКМ.

По результатам вычислений были созданы компьютерные имитационные модели возникающих напряжений и деформаций [5], возникающие по направлению вдоль волокон (ось a), по радиальному направлению поперек волокон (ось r), по тангенциальному направлению поперек волокон (ось t). На рисунке 4 представлено напряженное и деформированное состояния объекта исследования.

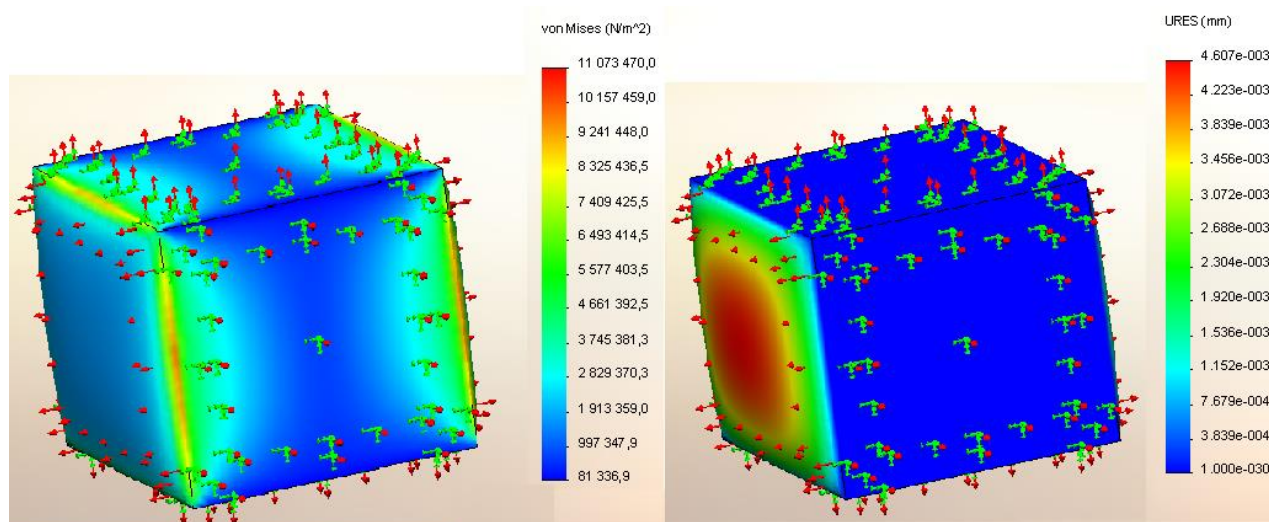


Рис. 4. Наибольшие напряжения и деформации, возникающие в кубике из древесины сосны по тангенциальному направлению поперек волокон (напряженное и деформированное состояния).

Анализируя построенные модели, можно сделать вывод, что в результате набухания древесного наполнителя, в который при адсорбции из полимера проникает вода, максимальные напряжения возникают на кромках куба. Наибольшие напряжения и деформации возникают в тангенциальном направлении.

Исходя из анализа вычислений и полученных компьютерных имитационных моделей, была получена общая модель объекта исследования, из которой видно, что напряжения, возникающие вследствие разбухания древесного наполнителя, воздействуют на полимерную оболочку из ППКМ, а полимерная оболочка на наполнитель. Таким образом, максимальное напряжение, возникающее при таком взаимодействии, составляет 15,19 МПа, а деформация не превышает 0,0263 мм.

### Выводы

Таким образом, получены с применением ЭВМ аналитические выражения, позволяющие подсчитывать главные напряжения и относительные деформации, учитывающие прочностные и упругие характеристики двух основных компонентов ДПКМ – полимерной матрицы и древесины, что позволило определить основную причину появления микро- и макротрещин, а затем разрушение структуры этого материала – это низкую деформативность отвержденного полимерного связующего. Предложенный метод соответствует современным требованиям компьютерного материаловедения.

### Список литературы

1. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. – М. : Лесн. пром-сть, 1978. – 224 с.
2. Баженов Ю.М. Компьютерное материаловедение строительных композитов с трещинами и порами / Ю.М. Баженов, В.А. Воробьев, А.В. Илюхин // Изв. вузов. Строит. – 2001. – № 11. – С. 37-43.
3. Липатов Ю.С. Композиционные полимерные материалы / под ред. Ю.С. Липатова. – Киев : Наукова думка, 1975. – 190 с.
4. Стородубцева Т.Н. Строительные древесностекловолоконистые композиционные материалы для изделий специального назначения : автореф. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-т». - Воронеж, 2005. - 42 с.
5. Стородубцева Т.Н. Некоторые итоги исследований напряженного состояния в объеме ДСВКМ под действием физических факторов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2005. – № 017. – С. 11-14.
6. Стородубцева Т.Н. Водостойкий композиционный материал на основе отходов лесного комплекса для железнодорожных шпал / Т.Н. Стородубцева, В.И. Харчевников // Изв. вузов. Строит. – 2002. – № 12. – С. 74–78.

**Рецензенты:**

Астанин В.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технического сервиса и технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж.

Мануковский А.Ю., д.т.н., доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», г. Воронеж.