

УДК 674.8:630*836

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ И ПОЛИМЕРА

Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный, М. М. Кияшкина

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»

E-mail: tamara-tns@yandex.ru

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 [1]. 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 [1-4].

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 [5, 6]. 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 [7].

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 [7-9]. 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 меняющая 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, т.е. понятие элементарный объем 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 расчетных 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) [6-8]. 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 [6].

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

Рассмотрим спроектированные составы древесного полимерного композиционного материала (КМ) 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 древесного полимерпесчаного КМ 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 древесного полимерпесчаного КМ, представляющий собой кубик из древесины сосны, выпиленный из ее ствола в соответствии с тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии и заключенный в полимерпесчаную оболочку КМ (рисунок 1) [9, 10, 11].

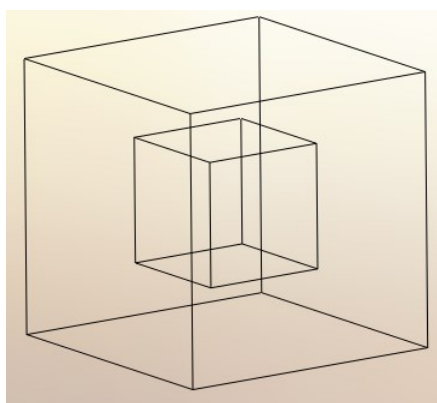


Рисунок 1 – Модель объекта исследований

Это позволило, в виду 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 [4].

Направления, нормальные к плоскостям упругой симметрии, называют главными направлениями упругости. Их совмещают с направлениями координатных осей и обозначают соответственно: «*a*» –

вдоль волокон, «r» – радиальное направление поперек волокон, «t» – тангенциальное направление поперек волокон.

Таким образом, модель объекта испытаний выглядит следующим образом (рис. 1).

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 $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $W = 12 \%$):

Упругие относительные деформации кубика из древесины, растяжение (рис. 2): $\varepsilon_{\text{д}}^{\text{p.a}} = \sigma_{\text{д}}^{\text{p.a}} / E_{\text{д}}^{\text{p.a}} = 8 / 1,234 \cdot 10^4 \cong 0,00065$, $\varepsilon_{\text{д}}^{\text{p.r}} = \sigma_{\text{д}}^{\text{p.r}} / E_{\text{д}}^{\text{p.r}} = 2,4 / 0,06 \cdot 10^4 \cong 0,0040$, $\varepsilon_{\text{д}}^{\text{p.t}} = \sigma_{\text{д}}^{\text{p.t}} / E_{\text{д}}^{\text{p.t}} = 4,0 / 0,05 \cdot 10^4 \cong 0,0080$.

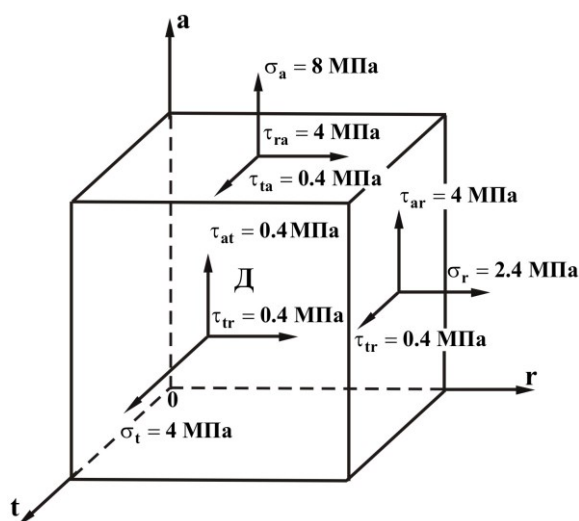


Рисунок 2 – Объемное напряженное состояние у произвольной точки «О» в объеме кубика из древесины сосны под действием усадочных напряжений в полимерной оболочке из полимерного КМ и давления набухания

Модули сдвига:

$$G_{ra} = 0,114 \cdot 10^4 \text{ МПа,}$$

$$G_{tr} = 0,005 \cdot 10^4 \text{ МПа,}$$

$$G_{ta} = 0,071 \cdot 10^4 \text{ МПа.}$$

Положительные по своему направлению касательные напряжения:

$$|\tau_{ar}| = |\tau_{ra}| = 4 \text{ МПа;}$$

$$|\tau_{rt}| = |\tau_{tr}| = 0,4 \text{ МПа;}$$

$$|\tau_{at}| = |\tau_{ta}| = 0,4 \text{ МПа.}$$

В результате произведен анализ напряженного состояния в кубике древесины сосны (рис. 2), определены компоненты тензора напряжений: $\sigma_t = 0,4 \text{ МПа}$, $\sigma_r = 2,4 \text{ МПа}$, $\sigma_a = 8,0 \text{ МПа}$, $|\tau_{ar}| = |\tau_{ra}| = 4,0 \text{ МПа}$; $|\tau_{rt}| = |\tau_{tr}| = 0,4$

МПа ; $|\tau_{at}| = |\tau_{ta}| = 0,4 \text{ МПа}$;

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

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: $G_{ra} = 0,114 \cdot 10^4$; $G_{tr} = 0,005 \cdot 10^4$; $G_{ta} = 0,071 \cdot 10^4$; $\varepsilon_t = 0,008$; $\varepsilon_r = 0,004$; $\varepsilon_a = 0,00065$; $\gamma_{ra} = \tau_{ra} / G_{ra}$; $\gamma_{tr} = \tau_{tr} / G_{tr}$; $\gamma_{ta} = \tau_{ta} / G_{ta}$; $\gamma_{ra} = 3,509 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_{tr} = 8,0 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_{ta} = 5,634 \cdot 10^{-4}$.

Главные деформации для осей а-t:

$$\varepsilon_1 = 8,011 \cdot 10^{-4} > \varepsilon_{д.пщ}^{р.а} = 4,1 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{д.мак}^{р.а} = 8,1 \cdot 10^{-3} ;$$

$$\varepsilon_2 = 6,392 \cdot 10^{-4} < \varepsilon_{д.пщ}^{р.т} = 3,4 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{д.мак}^{р.т} = 6,6 \cdot 10^{-3} .$$

Главные деформации для осей t-r:

$$\varepsilon_1 = 10,0 \cdot 10^{-3} > \varepsilon_{д.пщ}^{р.т} = 3,4 \cdot 10^{-3} > \varepsilon_{д.мак}^{р.т} = 6,610 \cdot 10^{-3} ;$$

$$\varepsilon_2 = 1,528 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{д.пщ}^{р.г} = 4,4 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{д.мак}^{р.г} = 8,7 \cdot 10^{-3} .$$

Главные деформации для осей а-г:

$$\varepsilon_1 = 4,751 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{д.у}^{р.а} = 4,1 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{д.мак}^{р.а} = 8,1 \cdot 10^{-3} ;$$

$$\varepsilon_2 = -1,006 \cdot 10^{-4} < \varepsilon_{д.у}^{сж.г} = -2,4 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{д.мак}^{сж.г} = -5,7 \cdot 10^{-3} .$$

Проведенные расчеты показали, что наибольшее главное напряжение, равное $\sigma_l = 10,37$ МПа, меньше, чем предел прочности полимерпесчаного КМ при растяжении ($\sigma_{по.пщ}^p = 19,87$ МПа), но несколько выше предела пропорциональности ($\sigma_{по.пщ}^p = 9,69$ 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, равное $6,6 \cdot 10^{-3}$, т. е. действие воды ухудшило напряженное и деформированное состояние внутри куба из древесного полимерпесчаного КМ.

По результатам вычислений были созданы компьютерные имитационные модели возникающих напряжений и деформаций [7, 10, 12], возникающие по

направлению вдоль волокон (ось a), по радиальному направлению поперек волокон (ось r), по тангенциальному направлению поперек волокон (ось t). На рисунке 3 представлено напряженное и деформированное состояния объекта исследования.

Анализируя построенные модели можно сделать вывод, что в результате набухания древесного наполнителя, в который при адсорбции из полимера проникает вода, максимальные напряжения возникают на краях 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

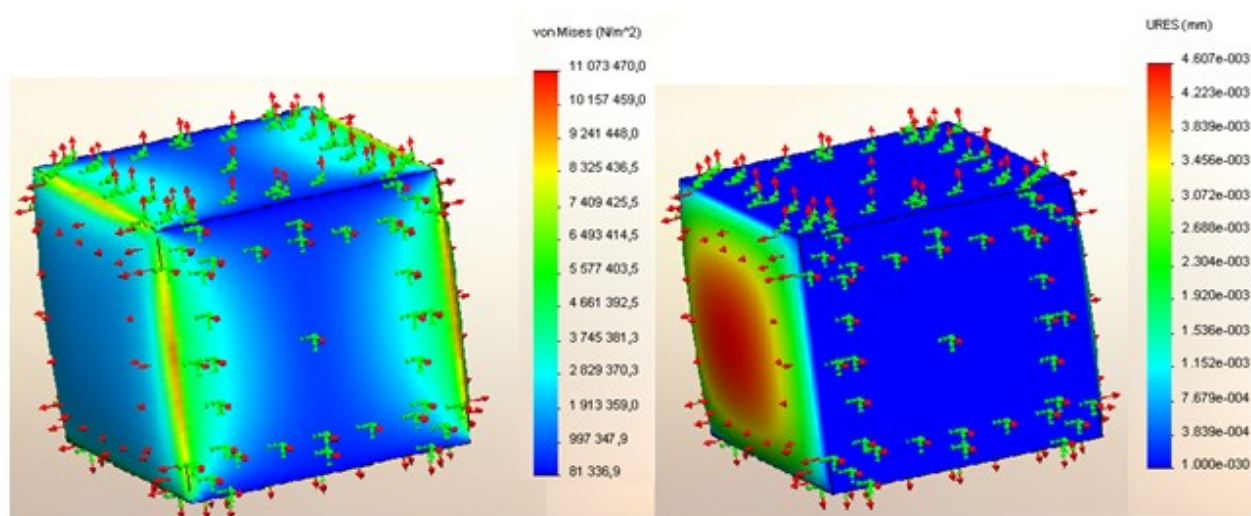


Рисунок 3 – Наибольшие напряжения и деформации, возникающие в кубике из древесины сосны по тангенциальному направлению поперек волокон (напряженное и деформированное состояния)

видно, что напряжения, возникающие вследствие разбухания древесного наполнителя, воздействуют на полимерную оболочку из полимерпесчаного КМ, а полимерная оболочка на наполнитель [13, 14]. 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 древесного полимерпесчаного КМ – полимерной матрицы и древесины, что позволило определить основную причину появления микро- и макротрещин, а затем разрушение структуры этого материала – это низкую де-

формативность отвержденного полимерного связующего. Предложенный метод соответствует современным требованиям компьютерного материаловедения.

Библиографический список

1 Стородубцева, Т. Н. Композиционный материал на основе древесины для железнодорожных шпал : Трещиностойкость под действием физических факторов [Текст] : моногр. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2002. – 216 с.

2 Патуроев, В. В. Полимербетоны [Текст] / В. В. Патуроев // НИИ бетона и железобетона. – М. : Стройиздат, 1987. – 286 с.

3 Стородубцева, Т. Н. Исследование упругих и прочностных характеристик древесины сосны [Электронный ресурс] / Т. Н. Стородубцева, Н. В. Федянина // Воронежский научно-технический вестник. – 2012. – № 2 (2). – С. 78-84.

4 Ашкенази, Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов [Текст] / Е. К. Ашкенази. – М. : Лесн. пром-сть, 1978. – 224 с.

5 Баженов, Ю. М. Компьютерное материаловедение строительных композитов с трещинами и порами [Текст] / Ю. М. Баженов, В. А. Воробьев, А. В. Илюхин // Изв. вузов. Строит. – 2001. – № 11. – С. 37-43.

6 Липатов, Ю. С. Композиционные полимерные материалы [Текст] / Под ред. Ю. С. Липатова. – Киев : Наукова думка, 1975. – 190 с.

7 Стородубцева, Т. Н. Моделирование механических свойств древесного наполнителя [Текст] / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Вып. 2. – С. 50-53.

8 Стородубцева, Т. Н. Водостойкий композиционный материал на основе отходов лесного комплекса для железнодорожных шпал [Текст] / Т. Н. Стородубцева, В. И. Харчевников // Изв. вузов. Строит. – 2002. – № 12. – С. 74-78.

9 Стородубцева, Т. Н. Модель напряженного и деформированного состояния древесины, защищенной полимерной оболочкой [Текст] / Т. Н. Стородубцева // Агропромышленный комплекс на рубеже веков : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию агроинженерного факультета, Воронеж, 26-27 ноября 2015 г. / под общей ред. Н. И. Бухтоярова, В. И. Орбинского ; Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2015. – Ч. 2. – С. 215-223.

10 Стородубцева, Т. Н. Моделирование структуры и механических свойств

древесного полимер-песчанного композита [Текст] / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный // Агропромышленный комплекс на рубеже веков : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию агроинженерного факультета, Воронеж, 26-27 ноября 2015 г. / под общей ред. Н. И. Бухтоярова, В. И. Оробинского ; Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2015. – Ч. 2. – С. 202-207.

11 Shinomura, T. Thermoplastic resin composition including wood fibrous materials : pat. US 3888810 C 08 K 7 / 00 / T. Shinomura ; assignee : Nippon Oil Co., Ltd. Tokyo, (JA). – № 05 / 377711 ; filling date 09.07.1973, publication date 10.06.1975. – 4 p.

12 Стородубцева, Т. Н. Моделирование сложного напряженного состояния древесины и полимерной матрицы [Электронный ресурс] / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5 (55). – 166 п. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/119-14585>; <http://www.science-education.ru/pdf/2014/5/146.pdf>.

13 Стородубцева, Т. Н. Исследование влияния состава древесного полимер-песчаного композита на его механические свойства [Текст] / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2015. – Т. 19, № 6. – С. 132-139.

14 Стородубцева, Т. Н. Исследование упругих и прочностных характеристик древесины сосны [Электронный ресурс] / Т. Н. Стородубцева, Н. В. Федянина // Воронежский научно-технический вестник. – 2012. – № 2 (2). – С. 78-84.