

УДК 630*812:666.974

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, e-mail: tamara-tns@yandex.ru

Проблема рационального и полного использования отходов лесопиления и деревообработки в качестве вторичного технологического сырья давно приобрела важнейшее значение и сохраняет свою актуальность до сих пор. В данной работе поставлена задача разработать математическую модель структуры и механических свойств древесного композиционного материала (ДКМ), позволяющая теоретически изучить зависимость прочностных свойств от параметров исходных компонентов, конкретно от концентрации древесины в составе композиционного материала. Сложившаяся ситуация в области образования, накопления, использования, хранения и утилизации отходов промышленного производства ведет к опасному загрязнению окружающей среды, нерациональному использованию природных ресурсов и, как следствие, к значительному экономическому ущербу. Отходы лесопиления и деревообработки в лучшем случае просто сжигаются, в худшем – сваливаются в непосредственной близости от предприятия, неблагоприятно воздействуя на экологическую обстановку и нарушая естественный баланс в локальной экосистеме. В данной статье представлены результаты научных исследований по проекту, победившему в Конкурсе премий Молодежного правительства Воронежской области при поддержке молодежных программ и проектов.

Ключевые слова: древесина, отходы, механические свойства, изделия, композиционный материал

INFLUENCE OF CONCENTRATION OF WOOD FILLER ON MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL

Storodubtseva T.N., Aksomitnyy A.A.

Federal State Budget Educational Institution of High Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, e-mail: tamara-tns@yandex.ru

The problem of rational and complete waste of lumber and woodworking as a secondary raw material for a long time the process has become paramount, and remains valid until now. In this study the task to develop a mathematical model of the structure and mechanical properties of wood composite material (DKM), allowing theoretically study the dependence of the strength properties of the parameters of the starting components, particularly the concentration of wood in the composite material. The situation in the field of education, accumulation, use, storage and disposal of industrial-stroke leads to dangerous pollution of the environment, an irrational-Term use of natural resources and as a consequence, a significant economic damage. Scrap lumber and woodworking, in the best case, just burned, and at worst – dumped in the vicinity of the company, adversely affecting the environment and disturbing the natural balance of the local ecosystem. This article presents the results of research on the project, won the competition prizes Youth Government of the Voronezh region, with the support of youth programs and projects.

Keywords: wood, waste, mechanical properties, products, composite material

По сути, композиционные материалы (КМ) представляют собой термодинамические неравновесные системы, состоящие из двух или более компонентов, отличающихся по химическому составу, физико-механическим свойствам и разделенных в материале четко выраженной границей. Каждый из компонентов вводится в состав, чтобы придать ему требуемые свойства, которыми не обладает каждый из компонентов в отдельности. Комбинируя объемное соотношение компонентов, можно получать материалы с требуемыми характеристиками [4, 5].

Цель работы – разработать математическую модель структуры и механических свойств древесного композиционного материала (ДКМ), позволяющую теоретически изучить зависимость прочностных свойств от параметров исходных компонентов, конкретно от концентрации и фракционного состава

древесины, технологии получения и внешних воздействий. При построении модели используются в полной мере вычислительные возможности современных компьютеров, а также принципы дискретизации объекта, высокого пространственного разрешения [3].

Структура и механические свойства композиционных материалов чрезвычайно сложны для моделирования из-за необходимости учитывать в модели несколько компонентов и все виды механической связи между ними, форму и взаимное расположение частиц компонентов в материале, распределенную в пространстве внешнюю нагрузку.

Для моделирования структуры и механических свойств древесного композиционного материала используется метод динамики частиц, который в последние десятилетия все чаще используется в различных отраслях науки и техники [1, 2, 3].

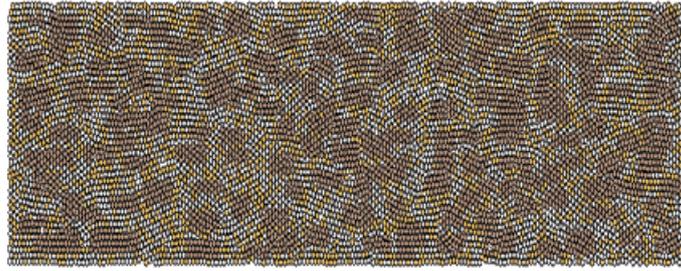


Рис. 1. Представление древесного композиционного материала в модели: выделенное темным – древесина; серым – песок; белым – полимер

Для того чтобы модель обладала высоким пространственным разрешением, моделируемый образец ДКМ разбивается на множество (1000–20000) элементов (рис. 1).

Моделирование производится в двумерном пространстве XZ , при этом элементы имеют одинаковую круговую форму с одинаковым диаметром $d_{\text{э}}$. Элементы по своим физическим свойствам делятся на три типа (древесина, полимер, песок).

Элементы имеют возможность двигаться в процессе механических испытаний образца по законам классической механики, что приводит к изменению формы и состояния всего образца. В частности, в модели можно воспроизвести различные виды разрушения материала, механические колебания и волны.

Состояние каждого элемента-круга E_i задается четырьмя переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, z_i) и двумя составляющими скорости (v_{xi}, v_{zi}). Механическое взаимодействие элементов между собой принято вязкоупругим, что позволяет заложить в модель основные механические свойства компонентов материала – модуль упругости, коэффициент внутреннего трения, силу адгезии. В модели учитывается,

что между соседними элементами могут возникать силы отталкивания (при внедрении элементов друг в друга) или притяжения (при отдалении сцепленных элементов друг от друга) (рис. 2).

В начальный момент времени элементы случайным образом распределяются в области прямоугольной формы. Для того чтобы первоначально нестабильная механическая система пришла в механическое равновесие, в течение 1 секунды модельного времени производится интегрирование уравнений механического движения элементов. В результате этого элементы формируют плотную упаковку. После этого производится разбиение модельного композита на компоненты. В первую очередь выделяются области пространства, представляющие собой древесину.

В зависимости от концентрации и заданного фракционного состава они представляются определенной комбинацией элементов. Затем оставшиеся элементы, в соответствии с заданным составом, разделяются случайным образом на «полимер» и «песок».

Уравнения движения элементов составляются на основе второго закона Ньютона.

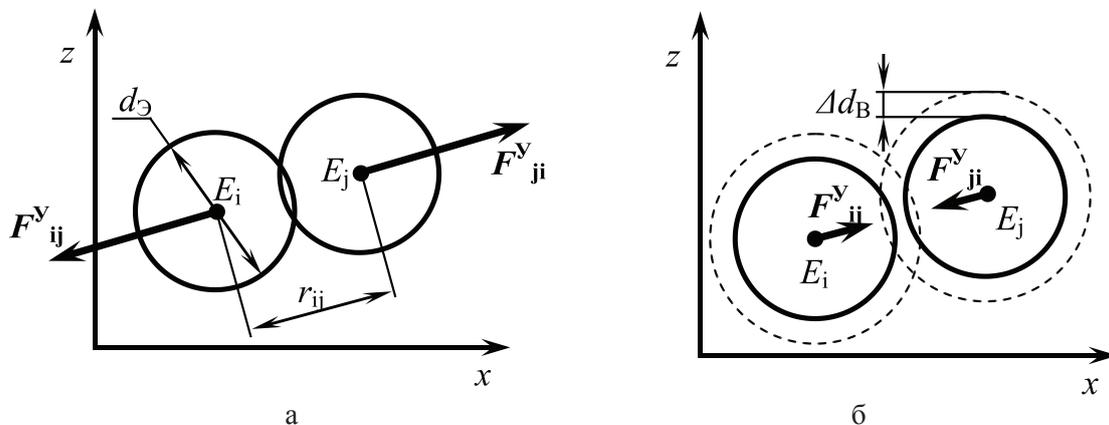


Рис. 2. Контакт сил взаимодействия элементов древесного композиционного материала: а – силы отталкивания при внедрении элементов друг в друга; б – силы притяжения при удалении элементов друг от друга до определенного расстояния

Используемые уравнения представляют собой дифференциальные уравнения второго порядка и решаются в процессе моделирования численным методом – методом Рунге – Кутты второго порядка

$$\begin{aligned} x_i^{\tau+1} &= x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \\ v_{xi}^{\tau+1} &= v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ z_i^{\tau+1} &= z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \\ v_{zi}^{\tau+1} &= v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (1)$$

где i – номер элемента; τ и $\tau+1$ – индексы текущего и следующего временного шага; Δt – шаг интегрирования по времени; x_i, v_i, a_i – координата, скорость, ускорение элемента.

Данный численный метод имеет второй порядок точности по координате и первый порядок точности по скорости. Метод является универсальным, надежным, а также быстро программируемым. Шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений составлял $\Delta t = 0,0001$ с.

По общепринятой классификации моделей предлагаемая модель является алгоритмической, но не аналитической. Это означает, что выходные характеристики модели рассчитываются по входным не путем аналитических преобразований (это в принципе невозможно для моделируемого процесса), а с помощью пространственной и временной дискретизации и соответствующего алгоритма расчета. Расчет по приведенным выше формулам является довольно громоздким и включает в себя три цикла, вложенных один в другой: по номеру компьютерного эксперимента, по номеру временного шага и по номеру элемента.

Для решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, которая лежит в основе модели, разработана компьютерная программа для моделирования структуры и механических свойств древесного композиционного материала, которая разработана в среде Borland Delphi 7.0 на языке программирования Object Pascal. Программа предназначена для моделирования механического поведения древесного композиционного материала заданного состава. В процессе работы программа реализует испытание образца на изгиб, непрерывно выводит на экран компьютера изображение образца и изгибающих пуансонов, а также диаграмму напряжение-деформация.

Основные технические характеристики программы: количество элементов композита от 5000 до 20000; ориентировочное время проведения одного компьютерного эксперимента около 5 мин (при тактовой частоте процессора 3 ГГц).

В модели используется целый ряд коэффициентов, связанный с дискретизацией

среды (разбиением на отдельные элементы шаровой формы): m_3, d_3, c, d . Изложим методику их определения по справочным данным для исходных компонентов.

Расчет массы одного элемента среды (древесины, полимера, или песка) m_3 производится с использованием табличного значения плотности материала и геометрических соображений:

$$m_3 = \rho \cdot V_3 = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_3}{2} \right)^3 \cdot k_{\Phi} = \frac{\pi}{6} \rho d_3^3 k_{\Phi}, \quad (2)$$

где ρ – объемная плотность материала, кг/м³; V_3 – объем элемента, м³; k_{Φ} – коэффициент формы, необходимый для учета того, что шарообразные элементы не заполняют пространство полностью (между элементами остаются незаполненные поры), безразмерный. Значение коэффициента k_{Φ} зависит от плотности случайной упаковки и принято равным 1,4.

Для расчета жесткости взаимодействия двух элементов используется табличное значение модуля упругости материала и также геометрические соображения, касающиеся дискретизации:

$$c_{\Pi} = E \cdot \frac{\pi d}{4} k_{\Phi}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала, Па.

Коэффициент вязкого трения d связан внутренним трением в рассматриваемой среде и определяется по справочным значениям расстояния затухания звуковых волн в данной среде.

Коэффициент α обнуления взаимодействия между соседними элементами рассчитывается по справочным значениям предельной деформации при испытании образцов материала на растяжение.

Для изучения влияния концентрации древесины c_d в древесном композиционном материале проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли c_d от 0 до 100% с шагом 10% при постоянном соотношении концентраций полимера и песка $c_{\text{Пп}}:c_{\text{Пс}} = 2:1$. Обнаружено, что наилучшими механическими свойствами материал обладает при концентрации древесины около 50...55% (концентрация полимера и песка при этом $c_{\text{Пп}} = 30...33\%$, $c_{\text{Пс}} = 17...20\%$). С увеличением концентрации древесины от 0 до 55% увеличиваются $\sigma_{\text{п}}$ и $\epsilon_{\text{п}}$, то есть увеличивается прочность и уменьшается хрупкость материала за счет армирования композита древесными фрагментами и уменьшения концентрации песка, вызывающего хрупкость. Однако дальнейшее увеличение концентрации древесины (от 55 до 100%) не целесообразно, так как уменьшается содержание полимера, и его становится недостаточно, чтобы надежно окружить древесные

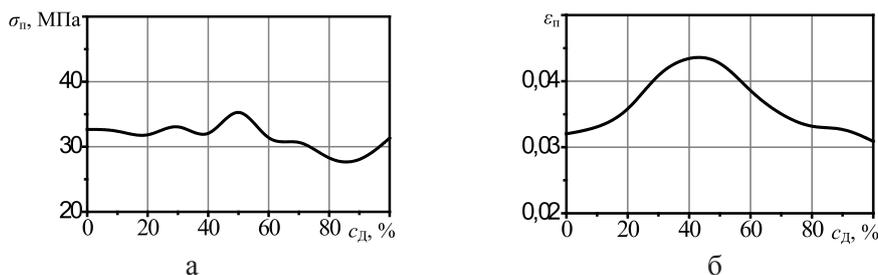


Рис. 3. Зависимость механических характеристик
древесного композиционного материала от концентрации древесины:

а – зависимость предела прочности σ_n ; б – зависимость предельной относительной деформации ε_n

фрагменты и обеспечить прочную связь между ними. При этом материал также становится хрупким и приближается по свойствам к слабо склеенным и слежавшимся опилкам. Кроме того, снижение предела прочности σ_n происходит из-за уменьшения содержания песка, придающего прочность материалу. Таким образом, в качестве оптимального можно рассматривать состав 50% древесины + 33% полимера + 17% песка.

На рис. 3 показана зависимость предела прочности (а) и предельной относительной деформации (б) при испытании на изгиб древесного композиционного материала от концентрации древесины. Необходимо отметить, что данная модификация модели адекватна при концентрациях древесины до 80...85%, а при больших концентрациях воспроизводит не отдельные слабо связанные между собой фрагменты древесины, а протяженные связанные участки древесины.

В случае $c_d = 100\%$ воспроизводится цельный образец древесины с изотропными свойствами. Поэтому для концентрации древесины более 80...85% необходима была бы доработка модели.

Выводы

Таким образом, на основе математической модели структуры древесного композиционного материала изучено влияние концентрации древесины в составе на прочностные свойства. Оптимальным составом древесного композиционного материала, при котором достигаются приемлемые предел прочности и предельная деформация, является состав 45...50 об.% древесины, 30...35 об.% полимера, 17...22 об.% песка.

Увеличение роста эффективности производства изделий из древесных композиционных материалов может быть достигнуто за счет замены деревянных и железобетонных изделий [6], и это будет способствовать сохранению строевого леса, использованию отходов лесного комплекса и отходов промышленности, оздоровлению экологической обстановки и созданию новых рабочих мест.

Список литературы

1. Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике / Х. Гулд, Я. Тобочник. – Ч. 2. – М.: Мир, 1990. – 400 с.
2. Кривцов А.М. Деформирование и разрушение тел с микроструктурой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.
3. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. – 3-е изд., испр. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
4. Стородубцева Т.Н. Формирование механических характеристик и макроструктуры композита в зависимости от синергетических эффектов взаимодействия его компонентов // Лесотехнический журнал. – Воронеж, 2013. – № 4(12). – С. 134–138.
5. Стородубцева Т.Н. Исследование влияния свойств древесного наполнителя на трещиностойкость композиционного материала / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4, № 3 (15). – С. 213–220.
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.

References

1. Guld H. Kompjuterne modelirovanie v fizike / H. Guld, Ja. Tobochnik. Ch. 2. M.: Mir, 1990. 400 p.
2. Krivcov A.M. Deformirovanie i razrushenie tel s mikrostrukturoj. M.: FIZMATLIT, 2007. 304 p.
3. Myshkis A.D. Jelementy teorii matematicheskikh modelej. 3-e izd., ispr. M.: KomKni-ga, 2007. 192 p.
4. Storodubceva T.N. Formirovanie mehanicheskikh harakteristik i makrostruktury kompo-zita v zavisimosti ot sinergeticheskikh jeffektov vzaimodejstvija ego komponentov // Lesotehnicheskij zhurnal. Voronezh, 2013. no. 4(12). pp. 134–138.
5. Storodubceva T.N. Issledovanie vlijaniya svojstv drevesnogo zapolnitelja na treshhino-stojkost kompozicionnogo materiala / T.N. Storodubceva, A.A. Aksomitnyj // Lesotehnicheskij zhurnal. 2014. T. 4, no. 3 (15). pp. 213–220.
6. Storodubceva T.N. Vodostojkij kompozicionnyj material na osnove othodov lesnogo kompleksa dlja zheleznodorozhnyh shpal / T.N. Storodubceva, V.I. Harchevnikov // Izv. vuzov. Stroit. 2002. no. 12. pp. 74–78.

Рецензенты:

Афоничев Д.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I», г. Воронеж;

Кондрашова Е.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры технического сервиса и технологии машиностроения, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I», г. Воронеж.