

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ДРЕВЕСНОГО ПОЛИМЕР-ПЕСЧАНОГО КОМПОЗИТА НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Т.Н. СТОРОДУБЦЕВА, *проф.*, ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, *д-р техн. наук*⁽¹⁾,
А.А. АКСОМИТНЫЙ, *асп.* ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова⁽¹⁾

tamara-tns@yandex.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»,
394087, Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

На первом этапе развития отечественной лесопильной промышленности ставился вопрос не об использовании отходов лесопиления, а об их уничтожении, так как эти отходы загромождали территорию вокруг лесозаводов и увеличивали опасность пожара. К сожалению, примерно так же обстоят дела с отходами в настоящее время. Огромное число мелких и средних лесоперерабатывающих производств, которые были созданы и ликвидированы на российской территории в течение последних двадцати лет, окружены неиспользуемыми древесными отходами, объемы которых постоянно увеличиваются. Одним из возможных путей решения данной проблемы является создание новых древесных композитов. В настоящее время практически ни одна научная разработка не обходится без применения современных методов математического моделирования. Это позволяет снизить себестоимость исследования и ускорить получение желаемого результата. В данной статье описана методика моделирования древесного полимер-песчаного композита. Для решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений разработана компьютерная программа «Программа для моделирования структуры и механических свойств древесного полимер-песчаного композита». Программа, разработанная в среде Borland Delphi 7.0 на языке программирования Object Pascal, предназначена для моделирования механического поведения древесного полимер-песчаного композита заданного состава. На данный момент программа реализует испытание образца древесного композита на изгиб, непрерывно выводит на экран компьютера изображение образца и изгибающих пуансонов, а также диаграмму напряжение–деформация. На основе математической модели структуры и механического поведения древесного полимер-песчаного композита изучено влияние состава на прочностные характеристики. Установлено, что вплоть до концентрации древесины 80 % (при одновременной концентрации 13 % полимера и 7 % песка) материал сохраняет высокую прочность и пластичность. При низкой концентрации древесины (40 %) должна быть высокой концентрация полимера (40 %), чтобы обеспечивать связность материала.

Ключевые слова: математическое моделирование, древесина, структура, состав, механические свойства

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. Огромное число мелких и средних лесоперерабатывающих производств, которые создаются и ликвидируются на российской территории в течение последних двадцати лет, окружены неиспользуемыми древесными отходами, объемы которых постоянно увеличиваются. Эти отходы загромождают территорию вокруг лесозаводов и увеличивают опасность пожара. Существует несколько способов утилизации древесных отходов. Наиболее перспективным является использование их в качестве наполнителя в композиционных материалах.

В настоящее время практически ни одна научная разработка не обходится без применения современных методов математического моделирования. Это позволяет сни-

зить себестоимость исследования и ускорить получение желаемого результата. Для разработки нового древесного композита с заданными свойствами экспериментальным путем необходимо изготовить огромное количество образцов, что является долгим и дорогостоящим процессом. В данной статье описана методика моделирования древесного полимер-песчаного композита.

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 [1–4]. В настоящей работе поставлена задача разработать математическую модель структуры и механических свойств древесного полимер-песчаного композита (ДППК), позволяющую теоретически изучить зависимость прочност-

ных и демпфирующих свойств от параметров исходных компонентов, технологии получения и внешних воздействий. При построении модели используются принципы дискретизация объекта, высокого пространственного разрешения. Кроме того, используются в полной мере вычислительные возможности современных компьютеров [5].

Изложим только основные положения модели. Моделирование структуры и механического поведения ДППК производится методом динамики частиц, который в последние десятилетия все чаще применяется в различных отраслях науки и техники [2–6]. Для того, чтобы модель обладала высоким пространственным разрешением, моделируемый образец ДППК разбивается на множество (1000–20000) элементов. Моделирование производится в двумерном пространстве XZ , при этом элементы имеют одинаковую круговую форму с одинаковым диаметром d_3 . Элементы по своим физическим свойствам делятся на три типа (древесина, полимер, песок). В процессе механических испытаний образца элементы имеют возможность двигаться по законам классической механики, что приводит к изменению формы и механического состояния всего образца. В частности, в модели можно воспроизвести различные виды разрушения материала, механические колебания и волны.

Состояние некоторого i -го элемента круга 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).

Уравнения движения элементов составляются на основе второго закона Ньютона

$$\begin{cases} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} (d_3 - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + \\ & + k_{ij} (r_{ij} - d_3) (v_{xi} - v_{xj}), \\ & r_{ij} < d_3 + \Delta d_B; \\ & 0, r_{ij} \geq d_3 + \Delta d_B; \end{aligned} \right\} + \sum_{k=1}^{N_{\text{вн}}} F_{xik}^{\text{вн}}; \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -m_i g + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} (d_3 - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + \\ & + k_{ij} (r_{ij} - d_3) (v_{zi} - v_{zj}), \\ & r_{ij} < d_3 + \Delta d_B; \\ & 0, r_{ij} \geq d_3 + \Delta d_B; \end{aligned} \right\} + \sum_{k=1}^{N_{\text{вн}}} F_{zik}^{\text{вн}}, \end{cases}$$

где i – номер элемента;

m_i – масса i -го элемента;

x_i, z_i – декартовы координаты элемента;

t – время;

N_3 – количество элементов;

j – номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом;

c_{ij} и k_{ij} – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия элементов i и j ;

r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ;

v_{xi}, v_{zi} – декартовы составляющие скорости i -го элемента;

$d_3 + \Delta d_B$ – расстояние ограничения взаимодействия между элементами;

g – ускорение свободного падения;

k – номер внешнего объекта, действующего на материал (в частности, пуансон при испытаниях);

$N_{\text{вн}}$ – количество внешних действующих объектов;

$F_{xik}^{\text{вн}}, F_{zik}^{\text{вн}}$ – декартовы составляющие силы, действующей со стороны k -го внешнего объекта на i -й элемент, рассчитываемые по формулам, соответствующим форме внешнего объекта (прямоугольный и круглый пуансоны, колеса автомобиля и т. д.).

Расстояние r_{ij} между центрами элементов рассчитывается через координаты их центров по теореме Пифагора

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

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 с модельного времени производится интегрирование уравнений механического движения элементов. В результате этого элементы формируют плотную упаковку. После этого производится разбиение модельного композита на компоненты в соответствии с заданными концентрациями компонентов $C_{др}$, $C_{по}$, $C_{пе}$. В первую очередь выделяется множество области пространства, представляющие собой древесину. В зависимости от заданного размера и формы древесных фрагментов (опилки, стружки) они представляются определенной комбинацией элементов, в частности, в форме прямоугольника. Затем, в соответствии с заданным составом, оставшиеся элементы разделяются случайным образом на «полимер» и «песок».

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 из-за сложности моделируемого процесса), а с помощью пространственной и временной дискретизации, и соответствующего алгоритма расчета.

В модели используется ряд коэффициентов, связанный с дискретизацией среды (разбиением на отдельные элементы шаровой формы): m_{γ} , d_{γ} , c , k , Δd_{γ} . Изложим методику их определения по справочным данным для исходных компонентов.

Для решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, которая лежит в основе модели, разработана компьютерная программа «Программа для моделирования структуры и механических свойств древесного полимер-песчаного композита». Программа разработана в среде Borland Delphi 7.0 на языке программирования Object Pascal. Программа предназначена для моделирования механического поведения древесного полимер-песчаного композита заданного состава. В окнах главной интерфейсной формы и в тексте программы могут быть заданы концентрации компонентов, их механические свойства, геометрия модельного образца и технология его формирования [7–10].

В процессе работы программа реализует испытание образца на изгиб, непрерывно выводит на экран компьютера изображение образца и изгибающих пуансонов полукруглой формы, а также диаграмму напряжение–деформация. Программа позволяет использовать количество элементов композита от 5000 до 20000, при этом ориентировочное время проведения одного компьютерного эксперимента порядка 5 мин (при тактовой частоте процессора 3 ГГц).

В процессе компьютерного эксперимента верхний пуансон движется вниз с заданной скоростью ($v_{\gamma} = 0,3$ м/с), при этом модельный образец ДППК опирается на два нижних пуансона, расположенных на расстоянии L_{γ} . Пуансоны имеют рабочие поверхности круговой формы (с радиусом R_{γ}), что соответствует их цилиндрической форме при реальных испытаниях в трехмерном пространстве. Соотношение длины к ширине образца составляет $L : B = 5 : 1$.

По мере изгиба образец сначала деформируется без разрушения (при этом на диаграмме «деформация–напряжение» наблюдается практически линейный рост зависимости $\sigma(\epsilon)$). При определенной деформации образца в нижней части появляется трещина, которая быстро распространяется по всей толщине образца (рис. 1, 2). При этом напряжение на графике $\sigma(\epsilon)$ быстро падает (рис. 3). При дальнейшей деформации происходит постепенное разрушение оставшихся связей между частями образца, вследствие чего напряжение не падает до нуля, а остается на уровне 3–7 МПа.

По максимуму графика $\sigma(\epsilon)$ определяется предел прочности σ_{γ} образца в испытаниях на изгиб. Предельная деформация на изгиб ϵ_{γ} определяется по положению участка резкого спада зависимости $\sigma(\epsilon)$. С точки зрения потенциального применения ДППК желательно, чтобы характеристики σ_{γ} и ϵ_{γ} были как можно большими. Эти условия можно использовать как критерии при поиске оптимальных составов материала.

В рамках данной работы изучено влияние состава ДППК на его прочностные параметры σ_{γ} и ϵ_{γ} . Так как основной новизной

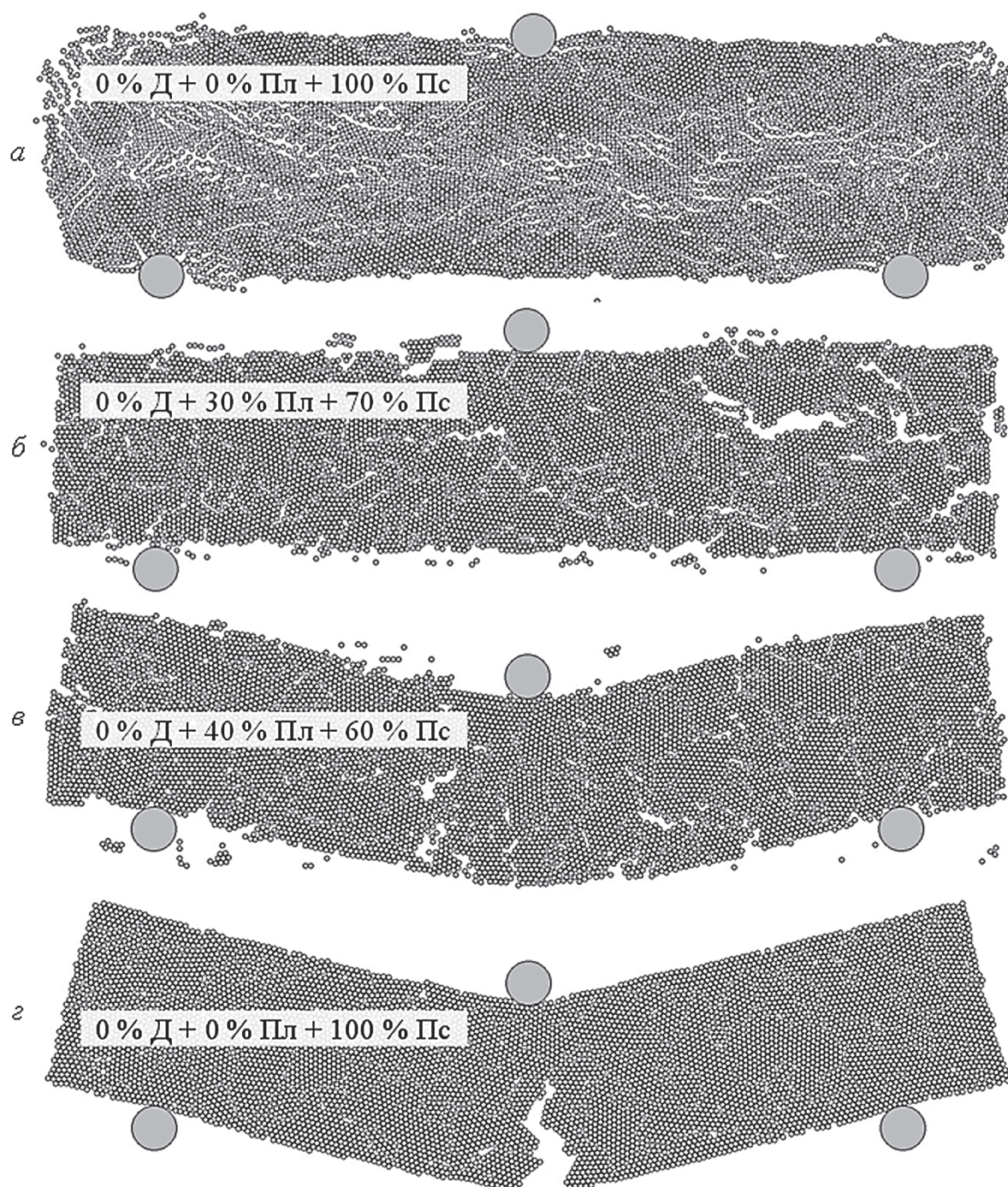


Рис. 1. Разрушение модельных образцов полимер-песчанного композита с различным содержанием компонентов при испытаниях на изгиб

Fig. 1. The destruction of the model samples of a polymer-sand composite with the different content of components when tested in bending

ДППК является наличие песка в его составе, в первую очередь проведено исследование системы полимер–песок, в которой песок придает материалу прочность, дешевизну, но в то же время хрупкость и склонность к фрагментации, а полимер – связность и гибкость. При попытке составить образец из

чистого песка – он закономерно рассыпается в модели на отдельные элементы – песчинки (рис. 1, а). При добавлении полимера в малых количествах, вплоть до концентрации полимера 40 %, образец рассыпается под воздействием пуансонов (рис. 1, б). При дальнейшем увеличении концентрации $c_{\text{ПЛ}}$ полимера об-

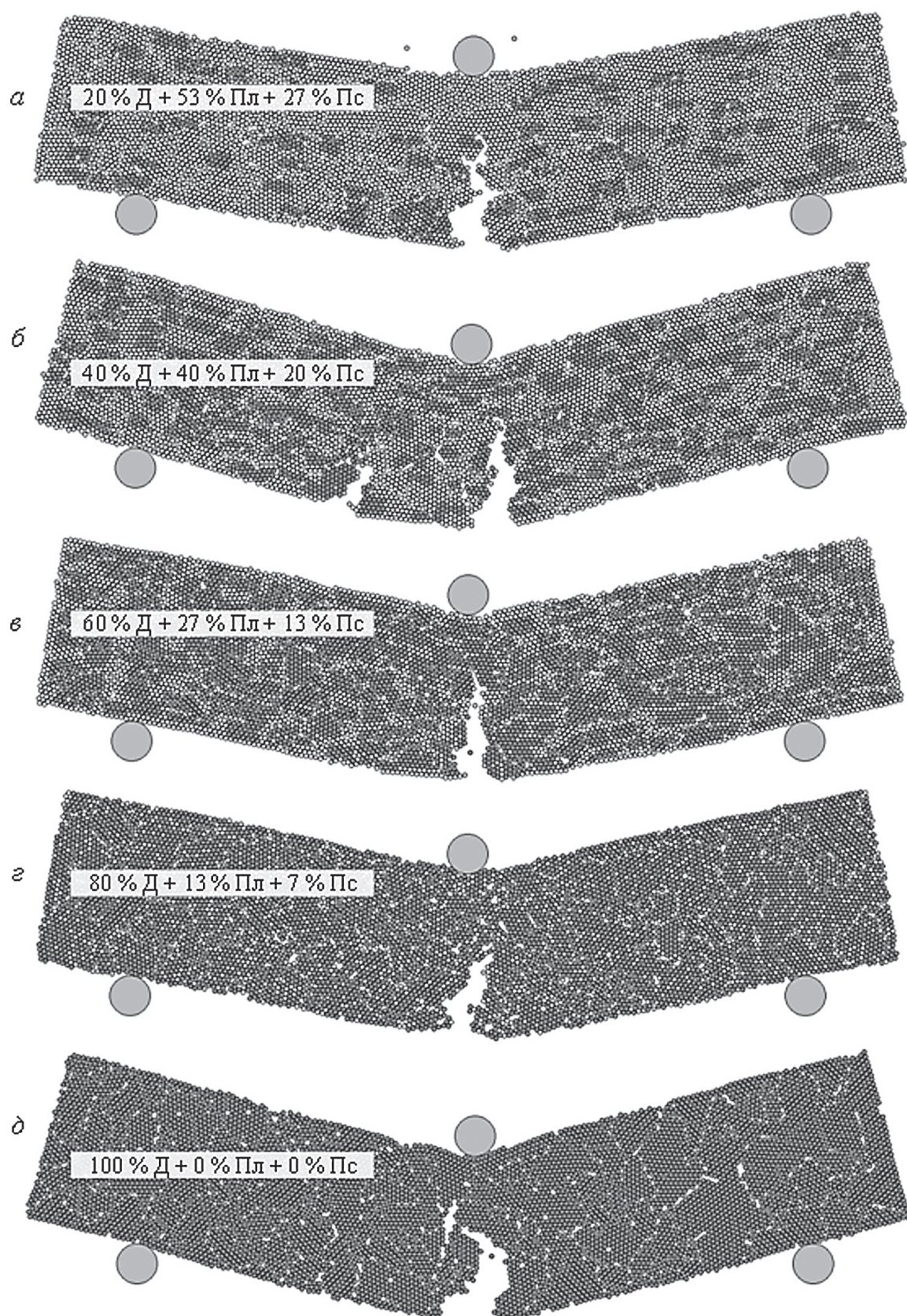


Рис. 2. Разрушение модельных образцов ДППК с различным содержанием древесины и постоянным отношением 2 : 1 концентраций полимера и песка

Fig. 2. The destruction of the model samples of DPPK with the different content of wood and the constant ratio of 2 : 1 concentrations of polymer and sand

разец становится все менее хрупким (рис. 1, в, з). Как видно из графика $\sigma_n(c_{Пл})$ (рис. 4, а), при концентрациях от 30 до 40 % полимера происходит резкий рост предела прочности, далее σ_n увеличивается практически линейно. Предельная деформация ε_n , начиная с $c_{Пл} = 40$ %, остается практически постоянной (рис. 4, б). Поэтому соотношение концентраций полимера и песка в ДППК должно быть 40 : 60 или концентрация полимера должна еще больше превышать концентрацию песка.

Для изучения влияния концентрации древесины c_d в ДППК проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли c_d от 0 до 100 % с шагом 10 % при постоянном соотношении концентраций полимера и песка $c_{Пл} : c_{Пс} = 2 : 1$ (рис. 2). Обнаружено, что наилучшими механическими свойствами материал обладает при концентрации древесины около 50 % (концентрация полимера и песка при этом $c_{Пл} = 33$ %, $c_{Пс} = 17$ %). С увеличением концентрации древесины от 0 до 50 % увеличиваются σ_n и ε_n , то есть увеличивается прочность и уменьшается хрупкость материала за счет армирования композита древесными фрагментами и уменьшения концентрации песка, вызывающего хрупкость (рис. 5). Однако дальнейшее увеличение концентрации древесины (от 50 до 100 %) нецелесообразно, так как уменьшается содержание полимера и его становится недостаточно, чтобы надежно окружить древесные фрагменты и обеспечить прочную связь между ними. При этом материал также становится хрупким и при-

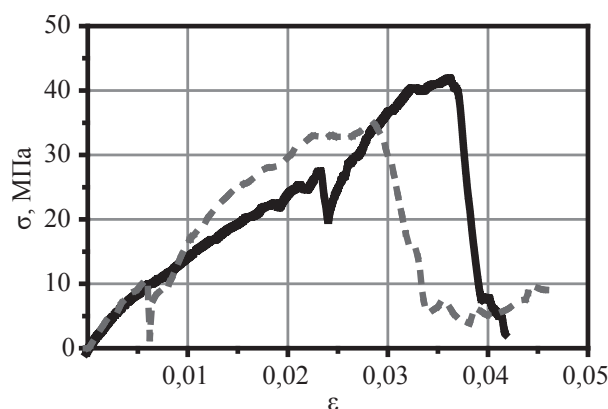


Рис. 3. Диаграмма деформация–напряжение при испытании на изгиб ППК состава 67 % ПЛ + 33 % Пс (штриховая линия) и ДППК состава 50 % Д + 33 % ПЛ + 17 % Пс (сплошная линия)

Fig. 3. Strain-stress chart during the bending test of ACC composition of 67 % ПЛ + 33 % Пс (dashed line) and WPSC composition 50 % Д + 33 % ПЛ + 17 % Пс (solid line)

ближается 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 % Д + 33 % ПЛ + 17 % Пс.

Необходимо отметить, что данная модификация модели адекватна при концентрациях древесины до 80–90 %, 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 кон-

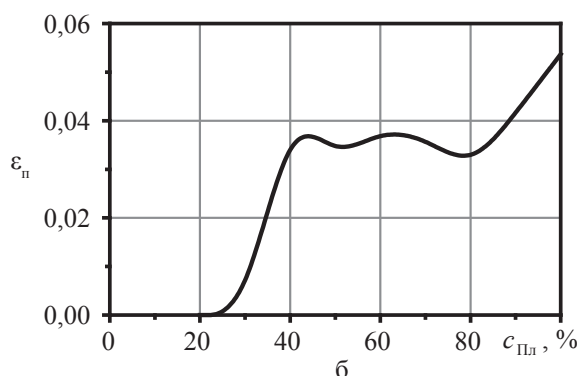
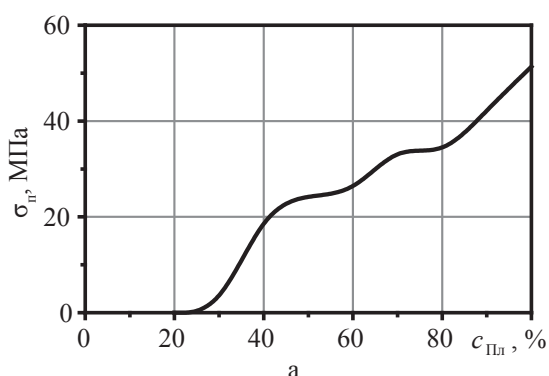


Рис. 4. Зависимость предела прочности σ_n и предельной относительной деформации ε_n при испытании полимер-песчаного композита на изгиб от концентрации полимера $c_{Пл}$

Fig. 4. The dependence of tensile strength σ and maximum relative deformation ε when testing a polymer-sand composite in bending on the concentration of the polymer $c_{Пл}$

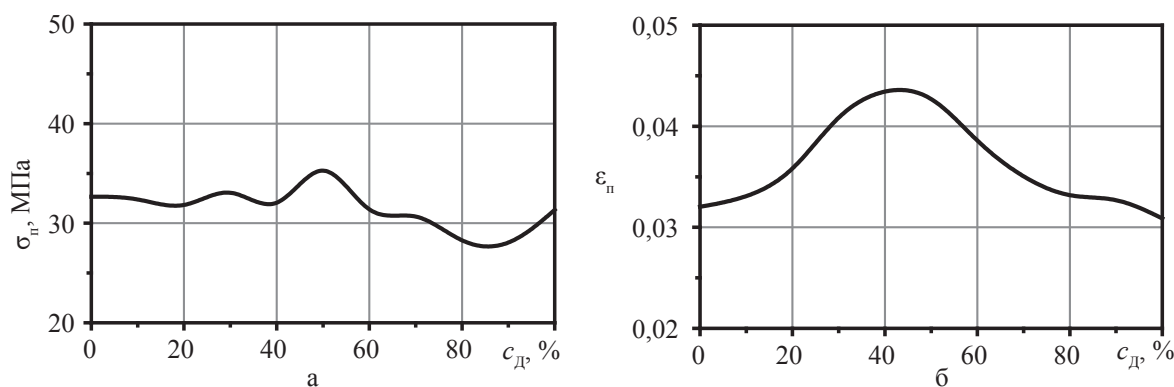


Рис. 5. Зависимость предела прочности σ_t и предельной относительной деформации ε_t при испытании на изгиб ДППК от концентрации древесины c_d (при $c_{пл} : c_{пс} = 2 : 1$)

Fig. 5. The dependence of tensile strength σ and maximum relative deformation ε when the bending test WPSC on the concentration of wood c_d ($c_{пл} : c_{пс} = 2 : 1$)

центрации древесины более 80–90 % необходима была бы доработка модели, однако при высоких концентрациях древесины материал заведомо обладает непривлекательными механическими свойствами и уже не относится к классу ДППК.

Задавшись средним значением концентрации древесины $c_d = 40\%$, провели серию компьютерных экспериментов, в которых изменяли соотношение полимера и песка в материале. Концентрацию полимера изменяли от 30 до 60 %, при этом концентрация песка соответственно изменялась от 30 до 0 %. Обнаружено, что при концентрации полимера около 35 % достигается высокая прочность материала (более 35 МПа), что, по-видимому, связано с высокой концентрацией песка ($c_{пс} = 25\%$). Кроме того, высокие механические свойства достигаются при увеличении концентрации полимера вплоть до 60 % и полном исключении песка (σ_t до 46 МПа, ε_t до 0,04). Однако такие концентрации полимера значительно удорожают материал и противоречат самому принципу удешевления композита за счет добавления песка. Поэтому данная серия компьютерных экспериментов позволяет рекомендовать в качестве оптимального состав 40 % Д + 35 % Пл + 25 % Пс.

Таким образом, на основе математической модели структуры древесного полимер-песчаного композита изучено влияние состава на прочностные свойства. Оптимальным составом древесного полимер-песчаного

композита, при котором достигаются приемлемые предел прочности и предельная деформация, является состав 40–50 об. % древесины, 33–35 об. % полимера, 17–25 об. % песка.

Библиографический список

1. Мышкис, А.Д. Элементы теории математических моделей / А.Д. Мышкис. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
2. Кривцов, А.М. Деформирование и разрушение тел с микроструктурой / А.М. Кривцов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.
3. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике Ч. 2. / Х. Гулд, Я. Тобочник. – М.: Мир, 1990. – 400 с.
4. Хеерман, Д.В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике / Д.В. Хеерман. – М.: Наука, 1990. – 176 с.
5. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
6. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
7. Стородубцева, Т.Н. Особенности математического моделирования древесного полимер-песчаного композита / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4. – № 4 (16). – С. 131–139.
8. Стородубцева, Т.Н. Принципы обеспечения совместности древесного заполнителя и полимера в композите / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 12. – Ч. 1. – С. 41–46.
9. Стородубцева, Т.Н. Результаты исследования прочностных характеристик древесных композиционных материалов / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный. – Воронеж: ВГЛТА, 2014. – 33 с. – Деп. в ВИНТИ 22.10.2014, № 286-В2014.
10. Стородубцева, Т.Н. Исследование влияния свойств древесного заполнителя на трещиностойкость композиционного материала / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4. – № 3 (15). – С. 213–220.

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF WOOD POLYMER-SAND COMPOSITE ON ITS MECHANICAL PROPERTIES

Storodubtseva T.N., Prof. VSFEU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Axomitny A.A., pg. VSFEU ⁽¹⁾

tamara-tns@yandex.ru

Voronezh State University of Forestry and Technologies, 394087, Russia, Voronezh, Timiryazeva str, 8

In the first stage of development the domestic lumber industry raised not the issue of the use of sawmill wastes but of their destruction, as these wastes cluttered up the area around the sawmill and increased the fire hazard. Unfortunately, the situation with waste management at the present time is the same. A huge number of small and medium wood processing industries, which have been created and abolished in the Russian territory in the last twenty years, are surrounded by unused wood waste, the volume of which is constantly increasing. One of the possible ways of solving this problem is the creation of new wood-based composites. At the present time almost no scientific development is complete without the use of modern methods of mathematical modeling. This allows to reduce the cost of research and to get the desired result. This article describes the technique of wood resin-sand composite modelling. To solve a system of differential and algebraic equations a software Program for modeling the structure and mechanical properties of wood polymer-sand composite has been developed. The program, developed in the environment of Borland Delphi 7.0 by Object Pascal programming language is used to model the mechanical behavior of wood resin-sand composite of a given composition. At the moment the program implements the test of a wood composite sample in bending, continuously displaying a computer image of the sample and the bending punches, as well as the diagram of stress-strain. Based on a mathematical model of the structure and mechanical behaviour of wood resin-sand composite the influence of the composition on strength characteristics has been studied. It is established that up to a 80 % concentration of wood (with the concentration of 13 % resin and 7 % sand) material retains high strength and ductility. At low concentration of wood (40 %) concentration of polymer should be high (40 %) to ensure the connectivity of the material.

Keywords: mathematical modeling, wood, structure, composition, mechanical properties

References

1. Myshkis A.D. *Elementy teorii matematicheskikh modeley* [Elements of the theory of mathematical models]. Moscow: KomKniga, 2007, 192 p.
2. Krivcov A.M. *Deformirovanie i razrushenie tel s mikrostrukturoy* [Deformation and fracture of bodies microstructure]. Moscow: FIZMATLIT, 2007, 304 p.
3. Guld X. Tobochnik Ya. *Kompyuternoe modelirovanie v fizike Ch. 2* [Computer modeling in physics]. Moscow: Mir, 1990, 400 p.
4. Xeerman D.V. *Metody kompyuternogo eksperimenta v teoreticheskoy fizike* [Methods of computer experiment in theoretical physics]. Moscow: Nauka, 1990, 176 p.
5. Rumshiskij L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results]. Moscow: Nauka, 1971, 192 p.
6. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 479 p.
7. Storodubtseva T.N. Aksomitnyy A.A. *Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya drevesnogo polimer-peschanogo kompozita* [Features of mathematical modeling of wood – polymer composite sand] *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Journal of Forestry]. 2014, no. 4 (16), pp. 131-139.
8. Storodubtseva T. N. Aksomitnyy A. A. *Principy obespecheniya sovmestimosti drevesnogo zapolnitelya i polimera v kompozite* [The principles of compatibility of wood filler and polymer in the composite] *International Journal of Applied and Basic Research*. 2014. no. 12, ch. 1, pp. 41-46.
9. Storodubtseva T. N. Aksomitnyy A.A. *Rezultaty issledovaniya prochnostnykh kharakteristik drevesnykh kompozitsionnykh materialov* [Results of the study of strength characteristics of wood composite materials]. Dep. VINITI 22.10.2014, № 286-V2014]. Voronezh, 2014, 33 p.
10. Storodubtseva T. N. Aksomitnyy A. A. *Issledovanie vliyaniya svoystv drevesnogo zapolnitelya na treshhinostoykost kompozitsionnogo materiala* [Study of the influence of the properties of wood filler on the fracture toughness of the composite material] *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Journal of Forestry]. 2014, no. 3 (15), pp. 213-220.