

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5563

УДК 674.8

Статья

Геометрические аспекты моделирования прочности древесностружечной плиты при растяжении перпендикулярно пласти

Васильев Сергей Борисович

доктор технических наук, профессор, Институт лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), servas@petrstu.ru

Панов Николай Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент, Институт лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), supernikola@yandex.ru

Доспехова Наталья Анатольевна

кандидат технических наук, доцент, Институт лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), dospseh@petrstu.ru

Колесников Геннадий Николаевич

доктор технических наук, профессор, Институт лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), kollesnikovgn@ya.ru

Получена: 21 декабря 2020 / Принята: 12 апреля 2021 / Опубликовано: 20 апреля 2021

Аннотация: Древесностружечные плиты получают способами горячего прессования смеси древесных частиц со связующим. Полимеризация связующего при горячем прессовании обеспечивает прочность клеевых соединений древесных частиц друг с другом. Размер и форма древесных частиц являются основными факторами, влияющими на прочность плит. Ранее проведённые экспериментальные исследования показали, что увеличение доли мелких древесных частиц ведёт к повышению прочности плиты. В работе приводятся результаты теоретического исследования, влияния формы и размеров древесных частиц на прочность плит при растяжении перпендикулярно пласти. При разработке математической модели принято во внимание, что силовое взаимодействие частиц друг с другом осуществляется в отдельных локальных областях на поверхности частиц. Поэтому в качестве количественной характеристики прочности принято количество адгезионных контактов частиц друг с другом. Разработанная математическая

модель позволила получить оценку влияния размеров и формы частицы на удельное количество адгезионных контактов, приходящихся на единицу площади поверхности разрушения. Кроме того, получена оценка количества адгезионных контактов для смеси древесных частиц неодинаковых размеров и формы. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования прочности плит в зависимости от соотношения размеров и формы древесных частиц, использовавшихся для их изготовления. Это позволяет обосновать использование низкокачественной древесины в качестве сырья для изготовления древесностружечных плит. Адекватность результатов исследования подтверждена их согласованностью с экспериментальными данными авторов, а также с известными по литературе результатами.

Ключевые слова: плита древесностружечная; прочность; древесные частицы; моделирование взаимодействия

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5563

Article

Geometric aspects of simulation of chipboard tensile strength perpendicular to the formation

Sergey Vasiliev

D. Sc. in engineering, professor, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University (Russian Federation), servas@petrstu.ru

Nikolai Panov

Ph. D. in engineering, associate professor, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University (Russian Federation), supernikola@yandex.ru

Natalia Dospekhova

Ph. D. in engineering, associate professor, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University (Russian Federation), dospeh@petrstu.ru

Gennady Kolesnikov

D. Sc. in engineering, professor, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University (Russian Federation), kolesnikovgn@ya.ru

Received: 21 December 2020 / Accepted: 12 April 2021 / Published: 20 April 2021

Abstract: Chipboards are manufactured by hot pressing a mixture of crushed wooden particles with a polymer binder. Polymerization of the binder during hot pressing ensures the strength of the adhesive joints of wooden particles with each other. The size and shape of wooden particles are the main factors affecting the strength of boards. Previous experimental studies have shown that an increase in the proportion of small wooden particles leads to an increase in the strength of the board. The paper presents the result of a theoretical study of the influence of wooden particles shape and size on the tensile strength of a chipboard perpendicular to its face. When developing the mathematical simulation, it is taken into account that the force interaction of particles with each other is carried out in separate local regions on the surface of the particles. (The developed mathematical simulation takes into account the force interaction of particles with each other that occurs in separate local regions on the surface of the particles.) Therefore, the number of adhesive contacts of particles with each other is taken as a quantitative characteristic of strength. The developed mathematical simulation (This simulation) allowed the authors to estimate the effect of particle size and shape on the specific number of adhesive contacts per unit area of the break surface. In addition, an estimate of

the number of adhesive contacts for a mixture of wooden particles of different sizes and shapes was obtained. The obtained results may be used to predict the strength of boards depending on the ratio of the size and shape of wood particles used for their manufacture. This allows us to justify the use of low-quality wood as a raw material for chipboards manufacture. The research results are in good agreement with the authors' experimental results as well as with the results known in the literature.

Keywords: chipboard; tensile strength; wooden particles; interaction simulation

1. Введение

Древесностружечные плиты получают способами горячего прессования смеси частиц измельчённой древесины и полимерного связующего. Полимеризация связующего при горячем прессовании обеспечивает прочность клеевых соединений древесных частиц друг с другом. При такой технологии изготовления размер и форма древесных частиц относятся к основным факторам, которые существенно влияют на прочность плит. Однако исследования этих эффектов ограничены. Предыдущие экспериментальные исследования показали, что увеличение доли мелких частиц ведёт к повышению прочности плиты. Однако вопросы математического моделирования, относящиеся к данной области прикладных исследований, остаются актуальными. Актуальность проблемы объясняется тем, что древесностружечные плиты применяются в строительстве, мебельном производстве, а также для изготовления тары и упаковки. Выпуск и потребление древесностружечных плит с течением времени возрастает. Появляются новые виды древесностружечных плит [1], [2]. Современные технологии древесностружечных плит [3], [4], [5] позволяют рационально использовать большие объёмы низкокачественной древесины (фото 1), а также отходы переработки тростника [6], бамбука [7] и других видов сырья растительного происхождения [8], что вносит вклад в повышение экологической безопасности и устойчивости социально-экономического развития [2], [6].



Фото 1. Низкокачественная древесина для производства древесностружечных плит

Photo 1. Low-quality wood for particle board manufacturing

К недостаткам древесностружечных плит относится потенциальное выделение формальдегида. Однако современные технологии позволяют существенно уменьшить влияние данного фактора [9], [10], [11]. Целями новых технологий является не только уменьшение эмиссии формальдегида, но и обеспечение достаточной прочности древесностружечных плит при различных механических воздействиях. Как следствие, появляется проблема сравнительной оценки прочности древесностружечных плит, полученных по известным и новым технологиям. Вклад в решение данной проблемы может внести изучение влияния размеров и формы древесных частиц на прочность плит.

С учётом сложности проблемы в статье рассматриваются только вопросы, относящиеся к влиянию формы и размеров древесных частиц на прочность плит при растяжении перпендикулярно пласти [12]. В исследовании использованы экспериментальные методы и методы математического моделирования механических систем рассматриваемого класса. Принято во внимание, что силовое взаимодействие частиц друг с другом осуществляется в отдельных локальных областях на поверхности частиц. Поэтому в качестве количественной характеристики прочности плиты определено число адгезионных контактов частиц.

Цель данной работы: разработка методики сравнительной оценки прочности древесностружечных плит при растяжении перпендикулярно пласти плиты.

2. Материалы и методы

Для достижения сформулированной цели были использованы методы экспериментальных и теоретических исследований.

Экспериментальные исследования выполнены в лаборатории контроля качества на промышленном предприятии по производству плит. Образцы имели форму квадрата в плане со стороной 50 мм. Толщина образцов 16 мм. На фото 2 показан эпизод подготовки образцов к испытаниям. На фото 3 показан эпизод испытаний образцов плиты на растяжение перпендикулярно плану плиты. Образец приклеен к верхней и нижней вспомогательным плитам (использовался поливинилацетатный клей) (фото 2).



Фото 2. Стадия подготовки образцов

Photo 2. Stage of sample preparation

Нагрузка от испытательной машины передаётся на нижнюю вспомогательную плиту и вызывает растяжение образца, расположенного в средней части пакета из трёх плит (нижняя вспомогательная плита; образец; верхняя вспомогательная плита) (фото 3). Такая методика подготовки образцов использована для того, чтобы уменьшить стоимость подготовки и испытания образцов на растяжение перпендикулярно плану плиты.

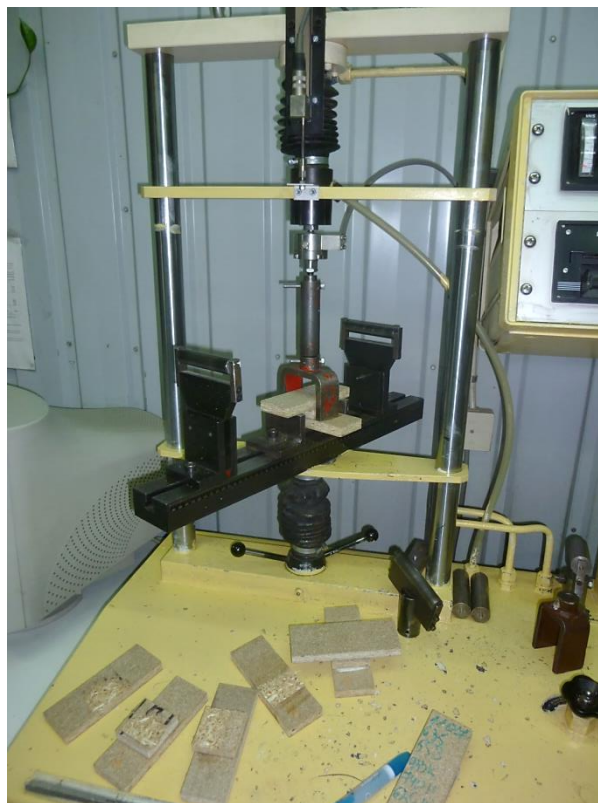


Фото 3. Стадия испытаний образца

Photo 3. Stage of sample testing

Принимая во внимание важность экологических аспектов [10], [11], отметим, что эмиссия формальдегида, содержащегося в исследуемых плитах, не более 7 мг на 100 г плиты, что соответствует классу экологической безопасности E1 (допускается эмиссия не более 10 мг на 100 г плиты) (Источник данных: <https://www.kareliadsp.com/>, дата обращения: 15 октября 2020 г.). Экологические аспекты технологии древесностружечных плит достаточно подробно рассмотрены в статьях [13], [14], [15].

В соответствии с целью работы определим количественные критерии формы и размера частиц в древесностружечной плите, принимая во внимание результаты работ [16], [17], [18], [19]. Приемлемым вариантом приближенного моделирования частиц древесной щепы, предназначенной для изготовления древесностружечных плит, может быть параллелепипед с рёбрами a , b , c ; в рассматриваемой модели $a \geq b \geq c$. Адекватность моделирования частиц параллелепипедами подтверждается результатами ситового анализа (фото 4). С учётом данного обстоятельства предложена модель области разрушения плиты (фото 5).



Фото 4. К анализу размеров и формы частиц

Photo 4. To the analysis of particle size and shape



Фото 5. Поверхность разрушения образца после испытаний (слева) и фрагмент модели поверхности (справа). Частицы в плане моделируются прямоугольниками с размерами $a \times b$ (углы скруглены)

Photo 5. The break surface of the sample after test (left) and a fragment of the surface model (right). Particles are modeled as rectangles (corners are rounded)

Хорошо известные особенности технологии изготовления древесностружечных плит [1], [3], [19] и физико-механические свойства древесины [20] определяют такое положение

древесных частиц, в котором рёбра a и b указанного выше параллелепипеда почти параллельны плоскости плиты; соответственно, ось c почти перпендикулярна той же плоскости. По этой причине при растяжении перпендикулярно пласти разрыв образца плиты может произойти, скорее всего, по двум причинам: разрушение клеёвого соединения при растяжении вдоль ребра c ; разрушение древесной частицы при её растяжении поперёк волокон (т. е. вдоль того же ребра c). В рассматриваемой модели поверхность разрушения (фото 5 и 6) приближенно рассматривается как срединная плоскость плиты, т. к. разрушение локализуется в окрестности точек, находящихся в середине толщины плиты.



Фото 6. Образец толщиной 16 мм после испытаний

Photo 6. Sample 16 mm thick after testing

Локализация разрушения в среднем слое разрушения древесностружечной плиты объясняется особенностями технологии их изготовления: при горячем прессовании верхняя и нижняя поверхности плит быстрее прогреваются; температура среднего слоя может быть несколько ниже температуры верхнего и нижнего слоя; доля мелких древесных частиц в верхнем и нижнем слоях больше, чем в среднем слое. Как следствие, прочность среднего слоя древесностружечной плиты может оказаться меньше прочности верхнего и нижнего слоёв.

С учётом изложенных выше методологических аспектов, в качестве критерия размера древесных частиц выбран их наибольший характерный размер a (фото 5), который определялся по результатам ситового анализа (фото 4).

В качестве безразмерного критерия формы древесных частиц выбрано соотношение размеров a и b параллелепипеда, моделирующего форму частицы (фото 5). Более детально данный вопрос обсуждается в отдельном разделе данной статьи.

В завершение данного раздела отметим, что образец (фото 5 и 6) рассматривался как механическая система частиц, механически взаимодействующих друг с другом на части их поверхности. Механическое взаимодействие обеспечивается клеёвым соединением, выполненным в соответствии с известными технологиями [1], [3], [11]. Анализ поверхности разрушения образцов после испытаний (фото 4 и 6) показал, что при растяжении перпендикулярно плану плиты клеёвое соединение сопротивляется преимущественно отрыву одной древесной частицы от другой, т. е. полимеризованный клей сопротивляется растяжению.

Как известно, наиболее слабым звеном механических систем с клеявыми соединениями являются соединения, сопротивляющиеся отрыву одного элемента от другого, т. е. когда появляются силы, направленные по нормали к поверхности локального контакта частиц в виде указанных выше эллипсоидов. Древесные частицы сопротивляются преимущественно растяжению поперёк волокон, что отмечено выше. Дополнительно заметим, что при изгибе плиты те же клеявые соединения в области растяжения сопротивляются преимущественно сдвигу одних частиц относительно других. При этом древесные частицы сопротивляются преимущественно деформации вдоль волокон. Однако в данной работе рассматривается только растяжение перпендикулярно пласти плиты.

3. Разработка модели

Пренебрегая неровностями на поверхности разрушения образца (фото 5 и 6), моделируем данную поверхность как плоскость. Обозначим A — площадь горизонтальной проекции образца (фото 5).

Как отмечено выше, в качестве модели древесной частицы выбран параллелепипед с рёбрами a , b и c (фото 5). Длина a наибольшего ребра выбрана в качестве характерного размера древесной частицы. Площадь проекции частицы на плоскость разрушения равна $\bar{A} = a \cdot b$. В рассматриваемой модели разрушения плиты длина ребра c не влияет на прочность при растяжении перпендикулярно пласти плиты. Поэтому в качестве критерия формы древесных частиц определён коэффициент формы $\varphi = b/a$, $0 < \varphi \leq 1$. Тогда $b = \varphi a$, $\bar{A} = \varphi a^2$.

Анализ области разрушения образцов (фото 5 и 6) чётко показывает, что каждая частица контактирует с несколькими другими частицами. Обозначим $n_{contact}$ — число контактов одной частицы. Очевидно, с увеличением характерного размера частицы число контактов возрастает. Пусть $n_{contact} = \beta a$, где β — коэффициент пропорциональности, постоянная величина. Коэффициент β равен числу контактов, приходящихся на единицу длины частицы.

Перейдём к анализу общего числа контактов в плоскости разрушения (фото 5).

Предположим, что прямоугольники со сторонами a и b без пересечения занимают всю площадь упомянутой выше горизонтальной проекции образца A (фото 5). Тогда число частиц на горизонтальной проекции образца приближённо равно $N_{particle}$:

$$N_{particle} = \frac{A}{ab} = \frac{A}{\varphi a^2}. \quad (1)$$

Используя (1), определим общее число контактов всех частиц в плоскости разрушения:

$$N_{contact} = n_{contact} N_{particle} = \beta a \frac{A}{\varphi a^2} = \beta \frac{A}{\varphi a}. \quad (2)$$

Естественным является вопрос: в чём заключается практическое значение соотношения (2)? Можно ли использовать формулу (2) для обоснования гранулометрического состава сырьевой смеси (т. е. смеси частиц), используемой для изготовления древесностружечных плит? Чтобы

обосновать ответы, рассмотрим сравнительную оценку прочности двух плит (с условными номерами 1 и 2), которые различаются гранулометрическим составом сырьевых смесей. Используя выражение (2), запишем:

$$N_{contact}^{(1)} = \beta \frac{A}{\varphi^{(1)}a^{(1)}}, N_{contact}^{(2)} = \beta \frac{A}{\varphi^{(2)}a^{(2)}} \quad (3)$$

Выражения (3) подставим в соотношение $N_{contact}^{(2)}/N_{contact}^{(1)}$ и определим $N_{contact}^{(2)}$:

$$N_{contact}^{(2)} = N_{contact}^{(1)} \frac{\varphi^{(1)}a^{(1)}}{\varphi^{(2)}a^{(2)}} \quad (4)$$

Прочность плиты при растяжении перпендикулярно плану зависит от ряда факторов, к которым относятся: размеры и форма частиц, гранулометрический состав частиц [6], [16], [17], вид клея [6], [10], материал частиц [7], [8], температура и продолжительность прессования, степень уплотнения [1], [2], [5] и другие факторы [18], [19], [20]. В нашей работе мы фокусируем внимание только на влиянии двух факторов, к которым отнесены размеры и форма частиц. Соответственно, все другие факторы предполагаются идентичными при сравнении вариантов плит. С учётом данного обстоятельства приходим к выводу, что прочность образца плиты с числом контактов $N_{contact}^{(2)}$, полученной по новой технологии, будет больше прочности плиты, полученной по старой технологии, если $N_{contact}^{(2)} > N_{contact}^{(1)}$. Данное неравенство, с учётом соотношения (4), эквивалентно неравенству (5):

$$\frac{\varphi^{(1)}a^{(1)}}{\varphi^{(2)}a^{(2)}} > 1. \quad (5)$$

Если принять во внимание, что указанный выше коэффициент формы частицы равен $\varphi = b/a$, то соотношения (4) и (5) можно переписать в виде (6) и (7) соответственно:

$$N_{contact}^{(2)} = N_{contact}^{(1)} \frac{b^{(1)}}{b^{(2)}} \quad (6)$$

$$\frac{b^{(1)}}{b^{(2)}} > 1 \quad (7)$$

В соотношениях (6) и (7) влияние формы частицы в явном виде не учитывается. Тем не менее соотношения (6) и (7) эквивалентны соотношениям (4) и (5) соответственно, т. к. $b = \varphi a$. Однако для практики предпочтительны соотношения (4) и (5), поскольку позволяют получить относительные количественные оценки прочности плит с учётом влияния не одного, а двух факторов: характерного размера и формы частиц.

4. Результаты и обсуждение

При изготовлении древесностружечных плит используется смесь частиц различной формы и размеров (фото 4 и 5). Частицы различаются коэффициентом формы φ и характерным размером a . Соответственно, прочность плиты определяется с учётом всех контактов частиц

различных фракций. Пусть n_1 и n_2 — число фракций частиц в плитах 1 и 2 соответственно, C_i — доля частиц фракции i (по массе). Тогда, используя соотношения (3), можно записать:

$$N_{contact}^{(1)} = \frac{\beta A}{4} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{C_i^{(1)}}{\varphi_i^{(1)} a_i^{(1)}}; \quad N_{contact}^{(2)} = \frac{\beta A}{4} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{C_i^{new}}{\varphi_i^{new} a_i^{new}} \quad (8)$$

Принимая во внимание соотношения (8), по аналогии с (4), получим:

$$N_{contact}^{(2)} = N_{contact}^{(1)} \left(\sum_{i=1}^{n_2} \frac{C_i^{(2)}}{\varphi_i^{(2)} a_i^{(2)}} \right) \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{C_i^{(1)}}{\varphi_i^{(1)} a_i^{(1)}} \right)^{-1} \quad (9)$$

Формула (9) может быть использована для корректировки гранулометрического состава новой смеси частиц по критерию прочности при растяжении перпендикулярно плану плиты. Числа n_2 и n_1 , а также величины $C_i^{(2)}$, $C_i^{(1)}$, $a_i^{(2)}$, $a_i^{(1)}$, $\varphi_i^{(2)}$ и $\varphi_i^{(1)}$ определяются путём обработки результатов ситового анализа (фото 5).

Таким образом, на основе соотношения (2) получены формулы (4), (5) и (9), которые можно использовать для обоснования новых решений, ориентированных на совершенствование технологии древесностружечных плит.

Из выражений (4) и (5) следует, что для увеличения прочности на растяжение перпендикулярно плану плиты необходимо уменьшать указанный выше коэффициент формы частиц $\varphi = b/a$ (фото 7). Это означает, что увеличение длины частиц и уменьшение их поперечных размеров ведёт к увеличению прочности рассматриваемых плит. Такие частицы могут быть, например, волокнами наноцеллюлозы [21], [22]. Достоверность предсказанного формулой (4) повышения прочности за счёт применения волокон косвенно подтверждается экспериментами авторов работы [21]. В работе [21] экспериментально обосновано, что механические характеристики древесностружечных плит могут быть значительно улучшены, если используется клей с добавкой наноцеллюлозы в количестве 1 % от массы клея.

Таким образом, в представленной работе теоретически обосновано и известными по литературе экспериментами подтверждена адекватность количественных оценок выражений (4), (5) и (9) прогнозируемой относительной прочности древесностружечных плит при растяжении перпендикулярно плану плиты.

Из соотношений (4) и (5) следует, что характерный размер a также должен рассматриваться как фактор, существенно влияющий на прочность древесностружечных плит. С уменьшением характерного размера a возрастает количество частиц, которыми может быть заполнена поверхность возможного разрушения плиты. Мелкие частицы заполняют зазоры между более крупными частицами. В итоге увеличивается число контактов частиц. Кроме того, большое количество мелких частиц в клеевом составе после его полимеризации создаёт препятствия развитию микротрещин, даже если эти частицы не контактируют с другими частицами. Как следствие, возрастает прочность древесностружечной плиты, что экспериментально подтверждено в работах [23], [24].

Этот важный в практическом отношении вывод подтверждается также экспериментальными исследованиями в рамках данной работы (фото 2—6). На фото 6 показан образец плиты, в которой средний слой выполнен из относительно крупных частиц по сравнению с верхним и нижним слоями. Закономерно, что при растяжении перпендикулярно пласти плиты образец разрушился в области, в которой относительно невелико число мелких частиц. Такой характер разрушения прогнозируется формулами (4), (5) и (9). Методику получения количественной оценки прочности с использованием представленной геометрической модели и формулы (9) рассмотрим на примере.

Пример. Гранулометрический состав измельчённой древесины определён ситовым анализом. Диаметры отверстий в ситах равны 5,00; 3,15; 2,00; 1,00; 0,50; 0,20 мм. Средний размер частиц (ширина a по фото 5) в поддоне принят равным 0,125 мм. Для наружных слоёв плиты использована смесь частиц, гранулометрический состав которой определён массовыми долями частиц (в процентах), оставшихся на указанных выше ситах, соответственно: 0,0; 0,0; 1,2; 12,4; 45,0; 32,1; 9,3. Число обозначенных выше клеевых контактов, приходящихся на единицу площади наружного слоя, обозначим $N_{contact}^{(1)}$. Аналогично, для среднего слоя число клеевых контактов обозначим $N_{contact}^{(2)}$. Для среднего слоя плиты использована смесь частиц, гранулометрический состав которой определён в процентах массовыми долями частиц, оставшихся на указанных выше ситах, соответственно: 24,1; 16,2; 30,8; 21,5; 5,1; 1,7; 0,6. При вычислениях по формуле (9) принято: $n_1 = n_2 = 7$ (число фракций); коэффициент формы $\varphi_i^{(1)} = \varphi_i^{(2)} = \varphi$. Коэффициенты формы для среднего и наружных слоёв одинаковы, т. к. для каждого слоя использовалась щепа, полученная в идентичных условиях (на предприятии Karelia DSP (Россия)). Используя формулу (9), найдём:

$$\frac{N_{contact}^{(2)}}{N_{contact}^{(1)}} = \frac{N_{contact}^{(2)}}{N_{contact}^{(1)}} = \frac{357}{72} \approx 5,0. \text{ Это означает, что прочность среднего слоя плиты примерно}$$

в пять раз меньше прочности наружных слоёв. Соответственно, образец трёхслойной плиты при растяжении перпендикулярно пласти разрушится по материалу среднего слоя (фото 6).

Можно показать, что рассмотренный подход приводит к аналогичным результатам, если в качестве геометрической модели древесной частицы использовать эллипсоид, вписанный в указанный выше параллелепипед с рёбрами a , b и c (фото 5).

5. Выводы

Анализ литературы показал, что появление экологически безопасных клеевых композиций обеспечивает возможность использования низкокачественной древесины как сырья для получения экологически безопасных древесностружечных плит. В известных по литературе исследованиях доминируют вопросы влияния размеров частиц на прочность плит. Вопросы влияния формы частиц исследованы в меньшей степени и по-прежнему представляют большой научный интерес и практический интерес.

В представленной работе обоснованы количественные оценки влияния размеров и формы частиц на прочность древесностружечных плит при растяжении перпендикулярно плану

плиты. Принято во внимание, что силовое взаимодействие частиц друг с другом осуществляется в отдельных локальных областях на поверхности частиц. Поэтому в качестве количественной характеристики прочности плиты определено число адгезионных контактов частиц.

По итогам анализа картины разрушения образцов с применением математического описания получена оценка влияния размеров и формы частицы на число адгезионных контактов с другими частицами. Получена также комплексная оценка числа адгезионных контактов для смеси частиц неодинаковых размеров и формы.

В целях практического использования полученная комплексная оценка предложена для сравнения прочности плит, полученных при различных соотношениях размеров и формы древесных частиц в исходных смесях. Тем самым могут быть обоснованы новые возможности использования низкокачественной древесины в качестве сырья для изготовления древесно-стружечных плит.

Адекватность результатов исследования подтверждена их согласованностью с экспериментальными данными авторов, а также с известными по литературе результатами.

Список литературы

1. *Nitu I. P., Islam M. N., Ashaduzzaman M., Amin M. K., Shams M. I.* Optimization of processing parameters for the manufacturing of jute stick binderless particleboard // *Journal of Wood Science*. 2020. Vol. 66, no. 1. P. 1—9. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01913-z>.
2. *Koç Y.* Parametric Optimization of an ORC in a Wood Chipboard Production Facility to Recover Waste Heat Produced from the Drying and Steam Production Process // *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 19. P. 3656. <https://doi.org/10.3390/en12193656>.
3. *Rudawska A., Stančėková D., Müller M., Vitenko T., Iasnii V.* The Strength of the Adhesive Joints of the Medium-Density Fireboards and Particle Boards with the PVC Film // *Advances in Science and Technology. Research Journal*. 2020. Vol. 14, no. 1. P. 58—68. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/113612>.
4. *Ohijeagbon I O., Adeleke A. A., Mustapha V. T., Olorunmaiye J. A., Okokpujie I. P., Ikubanni P. P.* Development and Characterization of Wood-Polypropylene Plastic-Cement Composite Board // *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 13, no. e00365. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00365>.
5. *André N., Young T. M.* Real-time process modeling of particleboard manufacture using variable selection and regression methods ensemble // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2013. Vol. 71, no. 3. P. 361—370. DOI 10.1007/s00107-013-0689-0.
6. *Ferrandez-Villena M., Ferrandez-Garcia C. E., Garcia-Ortuño T., Ferrandez-Garcia A., Ferrandez-Garcia M. T.* The Influence of Processing and Particle Size on Binderless Particleboards Made from *Arundo donax* L. Rhizome // *Polymers*. 2020. Vol. 12, no. 3. P. 696. <https://doi.org/10.3390/polym12030696>.
7. *Srichan S., Raongjant W.* Characteristics of particleboard manufactured from bamboo shoot sheaths // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2020. Vol. 187. P. 03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018703011>.
8. *Khaled T. S. Hassan, Ibrahim E. A. Kherallah, Ahmed A. A. Settway, Heba M. Abdallah.* Physical and Mechanical Properties of Particleboard Produced from Some Timber Trees Irrigated with

Treated Wastewater // Alexandria Science Exchange Journal. 2020. Vol. 41. P. 77—83. DOI: 10.21608/asejaiqjsae.2020.77058.

9. Leonovich A. A., Kovrizhnykh L. P., Korneev V. I., Bodoyavlenskaya G. A., Medvedeva I. N. Silicon dioxide sol as a component of urea-formaldehyde adhesive // Russian journal of applied chemistry. 2002. Vol. 75, no. 8. P. 1336—1338. <https://doi.org/10.1023/A:1020981532085>.
10. Akinyemi B. A., Olamide O., Oluwasogo D. Formaldehyde free particleboards from wood chip wastes using glutaraldehyde modified cassava starch as binder // Case Studies in Construction Materials. 2019. Vol. 11, no. e00236. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00236>.
11. Alao P., Tobias M., Kallakas H., Poltimäe T., Kers J., Goljandin D. Development of hemp hurd particleboards from formaldehyde-free resins // Agronomy Research. 2020. Vol. 18, no. S1. P. 679—688. <https://doi.org/10.15159/AR.20.127>.
12. EN 319. Particleboards and fibreboards — Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board.
13. Чубинский А. Н., Варанкина Г. С. Формирование низкотоксичных древесностружечных плит с использованием модифицированных клеев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 6. С. 67—72.
14. Леонович А. А., Свиридо Е. А., Захаров С. С. Использование гидроксиэтилидендифосфоновой кислоты для снижения горючести древесностружечных плит // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 3 (43). С. 111—115. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41284604>.
15. Иванов Д. В., Леонович А. А., Мазур А. С. О механизмах действия и способах оценки эффективности акцепторов формальдегида в древесных плитах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 222. С. 263—275.
16. Altuhafi F., O'sullivan C., Cavarretta I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2013. T. 139, no. 8. С. 1290—1307. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000855](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000855).
17. Yang J., Luo X. D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2015. T. 84. С. 196—213. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.08.001>.
18. Cosereanu C. N., Brenci L. M. N., Zeleniuc O. I., Fotin A. N. Effect of particle size and geometry on the performance of single-layer and three-layer particleboard made from sunflower seed husks // BioResources. 2015. Vol. 10, no. 1. P. 1127—1136.
19. Svoboda R. Kinetic analysis of particle-size based complex kinetic processes // Journal of Non-Crystalline Solids. 2020. Vol. 533, no. 119903. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119903>.
20. Базаров С. М., Чубинский А. Н., Бачеригов И. В., Базаров Ф. Р., Говядин И. К. Элементы основ механики древесной среды // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 231. С. 141—150.
21. Veigel S., Rathke J., Weigl M., Gindl-Altmutter W. Particle board and oriented strand board prepared with nanocellulose-reinforced adhesive // Journal of Nanomaterials. 2012. Vol. 2012, no. 158503. <https://doi.org/10.1155/2012/158503>.
22. Trache D., Tarchoun A. F., Derradji M., Hamidon T. S., Masruchin N., Brosse N., Hussin M. H. Nanocellulose: from fundamentals to advanced applications // Frontiers in Chemistry. 2020. Vol. 8, no. 392. DOI: 10.3389/fchem.2020.00392.
23. Panov N. G., Pitukhin A. V., Vasilyev S. B. Properties of Particleboards Manufactured from Low-Grade Wood by Using a Shungite Modified Binder // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. P. 453—458. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.945.453>.
24. Panov N. G., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Influence of shungite modifier on technological properties of polymeric glue based on urea-formaldehyde resin // Materials Science Forum. 2020. Vol. 992. P. 434—438. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.434>.

References

1. Nitu I. P., Islam M. N., Ashaduzzaman M., Amin M. K., Shams M. I. Optimization of processing parameters for the manufacturing of jute stick binderless particleboard. *Journal of Wood Science*, 2020, vol. 66, no. 1, pp. 1—9. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01913-z>.
2. Koç Y. Parametric Optimization of an ORC in a Wood Chipboard Production Facility to Recover Waste Heat Produced from the Drying and Steam Production Process. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 19, pp. 3656. <https://doi.org/10.3390/en12193656>.
3. Rudawska A., Stančėková D., Müller M., Vitenko T., Iasnii V. The Strength of the Adhesive Joints of the Medium-Density Fireboards and Particle Boards with the PVC Film. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 58—68. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/113612>.
4. Ohijeagbon I O., Adeleke A. A., Mustapha V. T., Olorunmaiye J. A., Okokpujie I. P., Ikubanni P. P. Development and Characterization of Wood-Polypropylene Plastic-Cement Composite Board. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, vol. 13, no. e00365. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00365>.
5. André N., Young T. M. Real-time process modeling of particleboard manufacture using variable selection and regression methods ensemble. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2013, vol. 71, no. 3, pp. 361—370. DOI 10.1007/s00107-013-0689-0.
6. Ferrandez-Villena M., Ferrandez-Garcia C. E., Garcia-Ortuño T., Ferrandez-Garcia A., Ferrandez-Garcia M. T. The Influence of Processing and Particle Size on Binderless Particleboards Made from *Arundo donax* L. Rhizome. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 696. <https://doi.org/10.3390/polym12030696>.
7. Srichan S., Raongjant W. Characteristics of particleboard manufactured from bamboo shoot sheaths. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 2020, vol. 187, p. 03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018703011>.
8. Khaled T. S. Hassan, Ibrahim E. A. Kherallah, Ahmed A. A. Settway, Heba M. Abdallah. Physical and Mechanical Properties of Particleboard Produced from Some Timber Trees Irrigated with Treated Wastewater. *Alexandria Science Exchange Journal*, 2020, vol. 41, pp. 77—83. DOI: 10.21608/asejaiqjsae.2020.77058.
9. Leonovich A. A., Kovrizhnykh L. P., Korneev V. I., Bodoyavlenskaya G. A., Medvedeva I. N. Silicon dioxide sol as a component of urea-formaldehyde adhesive. *Russian journal of applied chemistry*, 2002, vol. 75, no. 8, pp. 1336—1338. <https://doi.org/10.1023/A:1020981532085>.
10. Akinyemi B. A., Olamide O., Oluwasogo D. Formaldehyde free particleboards from wood chip wastes using glutaraldehyde modified cassava starch as binder. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, vol. 11, no. e00236. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00236>.
11. Alao P., Tobias M., Kallakas H., Poltimäe T., Kers J., Goljandin D. Development of hemp hurd particleboards from formaldehyde-free resins. *Agronomy Research*, 2020, vol. 18, no. S1, pp. 679—688. <https://doi.org/10.15159/AR.20.127>.
12. EN 319. Particleboards and fibreboards — Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board.
13. Chubinskij A. N., Varankina G. S. Formirovanie nizkotoksichny`x drevesnostruzhechny`x plit s ispol`zovaniem modificirovanny`x kleev. *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2013, no. 6, pp. 67—72. (In Russ.)
14. Leonovich A. A., Svirido E. A., Zacharov S. S. Ispol`zovanie gidroksie`tilidendifosfonovoj kisloty` dlya snizheniya goryuchesti drevesno-struzhechny`x plit. *Sistemy`. Metody`. Texnologii*, 2019, no. 3 (43), pp. 111—115. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41284604>. (In Russ.)

15. Ivanov D. V., Leonovich A. A., Mazur A. S. O mexanizmax dejstviya i sposobax ocenki e`fektivnosti akceptorov formal`degida v drevesny`x plitax. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*, 2018, no. 222, pp. 263—275. (In Russ.)
16. Altuhafi F., O`sullivan C., Cavarretta I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, t. 139, no. 8, pp. 1290—1307. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000855](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000855).
17. Yang J., Luo X. D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2015, t. 84, pp. 196—213. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.08.001>.
18. Cosereanu C. N., Brenci L. M. N., Zeleniuc O. I., Fotin A. N. Effect of particle size and geometry on the performance of single-layer and three-layer particleboard made from sunflower seed husks. *BioResources*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 1127—1136.
19. Svoboda R. Kinetic analysis of particle-size based complex kinetic processes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, vol. 533, no. 119903. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119903>.
20. Bazarov S. M., Chubinskij A. N., Bacherikov I. V., Bazarov F. R., Govyadin I. K. E`lementy` osnov mexaniki drevesnoj sredy`. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*, 2020, no. 231, pp. 141—150. (In Russ.)
21. Veigel S., Rathke J., Weigl M., Gindl-Altmatter W. Particle board and oriented strand board prepared with nanocellulose-reinforced adhesive. *Journal of Nanomaterials*, 2012, vol. 2012, no. 158503. <https://doi.org/10.1155/2012/158503>.
22. Trache D., Tarchoun A. F., Derradji M., Hamidon T. S., Masruchin N., Brosse N., Hussin M. H. Nanocellulose: from fundamentals to advanced applications. *Frontiers in Chemistry*, 2020, vol. 8, no. 392. DOI: 10.3389/fchem.2020.00392.
23. Panov N. G., Pitukhin A. V., Vasilyev S. B. Properties of Particleboards Manufactured from Low-Grade Wood by Using a Shungite Modified Binder. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 945, pp. 453—458. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.945.453>.
24. Panov N. G., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Influence of shungite modifier on technological properties of polymeric glue based on urea-formaldehyde resin. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 992, pp. 434—438. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.434>.