

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-3-283-311

ОБЗОР ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ*

© 2023 г.

**Ломунов А.К., Брагов А.М., Гонов М.Е.,
Южина Т.Н., Крымов Н.В.**

*Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

lomunov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 13.04.2023

В обзоре представлено современное состояние в области теоретического и экспериментального исследования динамического деформирования и разрушения древесных материалов. Рассмотрены ортогональные свойства древесины, особенности ранней и поздней древесины, проанализированы динамические свойства древесины, а также влияние скорости деформации при динамическом сжатии. Отмечено, что древесина разных пород в основном используется в качестве одного из материалов, демпфирующих динамические нагрузки в результате ударов или взрывов. Например, она способна смягчить результаты высокоскоростных воздействий на содержимое контейнеров при перевозке опасных материалов авиационным, автомобильным и железнодорожным транспортом.

Установлено, что причиной возникновения эффектов внутреннего трения в древесине являются области лигнина, в который погружены пучки молекул целлюлозы (микрофибриллы) диаметром 25–30 нм, которые по своей структуре являются кристаллическими, что приводит к вязкоупругому поведению – внутреннему демпфированию. Для улучшения демпфирующих свойств рекомендовано выбирать древесину с низким углом микрофибрилл.

Показано, что кривая напряжение–деформация при динамическом сжатии древесины состоит из трех отдельных частей: начальной упругой области, области текучести и области уплотнения. Основные характеристики сжатия, то есть составные части кривой напряжение–деформация и разрушение волокон, не зависят от температуры. Модуль Юнга значительно больше в продольном направлении, чем в радиальном и тангенциальном направлениях. Скорость деформации, температура и влажность оказывают большое влияние на прочностные свойства древесины.

Рассмотрены особенности механического поведения зон ранней и поздней древесины в массиве ствола дерева. Поздняя древесина обладает большей жесткостью по сравнению с ранней. В результате различия в механических свойствах древесных волокон во время сжатия волокна ранней древесины могут быть разрушены, в то время как волокна поздней древесины остаются неповрежденными.

*Аналитическое исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант №22-19-00138).

Вследствие сложности структуры древесины для ее достоверного описания численной моделью необходимы сложные модели, учитывающие влияние не только температуры, скорости деформации и вида напряженно-деформированного состояния, но и угла между направлением нагружения и направлением волокон древесины. Рассмотрены две основные группы моделей древесного материала: микромеханическая, моделирующая детали структуры древесины, и континуальная, моделирующая поведение древесины в целом.

Ключевые слова: эксперимент, динамическая прочность, древесина, напряжение, деформация, скорость деформации, метод Кольского, математическая модель.

Введение

Интенсивность перевозок широкого круга токсичных веществ, компонентов ядерных вооружений, отходов ядерной энергетики и т.д. за последние годы существенно возросла. С другой стороны, ужесточились требования к обеспечению безопасности транспортируемых материалов. Особенно актуальным становится анализ возможных аварийных ситуаций со специальными контейнерами, в которых транспортируются вышеперечисленные материалы. Такие ситуации возникают при падении контейнеров, террористических актах, техногенных и природных катастрофах и, как правило, сопровождаются динамическими воздействиями высокой интенсивности. В этом случае численные расчеты напряженно-деформированного состояния и прочности транспортных контейнеров могут быть очень полезны при их разработке.

Не менее важным аспектом является повышение требований обеспечения безопасности окружающей среды в случае аварийных ситуаций при перевозке опасных веществ авиационным, автомобильным или железнодорожным транспортом. В частности, весьма актуальной является разработка конструкции надежного контейнера для воздушной транспортировки радиоактивных материалов [1–5] в связи с высокими уровнями ударных воздействий, характерными для авиационной аварии. Например, авиаконтейнер по нормам МАГАТЭ [6] должен выдерживать удар о жесткую преграду под любым углом со скоростью не менее 90 м/с и последующий авиационный пожар длительностью до 1 часа с температурой горения углеводородного топлива 1010 °С.

В качестве одного из демпфирующих материалов в конструкциях контейнеров часто используется древесина разных пород деревьев, которая может смягчить высокоскоростные ударные воздействия на контейнеры и предохранить их содержимое от повреждения. Общеизвестно, что место произрастания древесины, ее возраст, место вырезки образца и ряд других факторов оказывают влияние на механические свойства древесины, поэтому получаемые разными авторами результаты могут достаточно сильно отличаться друг от друга, тогда как получаемые при этом эффекты зачастую качественно совпадают друг с другом.

Вследствие сложной структуры древесины ее принято считать материалом, свойства которого обладают ортогональной анизотропией [7], то есть свойства древесины различаются при нагружении вдоль и поперек волокон. Поэтому для достоверного расчета поведения контейнеров с демпфирующими материалами из древесины необходимы, помимо динамических диаграмм деформирования и характеристик прочности различных пород древесины с учетом анизотропии свойств, верифици-

рованные математические модели, описывающие поведение деревянных конструкций под действием ударных нагрузок [8–13].

Ортогональные свойства древесины

Древесина состоит из соединения растительных клеток или так называемой клеточной ткани; у различных пород эта ткань различна. В процессе роста происходит равномерное утолщение ствола путем образования годичных слоев или колец. По функциональному назначению клетки древесины разделяются на три группы, а именно: проводящие клетки и сосуды, проводящие воду; опорные или механические клетки, служащие для увеличения сопротивления ствола механическим усилиям, и питающие или запасные клетки, питающие все дерево. Каждая клетка снаружи состоит из клеточной оболочки, часто состоящей из нескольких слоев. Внутри клетки содержат либо только воздух, либо воздух и воду, или же только клеточный сок, а иногда все три составные части вместе.

Вследствие такой структуры древесина может рассматриваться как анизотропный материал, механические свойства которого зависят от направления прикладываемой нагрузки. У древесины выделяют три ортогональных направления: продольное L – направление вдоль волокон, идущих по длине дерева; радиальное R – перпендикулярно годичным кольцам и тангенциальное T – касательно к ним, они показаны для образца древесины на рис. 1а, а для изображения годичного кольца – на рис. 1б.

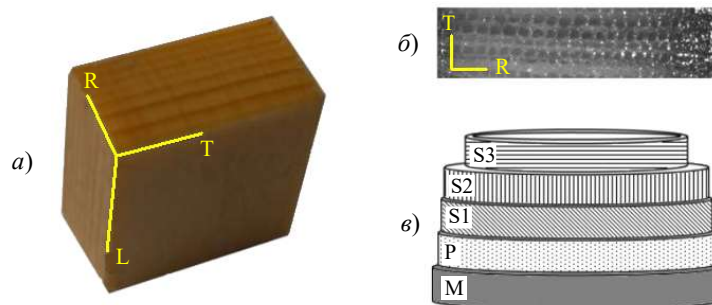


Рис. 1. Ортогональные направления древесины: а) для образца ели, б) для увеличенного изображения годичного кольца; в) слои стенки ячеек древесины

Слои клеточной стенки древесины, начиная с внешней стороны клетки, показаны на рис. 1в. Они представляют собой первичную стенку P и вторичную стенку S, состоящую из трех слоев: внешнего слоя S1, среднего слоя S2 и внутреннего слоя S3. Между клетками древесины располагается средняя пластинка M.

Стенка клетки древесины состоит в основном из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Оболочки клеток сложены из нескольких слоев очень тонких волоконцев, называемых микрофибриллами. Они компактно уложены и направлены по спиральям под разными углами к продольной оси клетки (как у каната). Это обеспечивает прочность материала при растяжении. Угол между микрофибриллой и направлением длины клетки в зоне P является случайным, в зоне S1 составляет 45–90°, в зоне S2 – 0–20° и в зоне S3 – 30–70° [14].

Особенности ранней и поздней древесины

Годичный слой древесины имеет две части, и это хорошо видно у большинства пород. Та часть, которая находится ближе к сердцевине древесины, имеет светлую окраску и более мягкую структуру, она имеет название «ранняя древесина» (в иностранной литературе – Earlywood, EW). Активный рост такой древесины происходит в первой половине периода вегетации. «Поздняя древесина» (Latewood, LW) находится в годичном кольце ближе к коре – это уже твердая часть и более темного цвета. Поздняя древесина имеет большую жесткость, нежели ранняя (рис. 2).



Рис. 2. Граница и расположение ранней и поздней древесины

Различие в поведении древесных волокон приводит к тому, что волокна ранней древесины во время сжатия могут быть разрушены, в то время как волокна поздней древесины остаются неповрежденными.

В статье [15] отмечена анизотропность ранней древесины (в отношении поперечной усадки и поперечной упругости) и изотропность поздней древесины в поперечном направлении. Оба модуля Юнга (радиальный и тангенциальный) криволинейно возрастают с увеличением плотности [16]. С увеличением числа годичных колец и высоты дерева модуль Юнга увеличивается (рис. 3), в то время как модуль сдвига увеличивается согласно числу колец и уменьшается с увеличением высоты (рис. 4). В пределах одного годового кольца процентное изменение модуля Юнга почти так же велико, как и во всех кольцах от сердцевины древесины до ее внешнего кольца [17]. В [18] отмечено различие коэффициента Пуассона у ранней и поздней древесины.

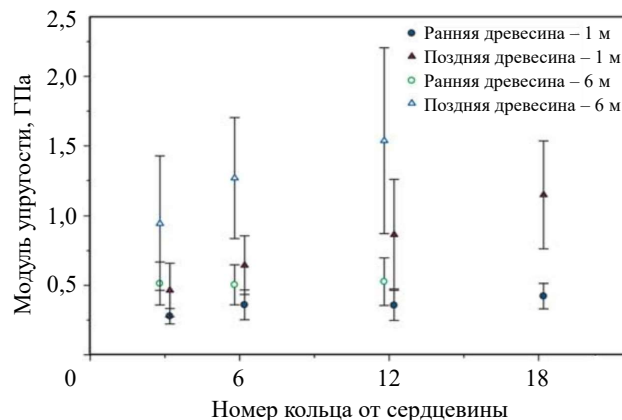


Рис. 3. Значения модуля упругости ранней и поздней древесины с планками стандартного отклонения по номеру кольца и высоте в стволе

На рис. 3 средние значения модуля упругости представлены в разбивке по количеству колец и высоте. Для ранней древесины он был относительно постоянным с количеством колец, но существенно увеличивался с высотой дерева. Для поздней древесины модуль упругости был самым низким вблизи сердцевины и существенно увеличивается с увеличением количества и высоты колец. Для кольца 18 на высоте 6 м данных недостаточно.

На рис. 4 показаны средние значения модуля продольно-поперечного сдвига в зависимости от количества колец и высоты. Как видно, модуль сдвига поздней древесины существенно увеличивается с увеличением номера кольца. Для ранней древесины модуль сдвига мало изменяется с номером кольца и уменьшается с высотой.

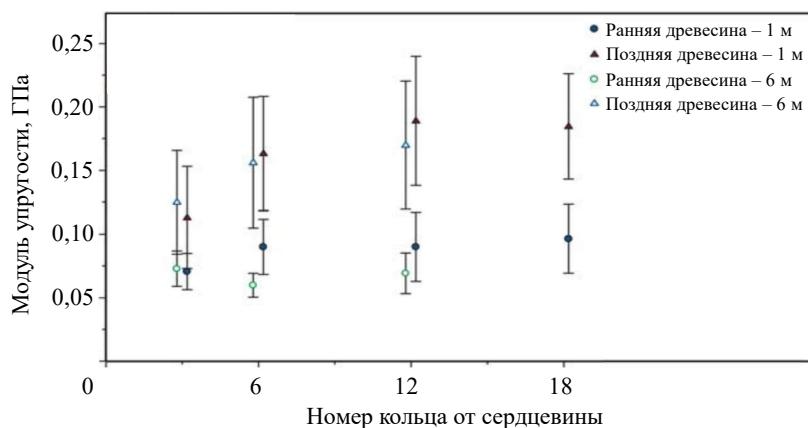


Рис. 4. Значения модуля продольно-поперечного сдвига ранней и поздней древесины с планками стандартного отклонения по номеру кольца и высоте в стволе

Иное поведение наблюдается в поведении древесины при растяжении: амплитуды деформации в ранней древесине могут быть в два раза больше, чем в поздней древесине [19, 20], тогда как температура и скорость деформации не оказывают существенного влияния на распределение деформации между ранней и поздней древесиной. Для оценки демпфирующей способности зон ранней и поздней древесины в [21] проводился анализ повышения температуры древесины на примере образцов южной сосны при циклическом сжатии с частотой 15 и 30 Гц. Для этого в зоны ранней и поздней древесины испытываемого образца вставляли термопары небольшого диаметра (0,5 мм), а контрольная термопара помещалась в тело образца (сердцевину). На рис. 5 показано повышение температуры зон ранней и поздней древесины при нагружении образца циклической сжимающей нагрузкой частотой 15 Гц.

Видно, что в поздней древесине рост температуры медленнее, а достигнутая температура ниже, чем в ранней древесине. При этом отмечено [22], что разница в температурах размягчения для ранней и поздней древесины не зависит от частоты измерений. Основные характеристики сжатия, то есть прочностные и деформативные части диаграммы напряжение–деформация, а также разрушение волокон не зависят от температуры [23, 24].

При динамическом сжатии древесины ее диаграмма напряжение–деформация включает три отдельные части: начальную упругую область, область текучести и область уплотнения (рис. 6). На рисунке метки Ring1 и Ring2 соответствуют образ-

цам с одним и двумя годичными кольцами, Cross – образцам с бóльшим числом годичных колец. При радиальном сжатии древесины упругая область соответствует обратимой упругой деформации волокон ранней древесины.

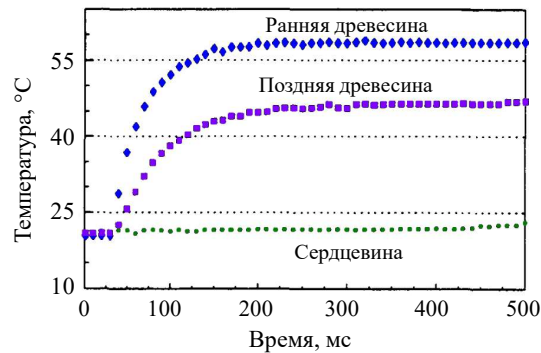


Рис. 5. Повышение температуры образца, испытанного при комнатной температуре и частоте 15 Гц

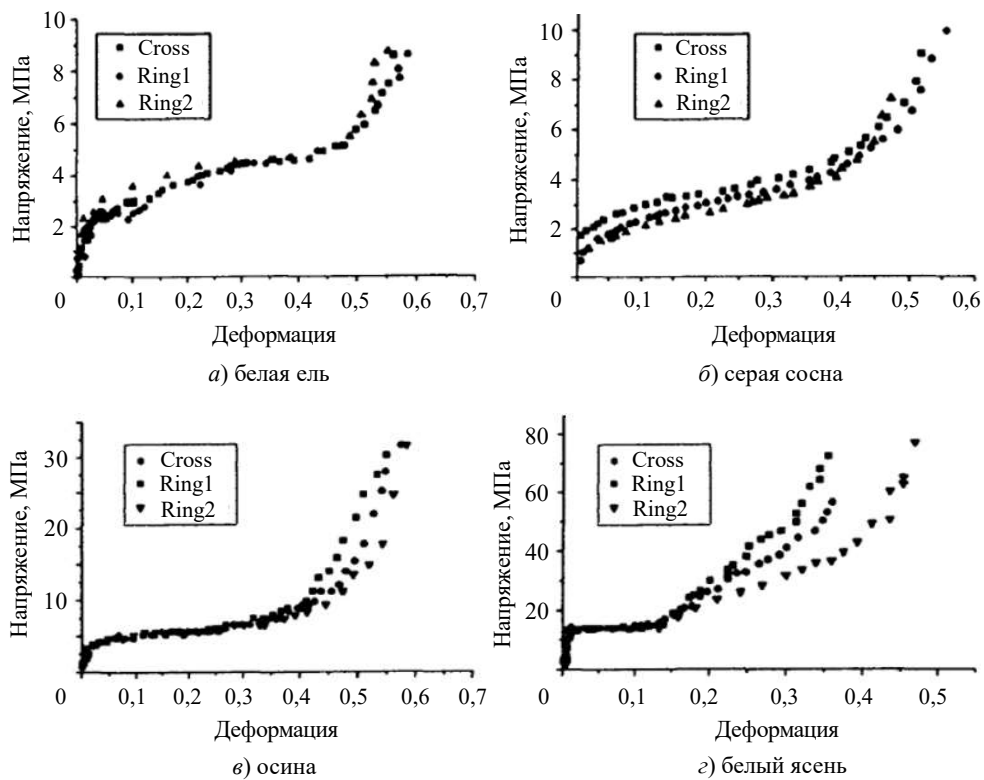


Рис. 6. Кривые напряжение–деформация четырех видов древесины при радиальном сжатии [23]

При тангенциальном и продольном сжатии заметна комбинация реакции волокон ранней и поздней древесины. В области текучести происходит разрушение клеток ранней древесины, вызывающее необратимое повреждение клеток поздней древесины. На финальной стадии (область уплотнения) происходит дополнительное

сжатие волокон ранней древесины и даже может произойти некоторое упругое сжатие зон поздней древесины [25]. Из-за толщины клеточных стенок разрушение клеток поздней древесины может и не произойти [23, 26]. Также отмечено, что в продольном направлении модуль Юнга значительно больше, чем в радиальном и тангенциальном направлениях [23, 26].

Поскольку на жесткость древесины оказывают существенное влияние скорость деформации, температура и содержание влаги [26, 27], то проводить экспериментальные исследования необходимо в условиях, которые максимально близки к реальным условиям работы древесины в конструкции.

Влияние скорости деформации на характеристики древесины при динамическом сжатии

Хотя механическая реакция древесины на приложенную динамическую нагрузку подобна реакции металлов или жестких пенопластов, применение принципов механики удара к испытаниям древесины на протяжении многих лет было весьма ограниченным. Поэтому единого мнения о численной модели древесины при средних и высоких скоростях деформации к настоящему времени не сформировалось.

Результаты систематических исследований динамических свойств пяти хвойных и лиственных пород древесины (сосна, юкка, красное дерево, американский дуб, бальза) при скоростях удара до 300 м/с приведены в статьях С. Рейда с соавторами [28–30]. В своих исследованиях авторы применяли установку, реализующую метод прямого удара, в котором для измерения усилий использовался мерный стержень Гопкинсона, где либо удар наносился по деревянному образцу, размещенному на торце мерного стержня, либо снаряд с закрепленным на нем деревянным образцом ударял по торцу мерного стержня. Испытания проводились, как в условиях одноосного напряженного состояния, так и в условиях одноосной деформации. Образцы нагружались вдоль и поперек волокон. Анализ измеренных импульсов деформации в мерных стержнях, показал, что происходит значительное повышение начальной прочности образцов при сжатии в условиях динамического нагружения.

В исследовании [29] рассмотрены возникающие в результате квазистатического и динамического одноосного сжатия режимы макродеформации и микродеформации. При квазистатическом сжатии механизмы деформации клеток древесины достаточно локализованы, а при динамическом нагружении возникают распространяющиеся по материалу волновые фронты дробления, подобные ударным волнам. Даже в условиях квазистатического одноосного сжатия неупругая деформация древесины представляет собой весьма сложный процесс, обусловленный разрушением и локальной деформацией клеточной структуры. Предложенная авторами модель поведения образцов, нагруженных поперек волокон, показала повышение прочности древесины, что подтвердилось сравнением экспериментальных данных и численных результатов.

Анализ полученных значений разрушающих напряжений и энергии разрушения показал, что разрушающие динамические напряжения превышают статические значения в несколько раз, и с ростом скорости удара их величина растет. Основываясь на результатах Ашби [31], авторы объяснили рост разрушающего напряжения при динамическом воздействии влиянием инерционных эффектов на микроуровне. Они рассмотрели различные модельные представления древесины для диаграмм деформирования и теории ударных волн [28, 30]. По-видимому, использование теории

ударных волн является проблематичным, поскольку древесина из-за ее структуры обладает, с одной стороны, ярко выраженными вязкими свойствами, с другой стороны, вследствие отражений волн от свободных поверхностей, границ металл-древесина в реализованных экспериментах формируется очень сложная волновая картина, и, наконец, вследствие вязкого характера поведения древесины и значительной длины образцов фронт ударной волны сильно размывается. Авторы отметили также, что прочность образцов древесины, испытанных вдоль волокон, оказалась на порядок выше, чем прочность поперек волокон.

Изучение динамического поведения древесины хвойных и лиственных пород при сжатии [7] проводилось с использованием двух методов: метода Кольского для скоростей деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ и метода плосковолнового ударного эксперимента при скорости $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$. Авторами для образцов сосны, березы и липы, вырезанных вдоль и поперек волокон, с помощью метода Кольского были получены динамические диаграммы. Отмечена положительная чувствительность всех исследованных материалов к скорости деформации. При этом оказалось, что прочность образцов при сжатии вдоль волокон почти на порядок выше, чем поперек волокон, тогда как деформационные характеристики имеют противоположную тенденцию. Полученные в плосковолновых ударных экспериментах на тонких образцах-пластинах ударные адиабаты сосны и березы в осях $D-U$ (D – скорость ударной волны, U – массовая скорость) могут быть представлены линейным соотношением $D = A + BU$, где A и B – константы, определенные по результатам плосковолновых экспериментов.

С.А. Новиковым с соавторами был выполнен большой объем динамических испытаний секвойи, березы, сосны и осины [32]. Работа состояла из двух этапов исследований. На первом этапе цилиндрические образцы секвойи и березы испытывались по методу Кольского на одноосное сжатие при температурах -30 , $+20$ и $+65$ °С. Образцы диаметром и высотой по 25 мм влажностью $\omega = 6-7\%$ вырезались под углами 0, 5, 10, 15, 30, 45 и 90° относительно направления волокон. Скорость нагружения образца составляла около 10 м/с и определялась косвенно (по максимальному развиваемому напряжению), поскольку для нагружения системы разрезного стержня Гопкинсона использовалось жидкое взрывчатое вещество (ВВ). Оказалось, что при поперечном сжатии прочность секвойи и березы на порядок меньше, чем при продольном сжатии, причем прочность секвойи практически не зависит ни от температуры, ни от скорости деформации.

На втором этапе работ прочностные и деформационные свойства сосны и осины при трех уровнях влажности (5, 20 и более 30%) определялись на копре с падающим грузом методом динамической осадки при скорости удара до 13 м/с. В экспериментах электроконтактными датчиками измерялась скорость удара, а пьезоакселерометрами, расположенными на падающем грузе, определялось усилие удара. Образцы для испытаний в виде прямоугольных параллелепипедов размером $20 \times 20 \times 30$ мм были вырезаны в трех разных направлениях по отношению к волокнам (продольное, радиальное и тангенциальное). По разнице между массами образцов до и после сушки определялась влажность образцов. В результате проведенных копровых испытаний образцов осины и сосны была получена зависимость, связывающая разрушающее напряжение σ с влажностью ω , температурой T и скоростью удара V :

$$\sigma(\omega, T, V) = \sigma_{\omega} + (\sigma_0 - \sigma_{\omega}) \exp(-\omega/c^2) - k_1 T + k_2 V,$$

где σ_{ω} – прочность при $\omega > 30\%$, $T = 0$, $V = 0$; σ_0 – прочность абсолютно сухой

древесины ($\omega \approx 0$, $T = 0$, $V = 0$); c – эмпирический коэффициент; k_1 и k_2 – соответственно температурный и скоростной коэффициенты.

Предложенное соотношение основано на экспоненциальной зависимости механической прочности от влажности и линейной зависимости от температуры и скорости удара. Особенностью указанной зависимости является то, что она не может описать область с отрицательной температурой образца и влажностью более 30%, хотя замороженный образец влажной древесины обладает повышенной прочностью при его радиальной и тангенциальной деформации. Обнаружено, что прочность древесины сосны и осины при увеличении влажности до 30% уменьшается, а при дальнейшем увеличении влажности остается постоянной. Кроме того, прочность уменьшается с повышением температуры и увеличивается при динамической нагрузке по сравнению со статической нагрузкой.

Я. Бюхар исследовал поведение хвойных и лиственных пород древесины (ель, сосна, дуб, бук, береза) на примере взрывного нагружения деревянных балок и плит [33, 34]. Для исследований использовались совместно экспериментальные методы и численное моделирование с помощью программного комплекса LS-DYNA. Кроме высокоскоростных, проводились испытания при низких и средних скоростях деформации. Статическая прочность определялась при сжатии, растяжении и изгибе. При средних скоростях деформации был использован метод трехточечного изгиба балки в тесте Шарпи. Для динамических испытаний при скорости деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ был применен метод Кольского. Кроме того, с помощью кумулятивного взрывного устройства были выполнены плоскотоволновые эксперименты по ударному нагружению пластин толщиной 50 мм. На основании данных, полученных разными методами, в широком диапазоне скоростей деформации для всех испытанных пород древесины было получено соотношение между разрушающим напряжением σ и скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ в виде $\sigma = \sigma_B + \alpha \dot{\epsilon}$, где параметры σ_B и α были определены экспериментально. Результаты проведенных экспериментов по взрывному нагружению и их численное моделирование с использованием в математических моделях определенных экспериментально параметров механического поведения древесины показали хорошее качественное и удовлетворительное количественное соответствие.

Результаты подробных исследований влияния на механические свойства древесины ее плотности, влажности, структуры, угла вырезки и вида напряженно-деформированного состояния приведены в [35–40], где с помощью различных экспериментальных методов были получены динамические диаграммы деформирования нескольких пород древесины, определены предельные прочностные и деформационные характеристики, энергия разрушения, а также построены зависимости этих характеристик от скорости деформации. Диапазон скоростей деформации в исследованиях составил от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} . Для получения свойств древесины при скоростях деформации от 10^{-3} до 10^0 с^{-1} использовались сервогидравлические испытательные машины, в диапазоне скорости деформации $10\text{--}10^2 \text{ с}^{-1}$ применялись копривые установки, а при скоростях деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ применялись модификации метода Кольского. Авторы отмечали, что разрушающие напряжения возрастают с ростом скорости деформации, причем наиболее сильное возрастание отмечается при скоростях порядка 10^3 с^{-1} .

В статье [40] в широком диапазоне скоростей деформации от 0,001 до 600 с^{-1} исследованы процессы разрушения, определены предельные напряжения и деформа-

ции, а также степени энергопоглощения в трех ортотропных направлениях (продольном, радиальном и тангенциальном) двух древесных пород (ель и бук). Для проведения испытаний в широком диапазоне скорости деформации использовалось несколько различных установок: машина с винтовым приводом (Sintec 20D) для низких скоростей деформации ($0,001 \text{ с}^{-1}$), испытательная машина Instron VHS65/20 для промежуточных скоростей деформации ($0,39, 2,45, 15,3 \text{ с}^{-1}$) и установка с системой разрезного стержня Гопкинсона для высокой скорости деформации (600 с^{-1}). В результате для изученных видов древесины при продольном нагружении получено, что напряжение разрушения и напряжение текучести увеличиваются с ростом скорости деформации, причем увеличение напряжения разрушения и напряжения текучести для обоих материалов в продольном направлении более значимо при скоростях деформации выше 15 с^{-1} . При высокой скорости деформации 600 с^{-1} образцы бука резко растрескивались в продольном направлении. Ель при ударных нагрузках обладает большей удельной способностью рассеивать энергию, чем бук. По результатам исследований авторы делают вывод, что древесина ели и бука обладает ярко выраженными вязкоупругими свойствами.

Для амортизации ударов и защиты от ударных воздействий часто используются сэндвич-конструкции, содержащие ячеистые материалы со стохастической и периодической топологией [31]. В случае удара приложенная энергия поглощается за счет пластической деформации сжатия ячеек внутри материала. Напряжение текучести (раздавливающее) защитного ячеистого материала определяет ту нагрузку, которая передается защищаемой конструкции в процессе диссипации. Поэтому поведение идеального поглотителя энергии – это отклик жестко-идеально-пластичного материала, способного воспринимать очень большие деформации. В рамках этой тенденции пробковое дерево, как природный пористый биокompозит, обладает прекрасными демпфирующими свойствами. Его ячеистая и пористая микроструктура позволяет воспринимать большие деформации, а тонкая композитная наноструктура древесно-клеточного материала увеличивает его удельную прочность и жесткость. Все это приводит к высокой удельной способности поглощения энергии.

Пробковое дерево (Balsa), как диффузно-пористая листовенная древесина, имеет равномерное по типу и размеру распределение ячеек по всему сечению волокон (рис. 7а). Длинные (средняя длина 650 мкм) шестиугольно-призматические ячейки заострены на концах и имеют диаметр от 30 до 70 мкм (в среднем 45 мкм) (рис. 7б), что дает ячейке соотношение сторон около 16:1 [41].

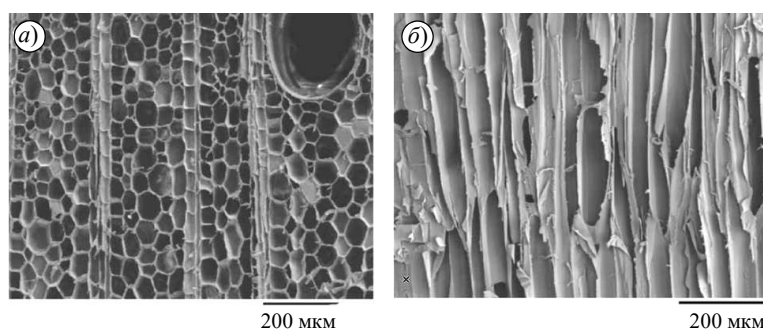


Рис. 7. Типичная структура пробкового дерева поперек волокон (а) и вдоль волокон (б)

Древесина пробкового дерева, как и другие породы древесины, имеет три ортогональные оси в продольном (L, вдоль волокон), радиальном (R, поперек волокон

и вдоль лучей) и тангенциальном (Т, поперек волокон и поперечно лучам) направлениях, образуя неоднородный пористый композит. Этот композит сильно анизотропен с высоким отношением продольных свойств к поперечным. Следует отметить, что для практических применений, в которых пробковое дерево рассматривается как потенциальный материал для рассеивания энергии, особый интерес представляют его динамическая составляющая характеристика в продольном направлении, а также соответствующие механизмы разрушения. В статье [41] исследованы динамические свойства пробкового дерева при нагружении вдоль волокон при номинальной скорости деформации порядка 4000 с^{-1} во всем диапазоне плотности от 77 до 271 кг/м^3 (рис. 8). Полученные диаграммы деформирования имеют три характерных участка: 1) участок практически линейного поведения древесины до максимального напряжения, при котором начинается разрушение структуры, сопровождающееся спадом напряжения; 2) участок интенсивного развития деформации при практически постоянном уровне напряжений (плато); 3) участок, на котором клетки древесины разрушаются настолько, что противоположные клеточные стенки соприкасаются друг с другом (или их сломанные фрагменты упаковываются вместе), а при дальнейшей деформации сжимается уже сам материал клеточных стенок, что дает окончательную, круто возрастающую часть кривой напряжения–деформации, соответствующую режиму уплотнения (консолидации).

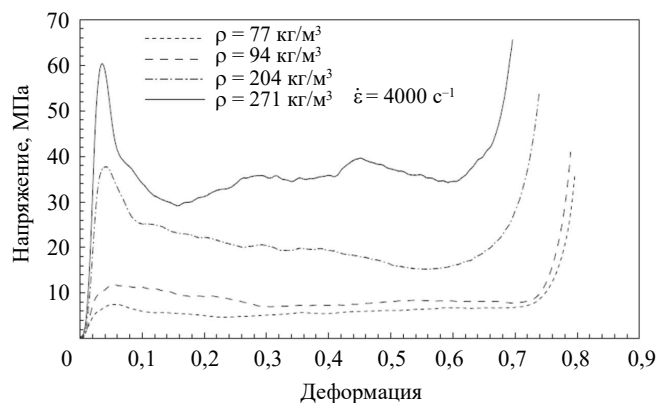


Рис. 8. Диаграммы при динамическом сжатии пробкового дерева вдоль волокон при различных плотностях древесины

Результаты экспериментов показали, что напряжение текучести практически не зависит от скорости деформации, тогда как при разрушении прочность пробкового дерева имеет высокую чувствительность к скорости нагружения (увеличение на 50–130% по сравнению с соответствующими квазистатическими значениями) (рис. 9).

Как предположили авторы, указанная разница в реакции материала на увеличение скорости деформации может объясняться различиями в кинематике деформации. Из-за дискретного характера ячеистой топологии в условиях динамического нагружения происходит локализованная деформация в элементах клеточной структуры, что приводит к большим ускорениям в ячеистых элементах (микроинерция). Однако с увеличением скорости деформации эффективность деформационного уплотнения пробкового дерева снижается. При динамическом нагружении имеют место два основных режима разрушения: выпучивание и образование изгибов. Проведенное численное моделирование процесса развития деформации при разрушении показало,

что микроинерция элементов клеточной структуры может привести к повышению их прочности вплоть до предела прочности материала клеточной стенки.

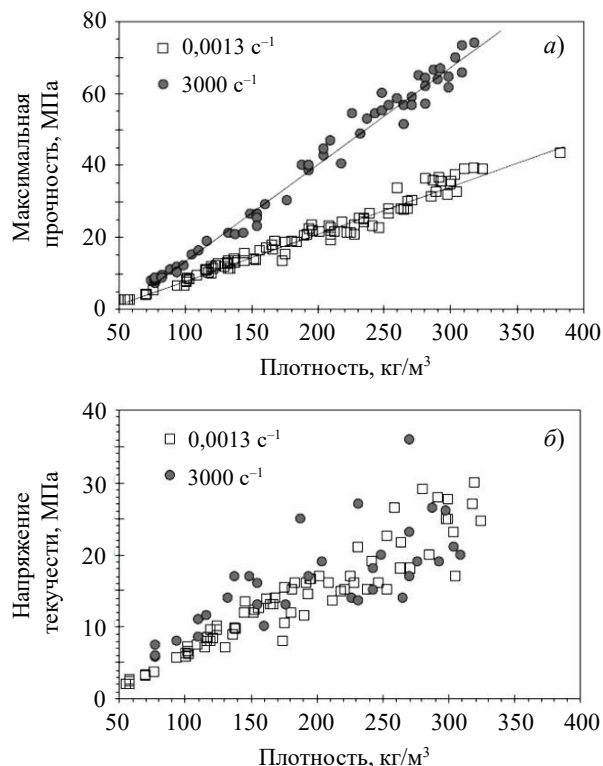


Рис. 9. Диаграммы зависимости предела прочности при сжатии (а) и напряжения текучести (б) пробкового дерева от плотности и скорости деформации

В статье [42] исследовано динамическое поведение пробкового дерева при сжатии в широком диапазоне скоростей деформации: при низких скоростях деформации (10^{-4} с^{-1}) использовалась машина с винтовым приводом, для скоростей деформации до 500 с^{-1} использовалась сервогидравлическая испытательная машина, и для высоких скоростей деформации ($500\text{--}4000 \text{ с}^{-1}$) использовалась установка, реализующая метод Кольского со стержнями из магниевого сплава и полупроводниковыми тензодатчиками для достоверного измерения малых амплитуд деформаций в опорном стержне. Как показали результаты экспериментов, исследуемый ячеистый материал при сжатии в диапазоне $10^{-2}\text{--}4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ имеет умеренную чувствительность к скорости деформации, тогда как в диапазоне $10^{-4}\text{--}4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ чувствительность к скорости деформации минимальна (рис. 10).

Для всех режимов по скорости деформации реакция на одноосное сжатие включает в себя фазу упругости, в которой напряжение увеличивается линейно с деформацией, и фазу пластического плато, где напряжение остается постоянным с развитием деформации. Для пробкового дерева прочность текучести при скоростях деформации порядка 10^3 с^{-1} увеличилась в два раза по сравнению со статической прочностью.

Динамические испытания европейского бука по всем основным направлениям нагружения – продольном L, радиальном R и тангенциальном T – проводились с

помощью метода Кольского [43]. Тесты были повторены в численном варианте в программном комплексе LS-DYNA с подбором материальных констант модели сложного материала с учетом анизотропии, упругих, прочностных и деформационных свойств. При этом разрушение считалось несимметричным при растяжении и сжатии. Это было достигнуто путем включения трехосности напряжения в модель разрушения.

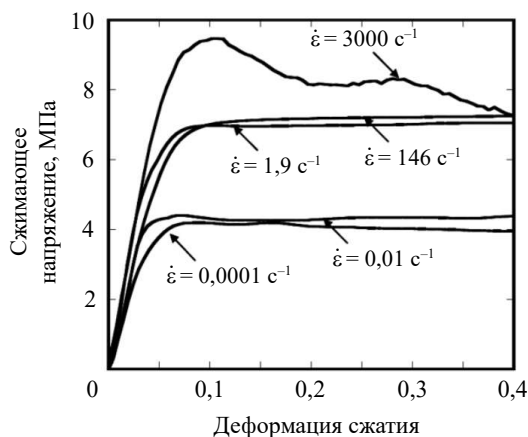


Рис. 10. Сравнение прочностных характеристик сжатия при различных скоростях деформации пробкового дерева при нагружении вдоль волокон

Упругие импульсы деформации, измеренные на нагружающем и опорном стержнях, включая падающий ϵ^I , отраженный ϵ^R и прошедший ϵ^T импульсы, сравнивались с численным моделированием для L, R и T направлений нагружения (рис. 11). Сплошные линии соответствуют измерениям, штриховые линии – расчетам.

При испытаниях в направлении нагружения T не наблюдалось каких-либо повреждений или проявлялось лишь незначительное растрескивание на краях, образующее в некоторых случаях заусенцы. Распространение трещин с параметром повреждения, отображаемым для соответствующих направлений нагружения с безразмерным параметром поврежденности, сравнивалось с экспериментами (рис. 12).

Видно, что полученное в расчетах разрушение образцов хорошо соответствует полученному экспериментально. Наклонный излом или X-образный излом обнаружен для образцов, нагруженных в направлении L. Близкое, но более зигзагообразное растрескивание, появилось для R направления нагружения, в то время как для направления T растрескивания не было. По результатам исследования модули Юнга и коэффициенты Пуассона были близки к значениям, полученным при квазистатических испытаниях. Таким образом, упругие свойства древесины европейского бука кажутся слабо чувствительными к скорости деформации.

В статье [44] рассматривается поведение при сжатии приморской сосны (быстрорастущая порода с твердой древесиной, происходящая из западной части Средиземноморья) в поперечной (радиально-тангенциальной) плоскости при квазистатическом и высокоскоростном режимах деформации. Для испытаний при высокой скорости деформации использовался метод Кольского. Для оценки влияния скорости деформации были проведены аналогичные испытания на квазистатическое сжатие.

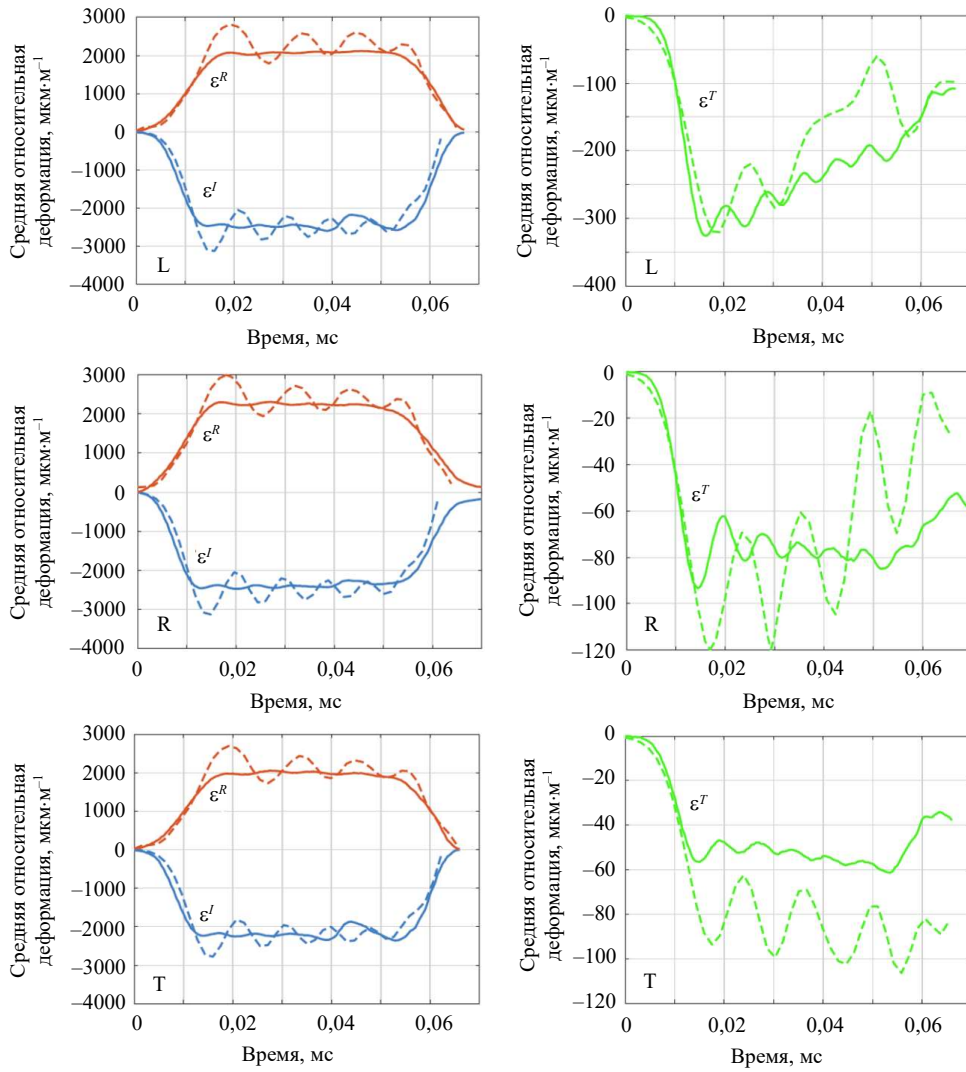


Рис. 11. Импульсы упругих деформаций нагружающего (слева) и опорного (справа) стержней

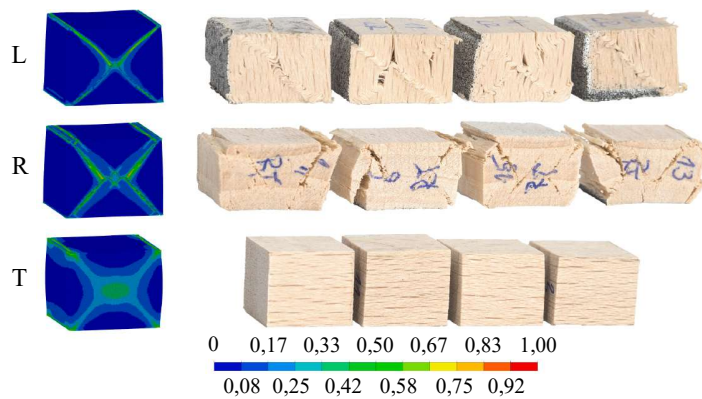


Рис. 12. Сравнение экспериментальных (справа) и расчетных (слева) образцов для L, R и T направлений нагружения

Две различные ориентации были проанализированы путем вырезания прямоугольных призматических образцов размером $20 \times 10 \times 10$ мм вдоль радиального (0°) и тангенциального (90°) направлений симметрии материала. И при статическом, и при динамическом нагружениях производилась высокоскоростная видеорегистрация процесса деформирования образцов и использовался метод корреляции цифровых изображений (DIC) для оценки полей деформации. Сравнение кривых напряжение–деформация в зависимости от режима скорости деформации показано на рис. 13 (для образцов в радиальном (а) и тангенциальном (б) направлениях).

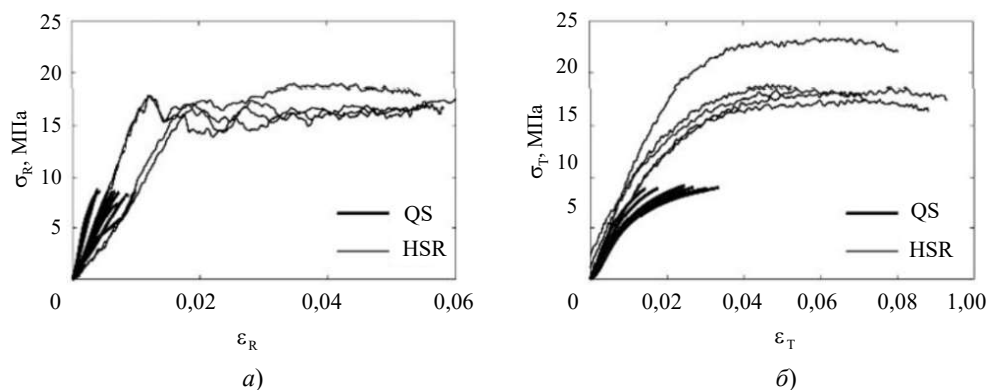


Рис. 13. Диаграммы деформирования $\sigma_R - \varepsilon_R$ и $\sigma_T - \varepsilon_T$ в квазистатическом (QS) и в динамическом (HSR) режимах нагружения

На полученных диаграммах интересно отметить, что, как правило, увеличение скорости деформации сопровождается увеличением прочностных характеристик материала. Особенно это касается предела текучести, который возрастает при высокой скорости деформации.

Применение метода корреляции цифровых изображений позволило измерить с высокой точностью процесс развития продольной и поперечной деформаций образца при сжатии и затем определить величины модуля упругости и коэффициента Пуассона древесины. Авторы определили, что при изменении режима испытаний от квазистатического к высокоскоростному увеличение модуля упругости составило 6,3% (направление R) и 21,9% (направление T), предела текучести – 130,3% (направление R) и 111,8% (направление T), а также уменьшение коэффициента Пуассона на 10,6% (направление R) и на 25,8% (направление T).

В [45] в широком диапазоне скоростей деформации от $2,2 \cdot 10^{-3}$ до 10^3 с^{-1} исследовано поведение при сжатии в двух ортотропных направлениях (продольном и поперечном) образцов пихты Дугласа. Поскольку древесина обычно применяется для демпфирования ударной взрывной нагрузки, особое внимание в исследовании уделялось характеристикам разрушения и поглощения энергии. Квазистатические испытания были проведены на универсальной испытательной машине, а динамические испытания – на установке, реализующей метод Кольского. Диаграммы деформирования, полученные при квазистатическом и динамическом режимах нагружения, характеризуются двумя стадиями: упругой и критической. Показано, что прочность и жесткость древесины в поперечном направлении значительно меньше соответствующих величин в продольном направлении. Для численного моделирования поведения древесины при квазистатическом и динамическом сжатии предложены две разные феноменологические модели, которые хорошо согласуются с эксперимен-

тальными результатами. С использованием подобранных параметров этих моделей формулируется оригинальное определение коэффициента динамического упрочнения (КДУ). Прочность пихты проявляет положительную чувствительность к скорости деформации, описываемую линейной зависимостью между КДУ и скоростью деформации и зависящей от направления приложения нагрузки. Были оценены характеристики энергопоглощения пихты, которое растет при увеличении скорости деформации при одной и той же осевой деформации.

Было проведено комплексное экспериментальное исследование механического поведения древесины клена и ясеня различных плотностей, используемых для изготовления бейсбольных бит [46]. Программа экспериментов включала в себя испытание на четырехточечный изгиб для определения модулей упругости и разрушающей нагрузки и испытания Шарпи для определения деформации при разрушения в зависимости от скорости деформации и плотности древесины. Затем полученные параметры модели MAT_WOOD были верифицированы путем моделирования в программном комплексе LS-DYNA эксперимента Шарпи. В результате определено, что с увеличением плотности модуль упругости и прочность при разрыве увеличиваются и у клена, и у ясеня, энергия разрушения также возрастает у образцов обеих пород, деформация до разрушения возрастает у клена, но не возрастает у ясеня. В целом, образцы ясеня имеют более высокую степень энергопоглощения, чем образцы клена.

В НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (НИИМ ННГУ) для оценки степени анизотропии проведены испытания трех пород древесины с различным направлением вырезки образцов (0° , 30° , 45° , 60° и 90°) относительно расположения волокон [7]. Испытывались цилиндрические образцы сосны, березы и осины высотой ~ 10 мм и диаметром ~ 20 мм в условиях одноосного напряженного состояния.

Кроме того, в НИИМ ННГУ и Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ), США выполнены совместные исследования анизотропии свойств секвойи при комнатной температуре [8]. Вырезка образцов и последующее нагружение были проведены под углами 0 , 30 и 90° к направлению волокон. В условиях одноосной деформации (образец в жесткой обойме) оценена неравномерность радиального расширения образцов с различным направлением вырезки относительно волокон. Обнаружено, что боковое ограничение радиальной деформации образца секвойи замедляет разрушение, подавляя трещины вдоль волокон.

В последнее время ведется интенсивная разработка древесно-полимерных биокomпозитов, использующих в качестве армирующих компонентов натуральные древесные частицы или волокна (хлопок, джут, лен и др.), поскольку синтетические армирующие волокна дороги, их производство энергозатратно и сопровождается негативным воздействием на окружающую среду [46]. В качестве полимерной матрицы может использоваться полипропилен, полиэтилен или эпоксидная смола. Армирующий органический компонент улучшает механические (в первую очередь, прочностные) свойства биокomпозита, причем эти свойства можно регулировать путем изменения вида и объемной доли армирующих компонентов [47–51].

В исследовании [52] рассмотрен высокоэффективный биокomпозит на основе полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), армированного микрочастицами древесины пальмы *Bactris gasipar*, произрастающей в тропических лесах Центральной и Южной Америки, обладающий высокой ударпрочностью и способностью погло-

щать энергию при баллистическом ударе. В качестве контрольного образца выступал чистый (неармированный) ПЭВП, а исследуемые образцы биокомпозита содержали 10, 20, 25 и 30% микрочастиц древесины пальмы в качестве армирующих элементов. Плотность биокомпозитов незначительно отличается друг от друга, поскольку основной вклад вносит плотность полимерной матрицы. Армирование ПЭВП частицами древесины оказывает более выраженное влияние на модуль Юнга, чем на прочность при растяжении. Прочность и жесткость ПЭВП повышаются за счет армирования древесными частицами при их содержании до 25% массы. Однако увеличение содержания древесных частиц до 30 % приводит к снижению, как предела прочности при растяжении, так и модуля Юнга. Уменьшение модуля упругости и прочности биокомпозита при увеличении содержания древесных частиц до 30% происходит, вероятно, из-за слипания частиц, что в результате приводит к недостаточному сцеплению между агломерированными частицами и полимерной матрицей и последующему расслоению композита при механическом нагружении. Для достижения оптимального армирующего эффекта рекомендуемое количество древесных частиц должно составлять 20 и 25 % по массе. При данном содержании армирующих компонентов получена самая высокая баллистическая ударопрочность и лучшие механические характеристики, причем как при квазистатическом растяжении, так и при динамическом сжатии.

Численные модели поведения древесины

Подробный обзор механических свойств и определяющих конститутивных законов для древесины представлен в [36]. Установлено, что высокая плотность, однородная текстура и повышенная влажность древесины приводят к более высокой прочности. В большинстве литературных источников древесина из-за наличия волокон рассматривалась как анизотропный материал. Микрофотографии древесины подтверждают направленную структуру, обеспечивающую анизотропию свойств. В результате проведенных испытаний на сжатие, растяжение, кручение и комбинированную нагрузку было установлено, что твердость, возраст, влажность, качество текстуры и угол нагружения являются основными факторами, определяющими прочность древесины. Эффект динамического воздействия зависит от величины скорости деформации. Несмотря на большое количество исследований свойств древесины, необходимо провести дополнительные исследования по динамическим нагрузкам с более высокой скоростью. Для комплексного структурного анализа должна быть создана подходящая численная модель, чтобы удовлетворить потребностям в инженерных разработках. Хотя к настоящему времени было предложено много различных моделей, ни одна из них не может быть адаптирована для всех существующих требований. Каждая порода древесины требует разработки своей уникальной модели. Имеющиеся модели, как правило, не способны достоверно отражать воздействие таких факторов, как скорость деформации, температура, влажность, структура и направление нагружения. Поэтому данная область открыта для будущих исследований.

В литературе описано множество областей применения древесины, в которых требуются зависящие от скорости деформации конститутивные модели ее поведения при использовании в различных конструкциях, механизмах и изделиях, подвергаемых ударным воздействиям техногенного или природного происхождения. В литературе описано множество областей применения древесины, в которых требуются

зависящие от скорости деформации конститутивные модели ее поведения, для различных конструкций, механизмов и изделий, подвергаемых ударным воздействиям техногенного или природного происхождения. К таким конструкциям могут относиться деревянные самолеты [53], забивные деревянные сваи для береговых сооружений, столбы дорожных ограждений и деревянные дорожные ограждения [54–61], защитные сооружения автобусных остановок от воздействия различных предметов при сильном ураганном ветре [62], ограждающие конструкции конюшен [63], деревянные постройки [64, 23], деревянные поддоны для транспортировки товаров, бейсбольные биты и ручки для рабочих инструментов – все это примеры конструкций, в которых могут возникать средне- и высокоскоростные деформации.

В настоящее время известны две разные группы моделей древесных материалов: микромеханические, моделирующие поведение компонентов клеточной структуры древесины, и континуальные, моделирующие поведение древесины в целом. Для полного понимания механического поведения древесины необходима разработка многомасштабной модели, состоящей из различных масштабных уровней [65].

Одна из самых популярных микромеханических моделей – гексагональная сотовая модель, представленная Гибсоном и Эшби [31]. Другая сотовая микромодель, построенная из шестиугольных ячеек, представлена в статье [65]. Новая микромодель с гексагональными ячейками, предложенная Моденом [66], представляла собой двухфазную сотовую модель, учитывающую разное поведение ранней и поздней древесины с помощью различных относительных плотностей. Результаты такой двухфазной модели оказались значительно более точными, чем результаты, полученные с помощью однофазной модели.

Также существуют микромодели, учитывающие структуру клеточной стенки с микрофибриллами. Е. Сааведра Флорес установил [67], что наиболее важным параметром, контролирующим баланс между жесткостью и гибкостью деревьев, является угол микрофибрилл. С помощью трехуровневой модели клеточных стенок он изучил деформирование древесины в циклах нагрузки-разгрузки, что позволило понять механизм повышения ее жесткости при уменьшении угла микрофибрилл в клеточной стенке.

С. Фортино и др. [68] представили трехмерное конечно-элементное микромоделирование стенки ячеек древесины с использованием пятислойной модели в сочетании с гексагональными ячейками. Было смоделировано два случая различного нагружения: одноосное сжатие и сочетание сжатия и сдвига. Затем они сравнили численные результаты с экспериментальными результатами для европейской ели. Расчетные и экспериментальные формы кривых деформации качественно совпали, а формы деформации имели схожий отклик на изменение режима нагружения.

Для моделирования поведения древесины в программном комплексе LS-DYNA предложена модель MAT_WOOD, описание которой приведено в [69–71].

В рамках указанной модели учитывается:

- трансверсально-изотропное поведение материала,
- необратимое деформирование материала,
- деформационное упрочнение материала,
- изменение свойств и разрушение материала в рамках теории повреждаемой среды,
- возможность влияния скорости деформации на характеристики прочности.

Модель MAT_WOOD включает предопределенный набор параметров для двух

хвойных пород древесины: желтой сосны (yellow pine) и Дугласской ели (Douglas fir). Имеющиеся в модели параметры для заданного значения влажности, температуры и «качества» древесины позволяют успешно моделировать практически все динамическое эффекты.

В [71] рассмотрены теоретические основы модели MAT_WOOD. Отмечается достаточное разнообразие свойств древесины. Прочностные и жесткостные показатели древесины отличаются для продольного, радиального и тангенциального направлений нагружения. Отмечается, что различия прочностных и деформативных свойств в радиальном и тангенциальном направлениях являются несущественными, поэтому поведение древесины при моделировании, как правило, описывается трансверсально-изотропной моделью, а для классификации направлений используют термины «параллельное» и «перпендикулярное».

Характерные параметры, с помощью которых было аппроксимировано поведение древесины при сжатии до больших степеней деформации, получены в результате цикла статических и динамических испытаний древесины на сжатие при трех направлениях ортотропии L, R и T [72]. На рис. 14 представлены экспериментальная и аппроксимационная диаграммы деформирования при нагружении древесины вдоль волокон. Эмпирические закономерности получены на основании экспериментов на одноосное статическое и динамическое сжатие. Полученные эмпирические закономерности использовались в модели древесины (WOOD MODEL), которую авторы создали на основании сотовой модели (Honeycomb) и внедрили ее в стандартный конечный элемент код LS-DYNA.

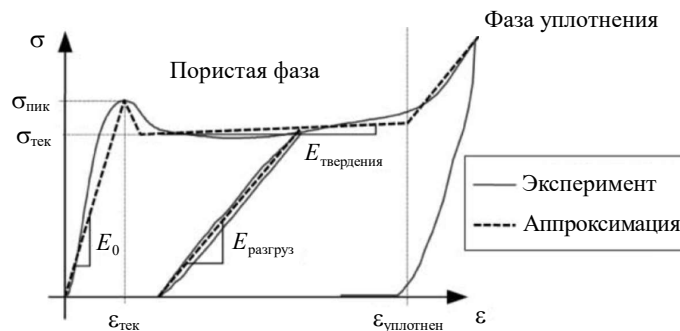


Рис. 14. Экспериментальная кривая напряжение–деформация и ее аппроксимация при продольном сжатии

Авторы рассмотрели другие используемые для древесины численные модели:

- упругопластическую модель, для которой поведение древесины является изотропным, с постоянным объемом в пластической стадии и с неадекватным влиянием скорости деформации, что противоречит реальному поведению древесины при больших деформациях сжатия;
- пенопластовую модель, для которой поведение является изотропным с пластичностью по Мизесу и с неадекватным влиянием скорости деформации, что также противоречит реальному поведению древесины при больших деформациях сжатия;
- сотовую модель, для которой поведение очень похоже на реальное поведение древесины, но с некоторыми особенностями: недостаточное влияние скорости деформации и необходимость определения слишком большого количества механических экспериментальных данных (кривая напряжение–деформация для каждого

направления ортотропии, начальные механические упругие характеристики). Сравнение этих численных моделей с WOOD MODEL оказалось в пользу последней.

Подводя итог анализу поведения древесины, можно сделать вывод, что вследствие сложности структуры древесины для ее достоверного описания численной моделью необходимы сложные модели, учитывающие влияние не только температуры, скорости деформации и вида напряженно-деформированного состояния, но и угла между направлением нагружения и направлением волокон древесины.

Заключение

По результатам проведенного обзора статей, посвященных исследованиям динамического поведения различных пород древесины можно сделать следующие выводы.

Причинами наличия эффектов внутреннего трения в древесине являются области лигнина, а также целлюлозные микрофибриллы, по своей структуре подобные кристаллическим телам, что обуславливает вязкоупругое поведение (внутреннее демпфирование) древесины. Рекомендовано выбирать древесину с низким углом микрофибрилл для улучшения ее демпфирующих свойств.

Динамическую диаграмму древесины при сжатии можно рассматривать, как состоящую из трех последовательных компонентов: начальной упругой области, области текучести и области уплотнения. Модуль Юнга и прочность древесины значительно больше в продольном направлении, чем в радиальном и тангенциальном направлениях. Большое влияние на прочностные свойства древесины оказывают скорость деформации, влажность и температура.

Вследствие сложности структуры древесины для ее достоверного описания численной моделью необходимы сложные модели, учитывающие влияние не только температуры, скорости деформации и вида напряженно-деформированного состояния, но и угла между направлением нагружения и направлением волокон древесины.

Список литературы

1. Adalian C., Morlier P. Modeling the behaviour of wood during the crash of a cask impact limiter. *PATRAM'98: Conference Proceedings*. Paris, France. 1998. Vol. 1. P. 261–268.
2. Neumann M. Investigation of the behavior of shock-absorbing structural parts of transport casks holding radioactive substances in terms of design testing and risk analysis. *Doctor of Engineering Sciences*. Wuppertal. 2009. 220 p.
3. Eisenacher G., Scheidemann R., Neumann M., Wille F., Droste B. Crushing characteristics of spruce wood used in impact limiters of type B packages. *Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013*. San Francisco, USA. 18–23 Aug. 2013. P. 1–10. DOI: 10.13140/2.1.1684.3528.
4. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Skurikhin S.G. Numerical simulations of dynamic deformation of air transport package PAT-2 in accidental impacts. *Proceedings of 9th International LS-DYNA Users Conference*. Dearborn, USA. 4–6 Jun. 2006. P. 43–51.
5. Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С., Спиридонов В.Ф., Цибереv К.В. Численный анализ ударопрочности и термостойкости авиационного контейнера ПАТ-2. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №1. С. 101–111. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-1-101-111>.
6. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*. Specific safety requirements. No SSR-6. Safety standards series. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2012. 165 p.
7. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *Journal de Physique IV*. 1997. Vol. 7. P. 487–492.

8. Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N., Gray III G.T. Investigation of wood anisotropy under dynamic loading. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №4. С. 555–565. DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-555-565 (In English).
9. Ломунов А.К., Южина Т.Н., Крушка Л., Чен В. Деформирование и разрушение липы и сосны при интенсивных динамических воздействиях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №1. С. 43–51. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-1-43-51>.
10. Брагов А.М., Ломунов А.К., Южина Т.Н. Влияние вида напряженно-деформированного состояния на динамическую сжимаемость березы. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №3. С. 269–282. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-3-269-282.
11. Bragov A.M., Gonov M.E., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Iuzhina T.N. Deformation and destruction at deformation rate of order 10^3 s^{-1} wood of hardwood trees. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials*. Eds. B.E. Abali, I. Giorgio. 2020. Vol. 130. P. 443–454. DOI: 10.1007/978-3-030-50460-1_26.
12. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Dynamic compressibility of birch under various types of stress-strain state. In: *Multiscale Solid Mechanics – Advanced Structured Materials*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, L.A. Igumnov. 2020. Vol. 141. P. 69–80. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_7.
13. Bragov A., Igumnov L., dell'Isola F., Konstantinov A., Lomunov A., Iuzhina T. Dynamic testing of lime-tree (*Tilia Europoea*) and pine (*Pinaceae*) for wood model identification. *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 22. P. 5261–1 – 5261–12. DOI: 10.3390/ma13225261.
14. Abe H., Ohtani J., Fukazawa K. Fe-Sem observations on the microfibrillar orientation in the secondary wall of tracheids. *IAWA Journal*. 1991. Vol. 12 (4). P. 431–438. DOI: 10.1163/22941932-90000546.
15. Boutelje J.B. Relationship of structure to transverse anisotropy in wood with reference to shrinkage and elasticity. *Holzforschung*. 1962. Bd. 16. Heft 2. P. 33–46. DOI: 10.1515/hfsg.1962.16.2.33.
16. Watanabe U., Fujita M., Norimoto M. Transverse Young's moduli and cell shapes in coniferous early wood. *Holzforschung*. 2002. Vol. 56. Iss. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.001>.
17. Cramer S., Kretschmann D., Lakes R., Schmidt T. Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine. *Holzforschung*. 2005. Vol. 59(5). P. 531–538.
18. Oscarsson J., Olsson A., Enquist B. Strain fields around knots in Norway spruce specimens exposed to tensile forces. *Wood Science and Technology*. 2012. Vol. 46. Iss. 4. P. 593–610. DOI: 10.1007/s00226-011-0429-8.
19. Jernkvist L.O., Thuvander F. Experimental determination of changes in tree ring stiffness in Picea abies. *Holzforschung*. 2001. Vol. 55. Iss. 3. P. 309–317. DOI: 10.1515/HF.2001.051.
20. Eder M., Jungnikl K., Burgert I. A close-up view of wood structure and properties across a growth ring of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Trees. Structure and Function*. 2009. Vol. 23. Iss. 1. P. 79–84. DOI: 10.1007/s00468-008-0256-1.
21. Hickey K.L., Rudie A.W. Preferential energy absorption by earlywood in cyclic compression of Loblolly pine. *International Mechanical Pulping Conference*. Oslo, Norway. June 15–17. 1993. P. 81–86.
22. Wennerblom M., Olsson A., Salmen L. Softening properties of earlywood and latewood of spruce. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 1996. Vol. 11. Iss. 4. P. 279–280. <https://doi.org/10.3183/npprj-1996-11-04-p279-280>.
23. Tabarsa T., Chui Y.H. Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction. *Wood and Fiber Science*. 2001. Vol. 33(2). P. 223–232.
24. Law K.N., Kokta B.V., Mao C. Compression properties of wood and fibre failures. *Journal of Pulp and Paper Science*. 2006. Vol. 32. Iss. 4. P. 224–230.
25. Müller U., Gindl W., Teischinger A. Effects of cell anatomy on the plastic and elastic behaviour of different wood species loaded perpendicular to grain. *IAWA Journal*. 2003. Vol. 24. Iss. 2. P. 117–128. DOI: 10.1163/22941932-90000325.
26. Widehammar S. Stress-strain relationships for spruce wood: Influence of strain rate,

- moisture content and loading direction. *Experimental Mechanics*. 2004. Vol. 44. Iss. 1. P. 44–48. DOI: 10.1007/BF02427975.
27. Uhmeier A., Salmen L. Repeated large radial compression of heated spruce. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 1996. Vol. 11. Iss. 3. P. 171–176. <https://doi.org/10.3183/nppri-1996-11-03-p171-176>.
28. Reid S.R., Reddy T.Y., Peng C. Dynamic compression of cellular structures and materials. *Proceedings of the III International Symposium on Structural Crashworthiness*. University of Liverpool, England. 14–16 Apr. 1993. London: CRC Press, 1993. P. 257–294. <https://doi.org/10.1201/9781482262544>.
29. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1997. Vol. 19. Iss. 5-6. P. 531–570. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00016-X.
30. Harrigan J.J., Reid S.R., Tan P.J., Reddy T.Y. High rate crushing of wood along the grain. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Iss. 4-5. P. 521–544. DOI: 10.1016/j.ijmesci.2004.12.013.
31. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids. Structure and Properties*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 510 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>.
32. Большаков А.П., Балакшина М.А., Гердюков Н.Н. и др. Демпфирующие свойства секвойи, березы, сосны и осины при ударном нагружении. *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42. №2. С. 1–10.
33. Buchar J., Adamik V. Wood strength evaluation under impact loading. *39th International Conference Experimental Stress Analysis*. Tabor, Czech Republic. 4–6 Jun. 2001.
34. Buchar J., Krivanek I., Severa L. High rate behaviour of wood. In: *New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. Trends in Mechanics of Materials*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. Warsaw, 2001. P. 357–362.
35. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2012. Vol. 48. Iss. 2. P. 101–107. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2010.00802.x.
36. Zhao S., Zhao J.X., Han G.Z. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research. *IOP Conferenve Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 137. Article No 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/137/1/012036.
37. Gilbertson C.G. Dynamic properties of wood using the Split-Hopkinson pressure bar. *Doctor of Philosophy in Civil Engineering (PhD). Dissertation*. Michigan Technological University, USA. 2011. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etd-restricted/9>.
38. Riggio M., Sandak J., Sandak A., Pauliny D., Babinski L. Analysis and prediction of selected mechanical/dynamic properties of wood after short and long-term waterlogging. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 444–454. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.085.
39. Backman A.C., Lindberg H. Difference in wood material responses for radial and tangential direction as measured by dynamic mechanical thermal analysis. *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. No 15. P. 3777–3783. DOI: 10.1023/A:1017986119559.
40. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Coutellier D., Morvan H. Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities – Part A: Experimental investigations. *Composite Structures*. 2016. Vol. 149. P. 315–328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.058.
41. Vural M., Ravichandran G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2003. Vol. 40. Iss. 9. P. 2147–2170. DOI: 10.1016/s0020-7683(03)00057-x.
42. Tagarielli V.L., Deshpande V.S., Fleck N.A. The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood. *Composites Part B Engineering*. 2008. Vol. 39. Iss. 1. P. 83–91. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.02.005.
43. Sebek F., Kubik P., Brabec M., Tippner J. Modelling of impact behaviour of European beech subjected to split Hopkinson pressure bar test. *Composite Structures*. 2020. Vol. 245. Article No 112330. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112330.
44. Gomes F., Xavier J., Koerber H. High strain rate compressive behaviour of wood on the transverse plane. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 17. P. 900–905. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.120.

45. Zhou S.C., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of Douglas fir and glulam. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 58. Article No 119466.
46. Fortin-Smith J., Sherwood J., Drane P., Kretschmann D. Characterization of maple and ash material properties as a function of wood density for bat/ball impact modeling in LS-DYNA. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 147. P. 413–418. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.331.
47. Ratna Prasad A.V., Mohana Rao K. Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: jowar, sisal and bamboo. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. Iss. 8-9. P. 4658–4663. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.015>.
48. Dai D., Fan M. Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. In: *Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Properties*. Eds. A. Hodzic, R. Shank. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. Vol. 1. P. 3–65. DOI: 10.1533/9780857099228.1.3.
49. Nabi Saheb D., Jog J.P. Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology*. 1999. Vol. 18. Iss. 4. P. 351–363. DOI: 10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X.
50. Stokke D., Wu Q., Han G., Stevens C.V. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*. Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd., 2013. 314 p.
51. La Mantia F.P., Morreale M. Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42. Iss. 6. P. 579–588. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.01.017.
52. Haro E.E., Szpunar J.A., Odeshi A.G. Dynamic and ballistic impact behavior of bio-composite armors made of HDPE reinforced with chonta palm wood (*Bactris gasipaes*) microparticles. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14. Iss. 3. P. 238–249. DOI: 10.1016/j.dt.2018.03.005.
53. Liska J.A. Effect of rapid loading on the compressive and flexural strength of wood. *Report No 1767*. USDA for Forest Products Laboratory. Madison, WI, USA, 1950. 78 p. <http://hdl.handle.net/1957/1954>.
54. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1986. Vol. 4. Iss. 3. P. 161–174. DOI: 10.1016/0734-743x(86)90003-5.
55. Gatchell C., Michie J. Pendulum impact tests of wooden and steel highway guardrail posts. *USDA for Service Research Paper NE-311*. Upper Darby, PA, USA. 1974. 20 p.
56. Leijten A.J.M. Literature review of impact strength of timber and joints. *WCTE 2000: World Conference on Timber Engineering*. Whistler Resort, British Columbia, Canada. 31 Jul. – 3 Aug. 2000. Paper 9.2.3.
57. Bocchio N., Ronca P., van de Kuilen J-W. Impact loading tests on timber beams. *IABSE Conference: Innovative Wooden Structures and Bridges*. Lahti, Finland. 29–31 Aug. 2001. P. 349–354. DOI: 10.2749/222137801796348818.
58. Botting J.K. Development of an FRP reinforced hardwood glulam guardrail. *Thesis for the Degree of Master of Science (in Mechanical Engineering)*. University of Maine, Orono, ME, USA. 2003. 122 p.
59. Kubojima Y., Ohsaki H., Kato H., Tonosaki M. Fixed-fixed flexural vibration testing method of beams for timber guardrails. *Journal of Wood Science*. 2006. Vol. 52. P. 202–207. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0754-3>.
60. Gutkowski R.M., Shigidi A., Abdallah M.T., Peterson M.L. Dynamic impact load tests of a bridge guardrail system. *MPC Report No 07-188*. Fargo, ND, USA: Mountain-Plains Consortium, 2007. 37 p.
61. Polocoser T., Stöckel F., Kasal B. Low-velocity transverse impact of small, clear spruce and pine specimens with additional energy absorbing treatments. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016. Vol. 28. Iss. 8. P. 04016048–1–04016048–10. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001545.
62. Turnbull-Grimes C., Charlie W.A., Gutkowski R.M., Balogh J. Bus-stop shelters-improved safety. *Report for North Dakota State University*. Fargo, North Dakota, USA. 2010. 79 p.
63. Benthien J.T., Georg H., Maikowski S. et al. Infill planks for horse stable constructions:

Thoughts about kick resistance determination and alternative material development. *Landbauforschung Volkenrode*. 2012. Vol. 62. Iss. 4. P. 255–262.

64. Kasal B., Guindos P., Polocoser T., Heiduschke A., Urushadze S., Pospisil S. Heavy laminated timber frames with rigid three-dimensional beam-to-column connections. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2014. Vol. 28. Iss. 6. P. A4014014–1 – A4014014–11. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000594.

65. Mishnaevsky Jr. L., Qing H. Micromechanical modelling of mechanical behaviour and strength of wood: State-of-the-art review. *Computational Materials Science*. 2008. Vol. 44. Iss. 2. P. 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.03.043>.

66. Moden C.S. A two-phase annual ring model of transverse anisotropy in softwoods. *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68. Iss. 14. P. 3020–3026. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.022>.

67. Saavedra Flores E.I., De Souza Neto E.A., Pearce C. A large strain computational multi-scale model for the dissipative behaviour of wood cell-wall. *Computational Materials Science*. 2011. Vol. 50. Iss. 3. P. 1202–1211. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.11.023>.

68. Fortino S., Hradil P., Salminen L., De Magistris F. A 3D micromechanical study of deformation curves and cell wall stresses in wood under transverse loading. *Journal of Materials Science*. 2015. Vol. 50. Iss. 1. P. 482–492. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8608-2>.

69. *LS-DYNA Keyword User's Manual*. Vol. 2. Version 960. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2001. 575 p.

70. Murray Y.D. Manual for LS-DYNA wood material model 143. *Report No. FHWAHRT-04-097*. Federal Highway Administration, 2004. 166 p.

71. Murray Y.D., Reid J.D., Faller R.K., Bielenberg B.W., Paulsen T.J. Evaluation of LS-DYNA wood material model 143. *Report No FHWA-HRT-04-096*. Federal Highway Administration, 2005. 155 p.

72. Adalian C., Morlier P. “WOOD MODEL” for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2002. Vol. 60. Iss. 6. P. 433–439. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0333-x>.

References

1. Adalian C., Morlier P. Modeling the behaviour of wood during the crash of a cask impact limiter. *PATRAM'98: Conference Proceedings*. Paris, France. 1998. Vol. 1. P. 261–268.

2. Neumann M. Investigation of the behavior of shock-absorbing structural parts of transport casks holding radioactive substances in terms of design testing and risk analysis. *Doctor of Engineering Sciences*. Wuppertal. 2009. 220 p.

3. Eisenacher G., Scheidemann R., Neumann M., Wille F., Droste B. Crushing characteristics of spruce wood used in impact limiters of type B packages. *Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013*. San Francisco, USA. 18–23 Aug. 2013. P. 1–10. DOI: 10.13140/2.1.1684.3528.

4. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Skurikhin S.G. Numerical simulations of dynamic deformation of air transport package PAT-2 in accidental impacts. *Proceedings of 9th International LS-DYNA Users Conference*. Dearborn, USA. 4–6 Jun. 2006. P. 43–51.

5. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V. Chislennyy analiz udaroprochnosti i termostoykosti aviatsionnogo konteynera RAT-2 [Numerical analysis of impact and thermal resistances of air transport package PAT-2]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 1. P. 101–111 (In Russian).

6. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*. Specific safety requirements. No SSR-6. Safety standards series. Vienna, Austria. International Atomic Energy Agency. 2012. 165 p.

7. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *J. Phys. IV*. 1997. Vol. 7. P. 487–492.

8. Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N., Gray III G.T. Investigation of wood anisotropy under dynamic loading. *Problems of Strength and Plasticity*. 2018. Vol. 80. No 4. P. 555–565. DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-555-565.

9. Lomunov A.K., Yuzhina T.N., Krushka L., Chen V. Deformirovanie i razrushenie lipy i sosny pri intensivnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh [Deforming and fracture of linden and pine under intensive dynamic impacts]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 1. P. 43–51 (In Russian).
10. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Vliyanie vida napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na dinamicheskuyu szhimaemost berezy [Dynamic compressibility of birch at different types of stress-strained state]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 3. P. 269–282 (In Russian).
11. Bragov A.M., Gonov M.E., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Iuzhina T.N. Deformation and destruction at deformation rate of order 10^3 s^{-1} wood of hardwood trees. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials*. Eds. B.E. Abali, I. Giorgio. 2020. Vol 130. P. 443–454. DOI: 10.1007/978-3-030-50460-1_26.
12. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Dynamic compressibility of birch under various types of stress-strain state. In: *Multiscale Solid Mechanics – Advanced Structured Materials*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, L.A. Igumnov. 2020. Vol. 141. P. 69–80. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_7.
13. Bragov A., Igumnov L., dell'Isola F., Konstantinov A., Lomunov A., Iuzhina T. Dynamic testing of lime-tree (*Tilia Europoea*) and pine (*Pinaceae*) for wood model identification. *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 22. P. 5261–1 – 5261–12. DOI: 10.3390/ma13225261.
14. Abe H., Ohtani J., Fukazawa K. Fe-Sem observations on the microfibrillar orientation in the secondary wall of tracheids. *IAWA Journal*. 1991. Vol. 12 (4). P. 431–438. DOI: 10.1163/22941932-90000546.
15. Boutelje J.B. Relationship of structure to transverse anisotropy in wood with reference to shrinkage and elasticity. *Holzforschung*. 1962. Bd. 16. Heft 2. P. 33–46. DOI: 10.1515/hfsg.1962.16.2.33.
16. Watanabe U., Fujita M., Norimoto M. Transverse Young's moduli and cell shapes in coniferous early wood. *Holzforschung*. 2002. Vol. 56. Iss. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.001>.
17. Cramer S., Kretschmann D., Lakes R., Schmidt T. Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine. *Holzforschung*. 2005. Vol. 59(5). P. 531–538.
18. Oscarsson J., Olsson A., Enquist B. Strain fields around knots in Norway spruce specimens exposed to tensile forces. *Wood Sci. Technol.* 2012. Vol. 46. Iss. 4. P. 593–610. DOI: 10.1007/s00226-011-0429-8.
19. Jernkvist L.O., Thuvander F. Experimental determination of changes in tree ring stiffness in *Picea abies*. *Holzforschung*. 2001. Vol. 55. Iss. 3. P. 309–317. DOI: 10.1515/HF.2001.051.
20. Eder M., Jungnickl K., Burgert I. A close-up view of wood structure and properties across a growth ring of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Trees. Structure and Function*. 2009. Vol. 23. Iss. 1. P. 79–84. DOI: 10.1007/s00468-008-0256-1.
21. Hickey K.L., Rudie A.W. Preferential energy absorption by earlywood in cyclic compression of Loblolly pine. *International Mechanical Pulping Conference*. Oslo, Norway. June 15–17. 1993. P. 81–86.
22. Wennerblom M., Olsson A., Salmen L. Softening properties of earlywood and latewood of spruce. *Nord. Pulp Paper Res. J.* 1996. Vol. 11. Iss. 4. P. 279–280. <https://doi.org/10.3183/npprj-1996-11-04-p279-280>.
23. Tabarsa T., Chui Y.H. Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction. *Wood Fiber Sci.* 2001. Vol. 33(2). P. 223–232.
24. Law K.N., Kokta B.V., Mao C. Compression properties of wood and fibre failures. *J. Pulp Pap. Sci.* 2006. Vol. 32. Iss. 4. P. 224–230.
25. Müller U., Gindl W., Teischinger A. Effects of cell anatomy on the plastic and elastic behaviour of different wood species loaded perpendicular to grain. *IAWA Journal*. 2003. Vol. 24. Iss. 2. P. 117–128. DOI: 10.1163/22941932-90000325.
26. Widehammar S. Stress-strain relationships for spruce wood: Influence of strain rate, moisture content and loading direction. *Experimental Mechanics*. 2004. Vol. 44. Iss. 1. P. 44–48. DOI: 10.1007/BF02427975.

27. Uhmeier A., Salmen L. Repeated large radial compression of heated spruce. *Nord. Pulp Paper Res. J.* 1996. Vol. 11. Iss. 3. P. 171–176. <https://doi.org/10.3183/npprj-1996-11-03-p171-176>.
28. Reid S.R., Reddy T.Y., Peng C. Dynamic compression of cellular structures and materials. *Proceedings of the III International Symposium on Structural Crashworthiness*. University of Liverpool, England. 14–16 Apr. 1993. London. CRC Press. 1993. P. 257–294. <https://doi.org/10.1201/9781482262544>.
29. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *Int. J. Impact Eng.* 1997. Vol. 19. Iss. 5-6. P. 531–570. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00016-X.
30. Harrigan J.J., Reid S.R., Tan P.J., Reddy T.Y. High rate crushing of wood along the grain. *Int. J. Mech. Sci.* 2005. Vol. 47. Iss. 4-5. P. 521–544. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2004.12.013.
31. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids. Structure and Properties*. Cambridge. Cambridge University Press. 1997. 510 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>.
32. Bol'shakov A.P., Balakshina M.A., Gerdyukov N.N. et al. Damping properties of sequoia, birch, pine, and aspen under shock loading. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2001. Vol. 42. No 2. P. 202–210.
33. Buchar J., Adamik V. Wood strength evaluation under impact loading. *39th International Conference Experimental Stress Analysis*. Tabor, Czech Republic. 4–6 Jun. 2001.
34. Buchar J., Krivanek I., Severa L. High rate behaviour of wood. In: *New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. Trends in Mechanics of Materials*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. Warsaw. 2001. P. 357–362.
35. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2012. Vol. 48. Iss. 2. P. 101–107. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2010.00802.x.
36. Zhao S., Zhao J.X., Han G.Z. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research. *IOP Conferenve Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 137. Article No 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/137/1/012036.
37. Gilbertson C.G. Dynamic properties of wood using the Split-Hopkinson pressure bar. *Doctor of Philosophy in Civil Engineering (PhD). Dissertation*. Michigan Technological University, USA. 2011. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etd-restricted/9>.
38. Riggio M., Sandak J., Sandak A., Pauliny D., Babinski L. Analysis and prediction of selected mechanical/dynamic properties of wood after short and long-term waterlogging. *Constr. Build. Mater.* 2014. Vol. 68. P. 444–454. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.
39. Backman A.C., Lindberg H. Difference in wood material responses for radial and tangential direction as measured by dynamic mechanical thermal analysis. *J. Mater. Sci.* 2001. Vol. 36. No 15. P. 3 777–3783. DOI: 10.1023/A:1017986119559.
40. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Coutellier D., Morvan H. Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities – Part A: Experimental investigations. *Compos. Struct.* 2016. Vol. 149. P. 315–328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.058.
41. Vural M., Ravichandran G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis. *Int. J. Solids Struct.* 2003. Vol. 40. Iss. 9. P. 2147–2170. DOI: 10.1016/s0020-7683(03)00057-x.
42. Tagarielli V.L., Deshpande V.S., Fleck N.A. The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood. *Compos. B Eng.* 2008. Vol. 39. Iss. 1. P. 83–91. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.02.005.
43. Sebek F., Kubik P., Brabec M., Tippner J. Modelling of impact behaviour of European beech subjected to split Hopkinson pressure bar test. *Compos. Struct.* 2020. Vol. 245. Article No 112330. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112330.
44. Gomes F., Xavier J., Koerber H. High strain rate compressive behaviour of wood on the transverse plane. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 17. P. 900–905. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.120.
45. Zhou S.C., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of Douglas fir and glubam. *Constr. Build. Mater.* 2020. Vol. 58. Article No 119466.
46. Fortin-Smith J., Sherwood J., Drane P., Kretschmann D. Characterization of maple and ash material properties as a function of wood density for bat/ball impact modeling in LS-DYNA. *Procedia Eng.* 2016. Vol. 147. P. 413–418. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.331.

47. Ratna Prasad A.V., Mohana Rao K. Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: jowar, sisal and bamboo. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. Iss. 8-9. P. 4658–4663. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.015>.
48. Dai D., Fan M. Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. In: *Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Properties*. Eds. A. Hodzic, R. Shank. Cambridge. Woodhead Publishing. 2014. Vol. 1. P. 3–65. DOI: 10.1533/9780857099228.1.3.
49. Nabi Saheb D., Jog J.P. Natural fiber polymer composites: A review. *Adv. Polym. Technol.* 1999. Vol. 18. Iss. 4. P. 351–363. DOI: 10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X.
50. Stokke D., Wu Q., Han G., Stevens C.V. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*. Chichester, England. John Wiley and Sons Ltd. 2013. 314 p.
51. La Mantia F.P., Morreale M. Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42. Iss. 6. P. 579–588. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.01.017.
52. Haro E.E., Szpunar J.A., Odeshi A.G. Dynamic and ballistic impact behavior of bio-composite armors made of HDPE reinforced with chonta palm wood (*Bactris gasipaes*) microparticles. *Def. Technol.* 2018. Vol. 14. Iss. 3. P. 238–249. DOI: 10.1016/j.dt.2018.03.005.
53. Liska J.A. Effect of rapid loading on the compressive and flexural strength of wood. *Report No 1767*. USDA for Forest Products Laboratory. Madison, WI, USA. 1950. 78 p. <http://hdl.handle.net/1957/1954>.
54. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1986. Vol. 4. Iss. 3. P. 161–174. DOI: 10.1016/0734-743x(86)90003-5.
55. Gatchell C., Michie J. Pendulum impact tests of wooden and steel highway guardrail posts. *USDA for Service Research Paper NE-311*. Upper Darby, PA, USA. 1974. 20 p.
56. Leijten A.J.M. Literature review of impact strength of timber and joints. *WCTE 2000: World Conference on Timber Engineering*. Whistler Resort, British Columbia, Canada. 31 Jul. – 3 Aug. 2000. Paper 9.2.3.
57. Bocchio N., Ronca P., van de Kuilen J-W. Impact loading tests on timber beams. *IABSE Conference: Innovative Wooden Structures and Bridges*. Lahti, Finland. 29–31 Aug. 2001. P. 349–354. DOI: 10.2749/222137801796348818.
58. Botting J.K. Development of an FRP reinforced hardwood glulam guardrail. *Thesis for the Degree of Master of Science (in Mechanical Engineering)*. University of Maine, Orono, ME, USA. 2003. 122 p.
59. Kubojima Y., Ohsaki H., Kato H., Tonosaki M. Fixed-fixed flexural vibration testing method of beams for timber guardrails. *J. Wood Sci.* 2006. Vol. 52. P. 202–207. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0754-3>.
60. Gutkowski R.M., Shigidi A., Abdallah M.T., Peterson M.L. Dynamic impact load tests of a bridge guardrail system. *MPC Report No 07-188*. Fargo, ND, USA. Mountain-Plains Consortium. 2007. 37 p.
61. Polocoser T., Stöckel F., Kasal B. Low-velocity transverse impact of small, clear spruce and pine specimens with additional energy absorbing treatments. *J. Mater. Civ. Eng.* 2016. Vol. 28. Iss. 8. P. 04016048–1–04016048–10. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001545.
62. Turnbull-Grimes C., Charlie W.A., Gutkowski R.M., Balogh J. Bus-stop shelters-improved safety. *Report for North Dakota State University*. Fargo, North Dakota, USA. 2010. 79 p.
63. Benthien J.T., Georg H., Maikowski S. et al. Infill planks for horse stable constructions: Thoughts about kick resistance determination and alternative material development. *Landbauforschung Volkenrode*. 2012. Vol. 62. Iss. 4. P. 255–262.
64. Kasal B., Guindos P., Polocoser T., Heiduschke A., Urushadze S., Pospisil S. Heavy laminated timber frames with rigid three-dimensional beam-to-column connections. *J. Perform. Constr. Facil.* 2014. Vol. 28. Iss. 6. P. A4014014–1–A4014014–11. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000594.
65. Mishnaevsky Jr. L., Qing H. Micromechanical modelling of mechanical behaviour and

strength of wood: State-of-the-art review. *Comput. Mater. Sci.* 2008. Vol. 44. Iss. 2. P. 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.03.043>.

66. Moden C.S. A two-phase annual ring model of transverse anisotropy in softwoods. *Compos. Sci. Technol.* 2008. Vol. 68. Iss. 14. P. 3020–3026. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.022>.

67. Saavedra Flores E.I., De Souza Neto E.A., Pearce C. A large strain computational multi-scale model for the dissipative behaviour of wood cell-wall. *Comput. Mater. Sci.* 2011. Vol. 50. Iss. 3. P. 1202–1211. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.11.023>.

68. Fortino S., Hradil P., Salminen L., De Magistris F. A 3D micromechanical study of deformation curves and cell wall stresses in wood under transverse loading. *J. Mater. Sci.* 2015. Vol. 50. Iss. 1. P. 482–492. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8608-2>.

69. *LS-DYNA Keyword User's Manual*. Vol. 2. Version 960. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation. 2001. 575 p.

70. Murray Y.D. Manual for LS-DYNA wood material model 143. *Report No. FHWAHRT-04-097*. Federal Highway Administration. 2004. 166 p.

71. Murray Y.D., Reid J.D., Faller R.K., Bielenberg B.W., Paulsen T.J. Evaluation of LS-DYNA wood material model 143. *Report No FHWA-HRT-04-096*. Federal Highway Administration. 2005. 155 p.

72. Adalian C., Morlier P. “WOOD MODEL” for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2002. Vol. 60. Iss. 6. P. 433–439. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0333-x>.

REVIEW OF DYNAMIC PROPERTIES OF WOOD*

Lomunov A.K., Bragov A.M., Gonov M.E., Yuzhina T.N., Krymov N.V.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

lomunov@mech.unn.ru

Received by the Editor 2023/04/13

This review considers the state of the art in the field of theoretical and experimental studies of dynamic deformation and destruction of wood materials. The orthogonal properties of wood, features of early and late wood are considered, the dynamic properties of wood are analyzed, as well as the influence of the strain rate during dynamic compression.

It is noted that wood of different species is mainly used as one of the materials that dampen dynamic loads as a result of impacts or explosions. For example, it can mitigate the effects of high-velocity impacts on the contents of containers during the transport of hazardous materials by air, road and rail.

It has been established that the cause of the effects of internal friction in wood are the areas of lignin, in which bundles of cellulose molecules (microfibrils) with a diameter of 25–30 nm are immersed, which are crystalline in their structure, which leads to viscoelastic behavior – internal damping. To improve the damping properties, it is recommended to choose wood with a low microfibril angle.

It is noted that the stress-strain curve under dynamic compression of wood consists of three separate parts: the initial elastic region, the yield region and the compaction region. The main characteristics of compression, that is, the components of the stress-strain curve and the destruction of the fibers, do not depend on temperature. Young's modulus is much larger in the longitudinal direction than in the radial and tangential directions. The rate of deformation, temperature and humidity have a great influence on the strength properties of wood.

*The analytical study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No 22-19-00138).

The features of the mechanical behavior of the zones of early and late wood in the massif of a tree trunk are considered. Late wood is more rigid than early wood. As a result, differences in the mechanical properties of the wood fibers during compression may cause the early wood fibers to be destroyed while the late wood fibers remain intact.

Due to the complexity of the wood structure, its reliable description by a numerical model requires complex models that take into account not only the influence of temperature, strain rate, and the type of stress-strain state, but also the angle between the direction of loading and the direction of wood fibers. Two main groups of wood material models are considered: micromechanical models simulating the details of the wood structure, and continuum models simulating the behavior of wood as a whole.

Keywords: experiment, dynamic strength, wood, stress, deformation, strain rate, Kolsky method, mathematical model.