МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

На правах рукописи

Thomas -

ЮЖИНА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Константинов Александр Юрьевич

Нижний Новгород – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.		4
1 ЭКСІ	ТЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ	
ДРЕВЕСИ	ІНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	10
1.1 3	Экспериментальные исследования	10
1.1.1	Ортогональные свойства древесины	27
1.1.2	Влияние размера образца при динамических испытаниях	28
1.1.3	Демпфирование (эффекты внутреннего трения)	28
1.1.4	Характеристики древесины при динамическом сжатии	29
1.1.5	Влияние скорости деформации при динамическом сжатии древесины	30
1.1.6	Особенности ранней и поздней древесины	31
1.1.7	Усталость древесины	32
1.1.8	Определение коэффициента Пуассона	34
1.2	Георетические исследования моделирования древесины	36
1.2.1	Микромеханические модели	36
1.2.2	Континуальные модели	38
1.3 H	Зыводы по главе 1	39
2 METO	ОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ДРЕВЕСИН	Ы
при дин	АМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	40
2.1 N	Иетод Кольского и его модификации	40
2.1.1	Классический вариант метода на сжатие	41
2.1.2	Использование модификации метода Кольского для исследования свойств	
матер	иалов при пассивном ограничении радиальной деформации	42
2.1.3	Испытания малоплотных материалов под действием многократного нагружения	43
2.2 J	Цинамический изгиб балок	44
2.3 N	Иетодика определения коэффициента Пуассона	54
2.4 H	Зыводы по главе 2	56
3 ЭКСІ	ІЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	
РАЗЛИЧН	ІЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ	58
3.1 3	Экспериментальная установка и исследуемые образцы	59
3.2 H	езультаты экспериментальных исследований хвойных и лиственных пород	
древеси	ны при сжатии	63
3.2.1	Результаты динамических испытаний березы	64
3.2.2	Результаты динамических испытаний осины	77
3.2.3	Результаты динамических испытаний липы	82

Введение

<u>Актуальность темы исследования.</u> В последние годы возросло количество перевозок отходов ядерной энергетики, компонентов ядерных вооружений, широкого круга токсичных веществ и т.д. Возросли требования к их безопасности при транспортировке. Большое значение имеют расчеты напряженно-деформированного состояния и прочности контейнеров, в которых транспортируются вышеперечисленные материалы. Особую актуальность приобретают проблемы анализа возможных аварийных ситуаций. Подобные ситуации, сопровождающиеся интенсивными динамическими воздействиями, возможны при транспортировке, падении контейнеров, террористических актах, техногенных и природных катастрофах.

В связи с повышением требований обеспечения безопасности окружающей среды становится весьма актуальной и привлекает внимание исследователей проблема создания надежных авиационных контейнеров для воздушной транспортировки радиоактивных материалов [1-5]. Ее сложность обусловлена высокими уровнями воздействий, характерными для авиационной аварии. Так, в соответствии с нормами МАГАТЭ [6] авиаконтейнер 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 °C.

Древесина разных пород деревьев используется в качестве одного из демпфирующих материалов. Она способна смягчить результаты высокоскоростных ударных воздействий, например, на контейнеры и их содержимое (рисунок 1) при перевозке авиационным транспортом.



Рисунок 1. Авиационный контейнер РАТ-2. 1 – наружный тонкостенный стальной корпус; 2 – защитные вкладыши из красного дерева; 3- титановый бюкс; 4 – кленовые вкладыши; 5 – гермосфера из высокопрочной стали с капсулой из нержавеющей стали с ампулой для радиоактивного материала

На сегодняшний день древесину принято считать материалом, свойства которого обладают ортогональной анизотропией. При расчете деревянных конструкций обычно используют приближение трансверсально-изотропного материала, свойства которого различаются вдоль и поперек волокон. Для достоверного расчета поведения контейнеров с подобными демпфирующими материалами при ударных воздействиях необходимы данные по динамическим свойствам древесины, в частности, для численных расчетов необходимы динамические диаграммы деформирования и характеристики прочности различных пород древесины, а также достоверные верифицированные математические модели, описывающие поведение древесины под воздействием ударных нагрузок.

Степень разработанности темы

Древесина по своей структуре является сложным природным композитным клеточным материалом, похожим на сотовые структуры, металлические кольцевые системы, полимерные пены и т.д. Подобные материалы, благодаря своей структуре, обладают хорошей способностью поглощать энергию удара или взрыва [7].

Древесина, обладая относительно малой плотностью при достаточной прочности, применяется уже длительное время в качестве материала, демпфирующего импульсные нагрузки. Подробный исторический обзор использования древесины в этом качестве был дан в 80-х годах прошлого века Джонсоном [8]. Результаты систематических исследований динамических свойств древесины за последние 30 лет приведены в работах S.Reid с соавторами, в которых исследовалось поведение различных пород древесины при скоростях удара до 300 м/с. В работах неоднократно отмечалось, что, несмотря на уникальные качества древесины, данные о ее динамических физико-механических свойствах скудны и противоречивы.

Поскольку механические свойства древесины сильно зависят от места произрастания, её возраста, от места вырезки образца, то получаемые разными авторами результаты могут достаточно сильно отличаться друг от друга. В связи с чем множество зарубежных и ряд отечественных ученых продолжают изучать динамические свойства различных пород древесины. Существенный вклад в развитии данного направления внесли: Большаков А.П., Брагов А.М., Ломунов А.К., Новиков С.А., Константинов А.Ю., Сергеичев И.В., Пушков В.А., Ерофеев В.И., Герасимов С.И., Adalian C., Allazadeh M.R., Ashby M.F., Bjorkqvist T, Buchar J., Engberg B.A., Gilbertson C.G., Gray III G.T., Gutkowski R.M., Johnson W., Kasal B., Kokta B.V., Morlier P., Norimoto M., Obataya E., Peng C., Polocoser T., Reddy T.Y., Reid S.R., Salmen L., Salminen L.I., Severa L., Stockel F., Uhmeier A., Wosu S.N. и многие другие.

<u>Целью диссертационной работы</u> является установление основных закономерностей процессов высокоскоростного деформирования и разрушения некоторых пород древесины с учетом влияния на ее физико-механические характеристики скорости деформации, угла вырезки и вида напряженно-деформированного состояния (НДС). Для достижения поставленной цели были решены следующие <u>основные задачи</u>:

 проведена адаптация существующих экспериментальных комплексов для исследования динамического деформирования и разрушения образцов древесины;

 – разработаны новые схемы испытания для определения механических характеристик древесины в условиях ударного нагружения;

 проведены динамические испытания различных пород древесины с целью получения динамических диаграмм деформирования, предельных прочностных и деформационных характеристик при различных типах испытаний (сжатие при разных вида НДС, изгиб);

 получены и проанализированы зависимости прочностных и деформационных характеристик, а также энергоемкости некоторых пород древесины от скорости деформации и угла вырезки образцов;

осуществлена параметрическая идентификация математической модели поведения сосны из ПК LS-DYNA;

 проведена верификация математической модели, описывающей поведение сосны под действием динамической нагрузки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

 Реализована и апробирована новая схема определения предельной деформации при растяжении перпендикулярно волокнам древесины на базе техники мерных стержней, эксперимента на ударный трехточечный изгиб балки и метода корреляции цифровых изображений;

 Предложена и реализована новая экспериментальная схема для определения коэффициента Пуассона древесины с использованием радиоинтерферометра;

– Проведены обширные экспериментальные исследования динамического деформирования и разрушения нескольких пород древесины при разных видах напряженнодеформированного состояния (одноосное сжатие, сжатие при объемном напряженном состоянии, изгиб) и получены новые данные в виде диаграмм деформирования и характеристик прочности, энергоемкости, а также их зависимостей от скорости деформации и угла вырезки образцов при скоростях деформации $5 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$;

 На основании полученных экспериментальных данных для сосны выполнена идентификация параметров модели MAT_WOOD из ПК LS-DYNA, отвечающих за влияние скорости деформации на прочностные характеристики этого материала;

 Проведена верификация модели динамического поведения сосны с использованием программного комплекса LS-DYNA¹.

Практическая значимость работы заключается в получении экспериментальных данных в виде динамических диаграмм деформирования, предельных прочностных и деформационных характеристик, показателей энергопоглощения некоторых пород древесины, а также верифицированной математической модели поведения сосны, которые востребованы при расчете напряженно-деформированного состояния и прочности надежных и безопасных контейнеров для транспортировки радиоактивных материалов автомобильным, железнодорожным и авиационным транспортом, а также других конструкций и изделий, в которых древесина может выполнять роль демпфирующего материала.

<u>Методология и методы исследования.</u> В диссертационной работе использованы экспериментальные методы исследования динамических свойств древесины, методы математического моделирования и методы численного анализа.

Основу экспериментальных комплексов составили динамические установки, реализующие метод Кольского и его модификации на базе мерных стержней диаметром 20 и 57 мм. В качестве методов измерения использованы методы динамической тензометрии, радиоинтерферометрии корреляции цифровых изображений И метод по данным высокоскоростной видеорегистрации. Для автоматизированной обработки экспериментальных данных², получаемых при использовании метода Кольского, в коллективе соавторов разработан и зарегистрирован программный комплекс. Математическая модель поведения древесины основана на модели трансверсально-изотропного повреждаемого материала, реализованной в программном комплексе LS-DYNA. Численное моделирование выполнено с использованием метода конечного элемента и явной схемы интегрирования уравнений по времени, реализованных в программном комплексе LS-DYNA.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика определения динамических характеристик прочности древесины при трехточечном изгибе с использованием метода корреляции цифровых изображений;

¹ лицензия Customer #244793

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020666341

 Методика определения коэффициента Пуассона на базе радиоинтерферометрического измерения смещений боковой поверхности образца при динамическом нагружении сжатием;

3. Результаты экспериментального исследования динамических свойств нескольких пород древесины в виде динамических диаграмм деформирования, предельных прочностных характеристик, показателей энергопоглощения в зависимости от скорости деформации, угла вырезки, типа испытаний (одноосное напряженное состояние и одноосная деформация, изгиб).

4. Идентифицированная на основе результатов экспериментального исследования динамических свойств сосны и верифицированная с использованием разработанных и реализованных верификационных экспериментов модель динамического поведения сосны из программного комплекса LS-DYNA.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием экспериментального оборудования, основанного современных на И обоснованных методах динамического исследования механических свойств материалов. При проведении каждого испытания проводилась тщательная подготовка образцов и калибровка измерительных систем, применялось параллельное измерение параметров процессов разными методами. Полученные в ходе исследования экспериментальные данные качественно и количественно хорошо согласуются с аналогичными результатами, полученными отечественными и зарубежными авторами. Для численного анализа процессов деформирования использовался известный общепризнанный программный продукт LS-DYNA.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XIV Международной научно-технической конференции «Dynamic of Technical Systems» (Ростов-на-Дону, 2018 г.); Международной конференции «International Conference on Nonlinear Solid Mechanics (ICoNSoM2019)» (Рим, 2019 г.); «The sixteenth international conference on civil, structural & environmental engineering computing» (Riva del Garda, Италия, 2019); XXVI, XXVII Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова (Кременки, 2019, 2020гг.); Международной научной конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса» (Нижний Новгород, 2019, 2020 гг).

<u>Личный вклад автора.</u> Основные результаты диссертационной работы (методические разработки, экспериментальные данные) были получены и опубликованы в соавторстве в

статьях [9-17], в тезисах [18-20], в докладах на конференциях [10, 11, 18-20]. Постановка задач и общее руководство исследованиями принадлежит Константинову А.Ю. Брагову А.М., Ломунову А.К. Помощь и содействие при подготовке и проведении экспериментов оказывали Гонов М.Е., Баландин Вл.Вас., Баландин Вл.Вл.

<u>Диссертационная работа выполнена при поддержке</u> различных фондов, ведомств и государственных программ:

- аналитический обзор, приведенный в главе 1, выполнен при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-19-00283;
- Разработка новых схем динамических испытаний древесины, описанных в главе 2, выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-19-00138;
- Экспериментальное исследование динамического поведения древесины нескольких пород дерева при высокоскоростном сжатии, результаты которого представлены в разделе 3.2, выполнено при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации в рамках Постановления №220 от 09.04.2010 (№14.У26.31.0031 от 05.02.2018);
- Экспериментальное исследование динамического деформирования и разрушения сосны при разных видах напряженно-деформированного состояния (сжатие, изгиб, сжатие в обойме), результаты которого изложены в разделах 3.2.5, 3.3 и 3.4, выполнено за счет гранта РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90226;
- Численное моделирование, идентификация и верификация модели сосны, представленные в главе 4 выполнены при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (внутренний номер H-496-99_2021-2023);

1ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕИССЛЕДОВАНИЯПОВЕДЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В настоящей главе представлены результаты анализа современного состояния в области динамических испытаний некоторых пород древесины при средних и высоких скоростях деформации. Проанализированы различные экспериментальные установки и методы определения динамических свойств, а также выводы, сделанные исследователями относительно различных методов испытаний, вязкости, деформативности и прочности при динамическом разрушении, макромеханических и континуальных моделей.

1.1 Экспериментальные исследования

Физическая реакция древесины на динамическую нагрузку ничем не отличается от других материалов, таких как металлы или жесткие пенопласты. Тем не менее, на протяжении многих лет применение принципов механики удара к испытаниям древесины было весьма ограниченным, и зачастую предпочтение отдавалось эмпирическим подходам, таким как длительные нагрузки. В настоящее время нет единого мнения о модели скорости деформации для древесины при средних и высоких скоростях деформации.

Систематические исследования динамических свойств пяти пород древесины (бальза, сосна, красное дерево, американский дуб и юкка) при скоростях удара до 300 м/с приведены в работах S.Reid с соавторами [21-23]. В этих исследованиях применялся метод прямого удара, в котором для измерения усилий использовался мерный стержень Гопкинсона. Удар наносился либо по образцу, размещенному на торце мерного стержня, либо деревянный образец вместе со снарядом ударял по торцу мерного стержня. Испытания были проведены как в условиях одноосной деформации, так и в условиях одноосного напряженного состояния. Нагружение образцов осуществлялось как вдоль, так и поперек волокон. В результате были получены значения разрушающих напряжений и определена энергия разрушения. Оказалось, что разрушающие динамические напряжения в несколько раз превышают статические значения, и их величина растет с ростом скорости удара. Рост разрушающего напряжения при динамическом воздействии, основываясь на результатах Ашби [24], авторы объяснили влиянием инерционных эффектов на механические свойства на микроуровне. В работах [21, 23] авторы исследований попытались описать наблюдаемые явления с использованием различных модельных представлений диаграмм деформирования и теории ударных волн. Однако, использование теории ударных волн в этом случае является проблематичным, поскольку с одной стороны древесина обладает выраженными вязкими свойствами из-за ее структуры, с другой стороны – в используемых постановках экспериментов формируется очень сложная

волновая картина, связанная с отражениями волн от свободных поверхностей, интерфейсов металл-древесина и, наконец, с третьей стороны – вследствие значительной длины образцов и вязкого характера их поведения, фронт ударной волны сильно размывается. Авторы отметили существенное отличие механических свойств образцов древесины, испытанных вдоль и поперек волокон: прочность вдоль волокон, оказалась на порядок выше, чем поперек.

В работе [22] для изучения динамического поведения древесины были использованы два метода: метод Кольского для скоростей деформации ~ 10^3 с⁻¹ и метод плосковолнового ударного эксперимента при скорости ~ 10^5 с⁻¹. Для сосны, березы и липы с помощью метода Кольского были получены динамические диаграммы при сжатии образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон. Показано, что пиковые значения на диаграммах деформирования, полученные при более высокой скорости, превосходят значения, чем полученные при более низкой скорости деформации. Разрушающие напряжения для образцов вдоль волокон выше, чем поперек, а предельные деформационные характеристики имеют противоположную тенденцию. В плосковолновых экспериментах на тонких образцах-пластинах сосны и березы были получены ударные адиабаты, которые в осях "скорость ударной волны D – массовая скорость U" описываются, как и для большинства материалов, линейным соотношением D=A+BU, где A и B – константы, которые были определены по результатам плосковолновых экспериментов.

Большой объем динамических испытаний секвойи, березы, сосны и осины был выполнен С.А.Новиковым с сотрудниками [25]. Цилиндрические образцы секвойи и березы диаметром и высотой по 25 мм вырезались под углами 0°, 5°, 10°, 15°, 30°, 45° и 90° относительно направления волокон и испытывались на одноосное сжатие по методу Кольского при температурах -30°C, +20°C и +65°C при фиксированной влажности ω =6-7%. Поскольку для нагружения разрезного стержня Гопкинсона использовалось жидкое взрывчатое вещество (ВВ), скорость нагружения образца определялась косвенно (по максимальному развиваемому напряжению) и составила около 10 м/с. Было показано, что прочность обеих пород древесины при поперечном сжатии на порядок меньше, чем при продольном. Прочность секвойи при влажности ω ≈7% оказалась практически независимой ни от температуры, ни от скорости деформации.

При скорости удара до 13 м/с методом динамической осадки на копре с падающим грузом авторами определялись прочностные и деформационные свойства сосны и осины при трех уровнях влажности (5, 20 и более 30%). Скорость удара измерялась электроконтактными датчиками, а усилие удара определялось по показаниям пьезоакселерометров, расположенных на падающем грузе. Образцы для испытаний изготавливались в виде стандартных прямоугольных параллелепипедов размером (20х20х30 мм) и были вырезаны в трех разных направлениях по отношению к волокнам (продольное, радиальное и тангенциальное).

Влажность образцов определялась как разница между массами образцов до и после сушки. По результатам копровых испытаний сосны и осины было получено соотношение, связывающее 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 ω >30%, *T*=0, *V*=0;

 σ_0 – прочность сухой древесины ($\omega \approx 30\%$, *T*=0, *V*=0);

с – эмпирический коэффициент;

 k_1 и k_2 – соответственно, температурный и скоростной коэффициенты.

Данное соотношение было выбрано авторами, исходя из экспоненциальной зависимости механической прочности от влажности и линейных зависимостей от температуры и скорости удара. Для радиального и тангенциального направлений деформации указанная зависимость не может описать область с отрицательной температурой образца и влажностью более 30%. В этой области материал при замерзании приобретает повышенную механическую жесткость. Замороженный образец влажной древесины обладает значительной устойчивостью к радиальной и тангенциальной деформации. Прочность древесины сосны и осины уменьшается при увеличении влажности до 30% и остается постоянной при дальнейшем увеличении влажности, уменьшается с повышением температуры и увеличивается при переходе от статической к динамической нагрузке.

Я. Бюхар с сотрудниками [7, 26, 27] провел исследования поведения хвойных и лиственных пород древесины (ель, сосна, дуб, бук, береза) при интенсивных динамических воздействиях при взрывном нагружении деревянных балок и плит. В своих исследованиях авторы использовали как экспериментальные методы, так и методы численного моделирования с помощью программного комплекса LS-DYNA. Статическая прочность определялась при растяжении, сжатии и изгибе. При средних скоростях деформации был использован трехточечный изгиб балки при ударном нагружении (тест Шарпи). Для скорости деформации ~10³ с⁻¹ был использован метод Кольского. Кроме того, были выполнены эксперименты по нагружению пластин толщиной 50 мм с помощью кумулятивного взрывного устройства. На основании полученных данных в диапазоне скоростей деформации от 10⁻³ до 10³ с⁻¹ было получено соотношение между разрушающим напряжением σ и скоростью деформации έ в виде $\sigma = \sigma_B + \alpha \dot{\epsilon}$. Параметры σ_B и α были определены для всех испытанных пород древесины. Результаты проведенных экспериментов по взрывному нагружению и их численное моделирование с использованием экспериментально полученных механических свойств древесины в математических моделях показало хорошее качественное и удовлетворительное количественное соответствие.

В последние годы внимание ученых сосредоточено на исследовании влияния на механические свойства древесины ее плотности, влажности, структуры, угла вырезки и вида напряженно-деформированного состояния [28-34]. В этих работах для ряда пород древесины важнейшие характеристики, были получены такие как динамические диаграммы деформирования, предельные прочностные и деформационные характеристики, энергия разрушения и построены зависимости этих характеристик от скорости деформации. Диапазон исследованных скоростей деформации составлял от 10⁻³ до 10³ с⁻¹. При скоростях деформации от 10⁻³ до 10⁰ с⁻¹ использовались сервогидравлические испытательные машины, скорости деформации 10¹-10² с⁻¹ реализовывались с помощью различных копровых установок, для получения динамических свойств при скоростях деформации ~10³ с⁻¹ применялись модификации метода Кольского. Следует отметить, что полученные результаты по влиянию скорости деформации на динамические свойства древесины, в основном, свидетельствуют о том, что разрушающие напряжения возрастают с ростом скорости деформации. Наиболее сильное возрастание наблюдается при скоростях порядка 10^3 с⁻¹. Следует отметить, что единого мнения по трактовке эффекта влияния скорости деформации в настоящее время не выработано.

Ячеистые материалы со стохастической и периодической топологией часто используются в качестве сэндвич-материалов для амортизации ударов и защиты от ударных воздействий [24]. В случае удара энергия рассеивается за счет неупругой деформации сжатия ячеек внутри материала. Текучее (раздавливающее) напряжение ячеистого материала определяет нагрузку, передаваемую системе в процессе диссипации. Таким образом, желательно поддерживать оптимальный уровень, который не слишком высок, чтобы повредить структуру и ее содержимое, и не слишком низок, чтобы уменьшить количество рассеиваемой энергии. Как только напряжение течения установлено, предельная деформация (или максимальная деформация до повышения напряжения) определяет количество энергии, которое может быть безопасно рассеяно. Следовательно, конститутивный отклик идеального рассеивателя энергии — это отклик жесткого и идеально пластичного материала, способного выдерживать очень большие деформации. В рамках этой структуры пробковое дерево как природный пористый биокомпозит обладает выдающимися механическими и физическими свойствами. Поскольку ячеистая и пористая микроструктура позволяет выдерживать большие деформации, тонкая композитная наноструктура древесно-клеточного материала увеличивает его удельную прочность и жесткость, что приводит к высокой удельной способности рассеивания энергии. Пробковое дерево, как диффузно-пористая лиственная древесина, имеет равномерное распределение по типу и размеру ячеек по всему сечению волокон (рис.1.1,a). Ячейки почти шестиугольной формы (зерна) имеют диаметр от 30 до 70 мкм, в среднем 45 мкм. Эти длинные шестиугольно-призматические ячейки заострены на концах (рисунок 1.1, b) и имеют среднюю длину 650 мкм, что дает ячейке соотношение сторон около 16:1 [35].



Рисунок 1.1. Электронные микрофотографии, показывающие типичную структуру пробкового дерева поперек волокон (а) и вдоль волокон (б)

Более того, пробковая древесина встречается в широком диапазоне плотностей от 40 до 380 кг/м³, в зависимости от среднего размера и толщины стенок ячеек, данный факт обеспечивает гибкость конструкции, поскольку прочность является монотонной функцией ее плотности. В статье [35] исследуются динамические свойства пробкового дерева при номинальной скорости деформации порядка 3000 с⁻¹ во всем диапазоне плотности от 55 до 380 кг/м³ (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2. Диаграмма зависимости напряжения от деформации при динамическом сжатии пробкового дерева в зависимости от плотности.

Результаты исследований показали, что первоначальная прочность пробкового дерева при разрушении очень чувствительна к скорости нагружения (увеличение на 50–130% по сравнению с соответствующими квазистатическими значениями), в то время как напряжение текучести практически не зависит от скорости деформации (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3. Диаграммы зависимости разрушающей прочности при сжатии (а) и напряжения текучести (b) пробкового дерева в зависимости от плотности и скорости деформации.

Разница в реакции на увеличение скорости деформации объясняется различиями в кинематике деформации, связанной с ней микроинерцией и уровнем возмущений напряжения при начальном разрушении и прогрессирующей деформации. Обнаружено, что эффективность деформационного уплотнения пробкового дерева ухудшается со скоростью деформации. Как и при квазистатическом нагружении, выпучивание и образование изгибов определены как два основных режима разрушения при динамическом нагружении. Кинематика деформации наблюдаемых режимов разрушения и связанных с ними микроинерционных эффектов была смоделирована и обсуждена для объяснения измеренного увеличения динамической прочности. Результаты моделирования показывают, что микроинерция клеточных элементов может привести к повышению прочности вплоть до пределов прочности материала клеточной стенки. Удельная способность рассеивания энергии пробкового дерева по результатам анализа оказалась сравнима с аналогичными показателями таких материалов, как армированные волокном полимерные композиты. В отличие от объемных материалов локализованная деформация в ячеистых телах связана с большими локальными перемещениями в основном изза дискретного характера ячеистой топологии, что приводит к большим ускорениям в ячеистых элементах в условиях динамического нагружения. Определяющая физика для повышения микроинерционной прочности приводит к дальнейшему сжатию клеточных стенок из-за ненулевого компонента поперечных сил инерции вдоль клеточных стенок.

В работе [36] с помощью метода Кольского проводились динамические испытания европейского бука по всем основным направлениям нагружения, поскольку древесина состоит из лигнин-сахаридной матрицы, армированной ориентированными целлюлозными волокнами. Динамическое поведение древесины изучалось в трех основных направлениях – продольном (L), радиальном (R) и тангенциальном (T).

Средняя относительная деформация (мкм·м⁻¹) 0 -50 -100 -150 -200 -250 -300 -350 L -400 0.07 0.04 0.05 0.06 0 0.01 0.02 0.03 0.04 Время (мкс) Время (мкс)

0.05

0.06

0.07



Рисунок 1.4. Импульсы упругих деформаций нагружающего и опорного стержней по сравнению с расчетами для L, R и T направлений нагружения.

Важно отметить, что механические свойства древесины сильно зависят от места произрастания, ее возраста, от места вырезки образца и ряда других факторов, то получаемые разными авторами результаты могут достаточно сильно отличаться друг от друга; при этом получаемые эффекты зачастую качественно совпадают друг с другом. Для бука были проведены численные эксперименты в программном комплексе LS-DYNA с учетом

16

Средняя относительная деформация (мкм·м⁻¹)

3000

2000

1000

-1000

-2000

-3000

-4000

L

0

0.01

0.02

0.03

анизотропии, упругих, прочностных и деформационных свойств. При этом разрушение считалось несимметричным относительно растяжения и сжатия. Это было достигнуто путем включения трехосности напряжения в модель разрушения. Упругие деформации, измеренные на нагружающем и опорном стержнях, включая отраженные импульсы, сравнивались с численным моделированием (рисунок 1.4) для L, R и T направлений нагружения.

Направление нагрузки L является средним из LR и LT ориентаций, которые должны соответствовать друг другу. 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 сравнивалось с экспериментами (рисунок 1.5.



0.00 0.08 0.17 0.25 0.33 0.42 0.50 0.58 0.67 0.75 0.83 0.92 1.00

Рисунок 1.5. Сравнение экспериментальных и расчетных образцов для L, R и T направлений нагружения с параметром повреждения, отображаемым для соответствующих направлений

нагрузки.

Видно, что разрушенные образцы из расчетов хорошо соответствуют экспериментальным образцам. Наклонный излом или Х-образный излом происходил 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 весьма близки к значениям, полученным при квазистатических испытаниях. Таким образом, упругие свойства древесины европейского бука кажутся слабо чувствительными к скорости деформации.

В исследовании [22] приведены экспериментальные результаты серии испытаний по одноосному динамическому сжатию с помощью метода Кольского цилиндрических образцов

пяти пород древесины (бальза, желтая сосна, красное дерево, американский дуб и экки), выбранных для охватываемого ими диапазона плотностей (от 260 до 1200 кг/м³) и при скоростях удара до 300 м/с. В данной работе учтены режимы макродеформации и микродеформации, возникающие в результате квазистатического и динамического одноосного сжатия. Измеренные импульсы деформации с мерных стержней, показывают, что в условиях динамического нагружения происходит значительное повышение начальной прочности образцов при сжатии. Механизмы деформации древесины локализованы при квазистатическом сжатии, а в условиях динамического нагружения они становятся еще более локализованными и распространяются по материалу в виде волновых фронтов дробления, имеющих некоторые характеристики ударных волн. Предложенная в исследовании модель успешно спрогнозировала динамическое повышение прочности образцов, нагруженных поперек волокон, что подтверждается сравнением экспериментальных данных и теоретических результатов. Даже в контролируемых условиях квазистатического одноосного сжатия неупругая деформация древесины представляет собой сложный процесс, обусловленный разрушением и грубой деформацией клеточной структуры.

Древесно-полимерные композиты приобрели большое значение в последнее десятилетие благодаря достижениям в области технологий, связанных с оборудованием, материалами и различными условиями обработки и находят множество применений в строительных изделиях, потребительских товарах, промышленности и автомобилестроении. В статье [37] были изучены динамические механические свойства гибридных эпоксидных композитов, армированных древесной мукой из тикового дерева и шории робусты с содержанием древесины 33% от общей массы.



Рисунок 1.6. Изменение модуля упругости в зависимости от температуры гибридного эпоксидного композита, армированного древесиной тика и шории робусты

Исследования проводились при частоте 5 Гц, и были получены следующие результаты. Положительный эффект гибридизации древесной муки наблюдался в динамических механических свойствах. Во всех случаях было обнаружено, что значения модуля упругости уменьшаются с повышением температуры (рисунок 1.6)

Гибридный композит T50S50 имел самые высокие значения модуля упругости, чем все остальные композиты. Наибольшее и наименьшее значения демпфирования были обнаружены для композитов T75S25 и T0S100 соответственно (рисунок 1.7).





В статье [38] рассматривается поведение сжатия приморской сосны в поперечной (радиально-тангенциальной) плоскости при квазистатическом и высокоскоростном режимах деформации. Для испытаний при высокой скорости деформации использовался метод Кольского в сочетании с методом корреляции цифровых изображений для реконструкции полей деформации. Также были проведены испытания на квазистатическое сжатие с целью сравнения результатов. Сравнение кривых напряжения-деформации в зависимости от режима скорости деформации показано на рисунке 1.8.

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. Поведение при сжатии древесины приморской сосны в квазистатическом и высокоскоростном режимах деформации исследовалось с использованием образцов двух различных конфигураций, ориентированных соответственно в радиальном и тангенциальном направлениях материала. Сравнивая средние значения механических свойств от квазистатического режима к режиму с высокой скоростью деформации, было замечено, что в радиальном направлении модуль упругости увеличился на 6,3 %, предел текучести увеличился на 130,3 %, а коэффициент Пуассона уменьшился на 10,6 %. В тангенциальном направлении модуль упругости увеличился на 21,9%, предел текучести увеличился на 111,8%, тогда как коэффициент Пуассона уменьшился на 25,8%.



Рисунок 1.8. **σ**_R – **ε**_R и **ε**_R – **ε**_T кривые как в квазистатическом (QS), так и в динамическом (HSR) режимах для: (а) образцов в радиальном и (b) в тангенциальном направлении

В работе [39] исследовано поведение пихты при сжатии в двух ортотропных направлениях (продольном и поперечном) в широком диапазоне скоростей деформации от 2,2·10⁻³ с⁻¹ до 1·10⁻³ с⁻¹. Понимание динамического поведения древесины пихты при сжатии и связанных с этим характеристик поглощения энергии имеют большое значение для применения данного материала с целью демпфированияударной взрывной нагрузки. С этой целью были проведены квазистатические испытания на универсальной испытательной машине и динамические испытания с помощью метода Кольского. Особое внимание в исследовании уделялось характеристикам разрушения, поведения при сжатии и поглощению энергии. Для описания поведения сжатии в квазистатических и динамических условиях, предложены две одноосные феноменологические модели, взятые из литературы, которые хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Используя подобранные параметры феноменологических моделей, дается оригинальное определение коэффициента динамического упрочнения (КДУ). Кривые деформации сжатия в квазистатическом и динамическом режимах можно охарактеризовать двумя стадиями: упругой и критической. Результаты показывают, что прочность и жесткость в поперечном направлении всегда меньше соответствующих величин в продольном направлении. Прочность пихты имеет тенденцию к увеличению с ростом скорости деформации. Жесткость также увеличивается при увеличении скорости деформации как в продольном, так и в поперечном направлениях. Результаты исследования показали, что пихта чувствительна к скорости деформации, и чувствительность зависит от направления нагрузки. Чувствительность к скорости деформации описывается линейной зависимостью между КДУ и скоростью деформации. Были оценены характеристики поглощения энергии. Удельная плотность поглощения энергии на единицу объема растет за счет увеличения скорости деформации при той же осевой деформации за счет увеличения жесткости. Однако удельная плотность поглощения энергии при критической деформации уменьшается при увеличении скорости деформации из-за уменьшения критической деформации.

Разработка полимерных биокомпозитов с использованием в качестве армирующих компонентов натуральных волокон или древесных частиц привлекает все большее внимание, поскольку синтетические волокна дороги, не поддаются биоразложению, а их производство энергозатратно с сопутствующим негативным воздействием на окружающую среду [40]. Древесно-пластиковые композиты (ДПК), также называемые биокомпозитами, представляют собой композиты с полимерной матрицей, содержащие древесные волокна в качестве органических армирующих компонентов. Полимерная матрица может быть термопластичной, такой как полипропилен, полиэтилен или термореактивная смола (эпоксидная смола). В процессе производства могут быть введены химические добавки для улучшения связи между компонентами ДПК. Армирующий органический компонент улучшает механические и термомеханические свойства полимерных матриц, причем эти свойства и, в первую очередь, прочностные свойства можно регулировать в зависимости от вида натурального армирования (частицы, волокна) и объемной доли армирующих компонентов [41-45]. Широко известны биокомпозиты, произведенные с использованием различных армирующих материалов из натуральных волокон, таких как хлопок, джут, лен и др. В исследовании [46] микрочастицы древесины пальмы используются для армирования полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) разработки высокоэффективных биокомпозитов для изучения ударопрочности и ЛЛЯ способности поглощать энергию при баллистическом ударе. Исследуемые образцы включают чистый (неармированный) ПЭВП в качестве контрольного образца и биокомпозиты, содержащие 10, 20, 25 и 30% массы микрочастиц древесины пальмы в качестве армирующих элементов в ПЭВП. Плотность биокомпозитов незначительно отличается друг от друга. Склонность биокомпозита к поглощению воды увеличивалась лишь незначительно при увеличении массовой доли древесных частиц до 30% массы. Прочность и жесткость ПЭВП повышаются за счет армирования частицами древесины, однако данное армирование оказывает

более выраженное влияние на модуль Юнга, чем на прочность при растяжении. Как прочность, так и модуль упругости увеличиваются с увеличением содержания древесных частиц до 25% массы. Увеличение содержания древесных частиц свыше 25% по массе до 30 % привело к снижению как предела прочности при растяжении, так и модуля Юнга. Потеря прочности и модуля упрагости по мере увеличения содержания древесных частиц до 30% привело к снижению как предела прочности при растяжении, так и модуля Юнга. Потеря прочности и модуля упрагости по мере увеличения содержания древесных частиц до 30% происходит из-за агломерации частиц при более высоком содержании частиц, что приводит к плохому сцеплению между агломерированными частицами и матрицей и отслоению на границе раздела частиц при механическом нагружении. Рекомендуемое количество древесных частиц для оптимального армирующего эффекта составляет 20 и 25 % по массе. При данном процентном содеражнии получена самая высокая баллистическая ударопрочность и лучшие механические характеристики как при квазистатическом растяжении, так и при динамическом сжатии. Эти результаты свидетельствуют о том, что осаждение микрочастиц древесины пальмы в полимерной матрице (ПЭВП) улучшает механические свойства и баллистическую стойкость полимера, что приводит к получению биокомпозитов с улучшенными характеристиками по сравнению с неармированным ПЭВП.



Рисунок 1.9. Сравнение прочностных характеристик сжатия при статической, средней и высокой скорости деформации пробкового дерева.

В статье [47] в широком диапазоне скоростей деформации исследовано динамическое поведение пробкового дерева при сжатии. Испытательная машина с винтовым приводом использовалась для низких скоростей деформации (10⁻⁴ c⁻¹), сервогидравлическая испытательная машина использовалась для скоростей деформации до 500 с⁻¹, и для высоких скоростей деформации (500–4000 с⁻¹) использовался метод Кольского со стержнями из магниевого сплава и полупроводниковыми тензодатчиками для измерения деформации

стержня. Эксперименты показали, что реакция на сжатие исследуемого материала слабо чувствительна к скорости деформации в диапазоне $10^{-2} - 4 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, тогда как в диапазоне $10^{-4} - 4 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ наблюдается незначительная чувствительность к скорости деформации (рисунок 1.9).

Таким образом, квазистатические испытания могут дать вводящую в заблуждение информацию о чувствительности к скорости деформации во всем диапазоне скоростей деформации. Для пробкового дерева прочность текучести увеличилась в два раза по сравнению со статической прочностью при скоростях деформации порядка 10³ с⁻¹.

Проектирование деревянных конструкций, способных противостоять вертикальным и боковым нагрузкам, вызванным ветровыми и сейсмическими воздействиями, хорошо зарекомендовало себя, однако в настоящее время не достает надлежащего уровня проектирования для устранения потенциальных взрывных угроз. Воздействие высокой скорости деформации на различные материалы и изделия, где сообщается об увеличении прочности, а в некоторых случаях и жесткости обычно учитываются при проектировании с упрочнения помощью коэффициента динамического (КДУ), который определяется экспериментально путем сравнения динамических свойств со свойствами, полученными под действием статической нагрузки для конкретного режима разрушения отдельного элемента. В настоящее время приняты положения по проектированию и расчету железобетонных и стальных конструкций, подвергающихся ударной нагрузке [48-50], однако данные для проектирования деревянных конструкций все еще ограничены. В экспериментальном исследовании [51] проведена программа по изучению поведения стеновых панелей из клееного бруса с двумя деревянными соединениями углового типа при имитируемых взрывных нагрузках. Основные выводы заключаются в следующем: значительное увеличение предела прочности наблюдалось для соединения с использованием стального уголка. Соединения, разработанные с помощью винтов и толстого углового кронштейна, демонстрируют рассеивание энергии только в винтах, и поэтому их следует проектировать на основе статических свойств, без применения КДУ к максимальной нагрузке. Полномасштабные испытания стеновых панелей показали КДУ равный 1,31 по сравнению со статическими данными, приведенными в литературе.

В статье [29] система РСГ использовалась для исследования динамического разрушения сухой древесины клена. Для исследования влияния геометрических размеров образцов на поведение при разрушении с высокой скоростью деформации были изготовлены образцы двух разных толщин. Деформация образца в древесине зависит от момента разрыва волокон. Был сделан вывод, что скорость деформации увеличивается в четыре раза при увеличении толщины образца вдвое. Результаты испытаний показали, что зависимость деформации от поглощения энергии является линейной функцией при ударной нагрузке. Гистограммы на рисунке 1.10

хорошо свидетельствуют о том, что деформация образцов увеличивается по мере того, как энергия, поглощаемая образцом, приводит увеличивается предельная что к более существенным повреждениям при пластической деформации с высокой скоростью деформации. Результаты показывают, что поглощенная материалом энергия является хорошей характеристикой материала, которую можно использовать при проектировании для прогнозирования уровня динамического повреждения образцов древесины. Численные результаты показывают, что максимальная скорость деформации образца связана с поглощенной энергией образца таким образом, что она увеличивается по мере того, как поглощенная энергия достигает своего критического предела текучести и резко уменьшается, когда материал достигает точки релаксации поглощенной энергии.



Рисунок 1.10. Максимальная энергия, поглощаемая образцами сухой древесины клена при динамическом разрушении образцов толщиной (A) 2,5 мм и (B) 5 мм

В исследовании [52] статические и динамические испытания древесины на сжатие позволили определить характерные параметры, которые могут аппроксимировать поведение древесины при сжатии при больших деформациях (рисунок 1.11).

Полученные параметры основаны на критерии, который позволяет рассматривать три направления ортотропии, как независимые друг от друга. В исследовании предложены эмпирические закономерности на основании испытаний на одноосное статическое и динамическое сжатие для каждого из этих параметров в зависимости от относительной плотности и исходной геометрии испытуемого образца древесины. Данные законы были ранее проверены в лаборатории в статических условиях в большом диапазоне видов и плотностей; также в динамических условиях испытан тополь с плотностью от 0,35 до 0,6 и влажностью 12%. Полученные эмпирические законы использовались в «модели дерева», которую авторы создали и внедрили в стандартный код конечных элементов LS-DYNA и сравнили ее с другими числовыми моделями, используемыми для динамического сжатия древесины при разрушении

контейнера, сделанного из дерева. Результаты сравнения оказались в пользу «деревянной модели».



Рисунок 1.11. Сравнение экспериментальной и расчетной кривой напряжения и деформации при продольном сжатии

В статье [53] была проведена комплексная экспериментальная программа, изучающая механическое поведение кленовой и ясеневой древесины для диапазона плотностей, используемых для изготовления базовых бейсбольных бит. Экспериментальная программа включала четырехточечное испытание на изгиб для определения модулей упругости и разрушающей силы и испытания Шарпи для определения деформации до разрушения в зависимости от скорости деформации и плотности древесины. Затем параметры материала были откалиброваны путем моделирования методом конечных элементов эксперимента Шарпи в программном комплексе LS-DYNA с использованием модели материала MAT_WOOD. Из результатов проведенных испытаний можно сделать следующие выводы. Модуль упругости и прочность при разрыве увеличиваются с увеличением плотности древесины для образцов клена и ясеня. Энергия разрушения возрастает с увеличением плотности для деревянных образцов обоих пород. Деформация до разрушения возрастает с увеличением плотности клена, что не наблюдалось у ясеня. В среднем образцы ясеня демонстрируют более высокую энергию разрушения, чем образцы клена.

Для оценки степени анизотропии в НИИМ ННГУ проведены испытания трех пород древесины с различным направлением вырезки образцов относительно расположения волокон [9]. В условиях одноосного напряженного состояния испытаны цилиндрические образцы сосны, березы и осины высотой ~10 мм и диаметром ~20 мм.

Кроме того, в НИИМ ННГУ и ЛАНЛ (США) выполнены совместные испытания образцов секвойи при комнатной температуре при различных углах вырезки образцов [54].

В работе [55] представлен беглый обзор механических свойств и определяющих конститутивных законов для древесины. Текущие исследования механических свойств древесины в основном сосредоточены на плотности, структуре, влаге и других природных факторах. Установлено, что высокая плотность, плотная структура и высокая влажность приводят к более высокой прочности. В большинстве литературных источников древесина рассматривалась как анизотропный материал. Микроскопическое изображение используется сегодня для исследования древесины, что позволило четко наблюдать анизотропию. Общие выводы говорят о том, что древесина имеет более высокую прочность при динамической нагрузке.Для древесины, как правило, используется анизотропная модель пористых и композиционных материалов, но результаты расчетов недостаточно точны. Согласно литературе, нет единой теории, общепринятой для динамической нагрузки. Исследования показали, что структура и влажность являются ключевыми факторами в прочности древесины, но пока достаточно не изучено влияние динамических нагрузок. Были проведены испытания на сжатие, растяжение, кручение и комбинированную нагрузку и установлено, что твердость, возраст, влажность, качество, угол структуры и влажность являются основными факторами, определяющими прочность древесины. Динамические нагрузки более сложны, чем статические. Сила динамического воздействия зависит от скорости деформации. Как правило, для изучения высокой скорости деформации используются эксперименты с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Несмотря на то, что было достигнуто много успехов, необходимо провести дополнительные исследования по динамическим нагрузкам и провести эксперименты с более высокой скоростью. Чтобы удовлетворить потребности в инженерных разработках, для комплексного структурного анализа должна быть разработана подходящая численная модель. Хотя многие модели были предложены, ни одна модель не может быть адаптирована для всех существующих требований. Имеющиеся модели не способны эффективно отражать воздействие природных факторов, таких как температура, влажность и структура. Из-за сложностей при динамическом воздействии и отличии от статического нагружения исследования свойств при высокой скорости деформации, как и моделирования динамических нагрузок, весьма ограничено. Поэтому данная область открыта для будущих исследований.

Недостаток информации в общепринятой базовой модели древесины, которая может учитывать влияние скорости деформации на свойства материала, создает трудности при работе с различными аналитическими или численными моделями, которые могут потребоваться для проектирования конструкций. Для создания наилучшего алгоритма моделирования древесины необходимо множество данных по испытанию древесины при различных скоростях деформации, температурах, влажности и т.д. В литературе описано множество областей применения, в которых требовались конструктивные модели поведения древесины, зависящие от скорости деформации для различных конструкций, механизмов, изделий и при воздействии разнообразных внешних факторов техногенного или природного происхождения. К ним могут относится деревянные самолеты [56]; воздействия при атомном взрыве [57]; тараны, военные корабли, забивные деревянные сваи для береговых сооружений, баллистические удары [8]; столбы дорожных ограждений и деревянные дорожные ограждения [58-64]; защитные сооружения автобусных остановок от воздействия различных предметов при сильном ураганном ветре [65]; ограждающие конструкции конюшен [66]; деревянные постройки [67, 68]; деревянные поддоны для транспортировки товаров, бейсбольные биты и ручки для рабочих инструментов – все это примеры, в которых могут возникать средние и высокоскоростные деформации.

1.1.1 Ортогональные свойства древесины

Дерево – анизотропный материал, его механические свойства зависят от направления прикладываемой нагрузки. Ортогональными направлениями древесины являются тангенциальное (T), радиальное (R) и продольное (L) направление, которые представлены для образца древесины на рисунке 1.12а и для изображения годичного кольца на рисунке 1.12b. Продольное направление – направление вдоль волокон, идущих по длине дерева, радиальное направление перпендикулярно годичным кольцам, а тангенциальное – касательно к ним.



Рисунок 1.12. Изображения, показывающие ортогональные направления древесины: а) для образца ели; b) увеличенное изображение годичного кольца; c) слои стенки ячеек древесины.

Слои клеточной стенки древесины, начиная с внешней стороны клетки, представляют собой первичную стенку (Р) и вторичную стенку (S). Они представлены на рисунке 1.12с. Вторичная стенка, в свою очередь, состоит из трех слоев: внешнего слоя (S1), среднего слоя (S2) и внутреннего слоя (S3). Между клетками древесины находится средняя пластинка (М).

Стенка клетки древесины состоит в основном из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Направления микрофибрилл в разных слоях клеточной стенки несколько различаются. Угол между микрофибриллой и направлением длины клетки называется углом микрофибриллы. Угол микрофибрилл случайный в P, 45-90 ° в S1, 0-20 ° в S2 и 30-70 ° в S3 [69].

1.1.2 Влияние размера образца при динамических испытаниях

В работе [29] проведены испытания с помощью метода Кольского для определения характера влияния длины образца при различных скоростях деформации. Изначальные скорости деформации при двух нагружающих режимах составляли 950 и 2000 с⁻¹. При увеличении длины образца в два раза, скорость деформации снижалась в четыре раза, деформация уменьшилась на 75%.

Для уменьшения эффектов инерции и трения для динамических испытаний с помощью метода Кольского в исследованиях [70, 71] рекомендованы определенные соотношения длины к диаметру образца (l/d=0,5÷1,0). Анализ предварительных испытаний образцов разной длины привел к выводу, что те же соотношения применимы и к древесине. Инерционный эффект рассматривается одними исследователями как непреднамеренное последствие динамического воздействия, а другими считается материальной реакцией [22].

1.1.3 Демпфирование (эффекты внутреннего трения)

В работе [72] целая глава посвящена исследованию эффектов внутреннего трения, найдена их связь с микроструктурой древесины, которая зависит от области лигнина в древесине и целлюлозных микрофибрилл (рис. 1.13), которые являются кристаллическими, что приводит к вязкоупругому поведению материала (внутреннему демпфированию). При воздействии динамической нагрузки, химические водородные связи в цепях, соединяющие микрофибриллы и лигнин перестраиваются, давая новые положения связей [73].



Связки целлюлозы

Рисунок 1.13. Области лигнина в древесине.

В исследовании [74] обнаружено, что угол микрофибриллы является наиболее важным фактором в определении колебательных свойств вдоль зерна клеточной структуры. Чтобы улучшить демпфирующие свойства, рекомендовано выбирать древесину с низким углом микрофибриллы.

Авторы в работе [75] определили влияние содержания влаги на демпфирующие свойства в диапазоне от 0 до 30%. Результаты показали наименьший модуль упругости при 12% влажности, а наибольший при 30% влажности.

1.1.4 Характеристики древесины при динамическом сжатии

Кривая напряжение-деформация при динамическом сжатии древесины состоит из трех отдельных частей: начальной упругой области, области текучести и области уплотнения (рис. 1.14). При радиальном сжатии древесины упругая область соответствует обратимой упругой деформации волокон ранней древесины.



Рисунок 1.14. Кривые напряжения-деформации четырех видов древесины при радиальном сжатии [76].

Для тангенциального и продольного сжатия это комбинация реакции волокон ранней и поздней древесины. В области текучести клетки ранней древесины разрушаются, вызывая необратимое повреждение клеток древесины. На заключительном этапе сжатые волокна ранней древесины дополнительно сжимаются, и может произойти некоторое упругое сжатие ранней древесины. Основные характеристики сжатия, то есть части кривой напряжение-деформация и разрушение волокон не зависят от температуры [76, 77]. Область уплотнения также включает сжатие переходной древесины [78]. Разрушение клеток поздней древесины может не произойти из-за толщины клеточных стенок [76, 79]. Модуль Юнга значительно больше в продольном направлении, чем в радиальном и тангенциальном направлениях [28, 76].

Скорость деформации, температура и содержание влаги – все это оказывает существенное влияние на жесткость древесины [28, 80]. Поэтому экспериментальные работы важно проводить в условиях, которые максимально точно имитируют реальные условия работы конструкционной древесины.

1.1.5 Влияние скорости деформации при динамическом сжатии древесины

Скорость деформации, как известно, влияет на характеристики динамического сжатия древесины.

В исследовании [81] рассмотрены более высокие скорости деформации, 10³–10⁴ с⁻¹, результаты которого привели к аналогичному выводу, сделанному в работе [82], где образцы из березы и липы не показали чувствительность к скорости деформации как вдоль, так и поперек волокон.

В работе [83] в трех ортотропных направлениях (продольном, радиальном и тангенциальном) в широком диапазоне скоростей деформации от 0,001 до 600 с⁻¹ исследованы механизмы разрушения, напряжения и деформации, а также степени поглощения энергии двух древесных пород (ель и бук). Для проведения испытаний использовалось несколько установок: машина с винтовым приводом (Sintec 20D) для низких скоростей деформации (0,001с⁻¹), испытательная машина Instron VHS65/20 для промежуточных скоростей деформации (0,39с⁻¹, 2,45с⁻¹, 15,3с⁻¹) и разрезной стержень Гопкинсона для высокой скорости деформации (600с⁻¹). Ударное напряжение и напряжение текучести показывают, в общем, растущую тенденцию с увеличением скорости деформации в продольном направлении для изученных видов древесины. Увеличение напряжения разрушения и напряжения текучести более значимо за пределами скорости деформации 15 с⁻¹ в продольном направлении для обоих материалов. Однако в поперечных направлениях ударные нагрузки и напряжение текучести показывает возрастающую тенденцию с увеличением скорости деформации 15 с⁻¹ в продольном направлении для обоих материалов.

ударные нагрузки следуют той же растущей тенденции. При высокой скорости деформации 600 с⁻¹ образцы резко растрескивались в продольном направлении. Ель обладает большей способностью рассеивать энергию на единицу массы, чем бук под ударной нагрузкой. Несмотря на полученные результаты, было бы интересно тщательно изучить влияние скорости деформации между 15,3 и 600 с⁻¹ для лучшего понимания связи между скоростью деформации и механизмами разрушения и изучить влияние скорости деформации при ограничении бокового давления.

Предел пропорциональности растет во всех испытаниях с ростом скорости деформации. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что древесина обладает ярко выраженными вязкоупругими свойствами.

1.1.6 Особенности ранней и поздней древесины

Различия в механических свойствах древесных волокон – одна из актуальных проблем. Во время сжатия волокна ранней древесины могут быть разрушены, в то время как волокна поздней древесины остаются неповрежденными (рис. 1.15). Большинство исследований древесины сосредоточено на ее объемных свойствах, а исследований относительно волокон в пределах одного годового кольца значительно меньше. Ранняя древесина анизотропна, как в отношении поперечной усадки, так и в отношении поперечной упругости, в то время как поздняя древесина почти изотропна в поперечном направлении [84]. И радиальный, и тангенциальный модули Юнга криволинейно возрастают с увеличением плотности [85]. Модуль Юнга увеличивается с увеличением числа годичных колец и высоты дерева, в то время как модуль сдвига увеличивается согласно числу колец и уменьшается с увеличением высоты. Процентное изменение модуля Юнга в пределах одного годового кольца почти так же велико, как и во всех кольцах от сердцевины древесины до ее внешнего кольца [86]. Есть и другие ключевые различия между ранней и поздней древесиной.



Рисунок 1.15. Граница и расположение ранней и поздней древесины.

При растягивающем нагружении амплитуды деформации в ранней древесине могут быть в два раза больше, чем в поздней древесине [87, 88], в то время как их коэффициент Пуассона также различается [89]. Скорость деформации и температура не оказывают существенного влияния на распределение деформации между ранней и поздней древесиной. Температура увеличивается медленнее в поздней древесине, при этом она ниже по показателям, чем в ранней древесине [90]. Разница в температурах размягчения для ранней и поздней древесины не зависит от частоты измерений [91].

1.1.7 Усталость древесины

Накопление усталостных повреждений в древесине начинается с зарождения трещин, которые затем переходят от образования микротрещин к образованию макротрещин. Сдвиг – самое эффективное воздействие, вызывающее образование микротрещин в волокнах. Примерно после 3000 циклов радиального сжатия образуются микротрещины, после чего трещины накапливаются с той же скоростью, что и при сдвиге. Растягивающая нагрузка мало влияет на накопление повреждений [92]. Когда целью процесса является достижение наибольшей деформации с низким энергопотреблением (рисунки 1.16, 1.17), то двухступенчатое нагружение сначала сжатием, а затем комбинацией сжатия со сдвигом более выгодно, чем простое сжатие [93]. Структурному разрушению древесины способствует более высокая температура и более низкая частота сжатия [94, 95].



Рисунок 1.16. Сравнение кривых «напряжение-деформация» при испытаниях на сжатие при повторной нагрузке. Образцы испытывали в воде при 50° С [93].



Рисунок 1.17. Деформация, полученная при комбинированном сдвиге и сжатии с помощью модели, состоящей из однослойных ячеек, смоделированных из изотропного упругого материала [93].

Хотя после циклического радиального сжатия в оптический микроскоп не видно параллельных трещин или расслоения, наблюдается небольшое ослабление структуры по углам ячеек. Это может быть связано с микротрещинами шириной менее 10 нм [96].

Предварительно усталостная древесина не очень чувствительна к направлению нагрузки, самая большая разница между естественной и предварительно усталой древесиной связана с радиальной нагрузкой, как показано на рисунке 1.18, 1.19 [97]. Предварительная усталостная обработка также снижает теплопроводность древесины [97, 98].



Рисунок 1.18. Профиль смещения как функция высоты вдоль оси сжатия в момент времени t = 15с; красные кривые соответствуют радиально нагруженным образцам, а тангенциально нагруженные образцы изображены синим цветом [97].



Рисунок 1.19. Профиль деформации как функция высоты вдоль оси сжатия для усталых и контрольных, радиально нагруженных образцов (h & 90) в момент времени t = 15 c [97].

В процессе шлифования образуется слой усталостных древесных волокон [98, 99]. Обработка перед усталостным шлифованием может снизить удельное потребление энергии, необходимое для механической варки целлюлозы [100-102].

1.1.8 Определение коэффициента Пуассона

Для анизотропных материалов, таких как древесина, коэффициент Пуассона при растяжении и сжатии для каждого ортогонального направления представляет собой отношение поперечной деформации к продольной. Эти параметры в основном изучались в последние 4–5 десятилетий с помощью механических или электрических измерительных систем (например, тензодатчиков, систем механических экстензометров, индуктивных устройств измерения деформации) из-за высокой стоимости и отсутствия доступности оптических бесконтактных измерительных систем [103].

Коэффициент Пуассона может быть получен как с помощью статических, так и динамических методов испытаний. Статическое испытание является наиболее часто используемым для определения коэффициента Пуассона, однако, при эксплуатации конструкций в условиях импульсных нагрузок для их достоверного проектирования и расчета в численные модели должна быть заложена либо величина динамического коэффициента Пуассона (для изотропных тел), либо набор коэффициентов Пуассона в характерных направлениях (для анизотропных тел). Динамический коэффициент Пуассона может быть определен с помощью различных ударных методов и анализа отклика материала на приложенные импульсные нагрузки малой амплитуды.

Первые исследования коэффициента Пуассона для древесины ели провел Carrington [104-106]. Carrington вывел коэффициент Пуассона из экспериментов по изгибу балки, измерив

кривизну в поперечном направлении (поперечная деформация (εq)) и продольном направлении (осевая деформация (ɛl)). Hörig [107] пересмотрел эти данные и принял идеи Voigt [108-110] об ортотропном поведении древесных материалов. Модель Hörig [111] является основой для ортотропного описания древесины, которое используется по настоящее время. Дальнейшие существенные исследования древесины ели были выполнены Wommelsdorff [112] и Neuhaus [113]. С помощью экспериментов на растяжение и изгиб они определили шесть ортотропных коэффициентов Пуассона, используя устройства для измерения индуктивной деформации, а также тензодатчики. Кроме того, Niemz и Caduff [114] исследовали коэффициент Пуассона для древесины ели. В работе [115] был предложен метод динамических испытаний по определению коэффициент Пуассона пиломатериалов, основанный на кривой деформационных изгибных колебаний первого порядка консольной плиты. Свободная вибрация консольного образца была возбуждена путем простукивания. С помощью розеток тензодатчиков были измерены коэффициенты Пуассона вдоль и поперек волокон на радиальных срезах и вдоль волокон на поперечных срезах у образцов ситкинской ели. В работе [116] были предложены принципы и методы определения динамического коэффициента Пуассона древесины на основании анализа изгибных колебаний консольной плиты с помощью тензометрии. Для приклейки розетки тензодатчиков на поверхности плиты с помощью регрессионного анализа выбиралось место, в котором поперечное напряжение внутри древесной пластины было нулевым во время изгибной вибрации первого порядка. Отношение между линейными амплитудами поперечной и продольной деформации при частоте изгиба первого порядка было принято в качестве измеренного значения коэффициента Пуассона материала. В работе [117] был предложен метод динамических испытаний на коэффициент Пуассона пиломатериалов, основанный на кривой деформационных изгибных колебаний первого порядка консольной плиты. С использованием розеточных тензодатчиков измерялась продольная и поперечная деформация консольной плиты в которой возбуждались колебания за счет ударного механизма с резиновым наконечником.

Достаточно распространенными методами косвенного измерения динамического коэффициента Пуассона являются методы на основании ультразвукового неразрушающего контроля. В методе тестирования UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) [118] используются два преобразователя для излучения и приема ультразвукового импульса (электрического сигнала).

Более сложные методы измерений (электронная интерферометрия, спекл-структуры и комбинация лазерной и видеоэкстензометрии) были использованы в работе [119] в экспериментах на одноосное растяжение древесины ели, что позволило определить все шесть основных коэффициентов Пуассона. Keunecke et al. [120] в качестве метода исследования использовали корреляцию цифровых изображений (DIC) для измерения распределения деформации. DIC (Digital Image Correlation) - это метод бесконтактного оптического измерения

деформации поверхности образца при динамическом нагружении (Valla et al. [121]). Методика DIC достаточно информативна, но технически очень сложно реализуема, требует скоростной камеры с высоким разрешением и лицензионного программного обеспечения для проведения математического корреляционного анализа последовательных изображений рабочей зоны образца, зарегистрированных цифровой камерой в течение его деформирования. Кроме того, для успешного применения этого метода образец должен быть особым образом подготовлен путем нанесения случайного точечного рисунка (спекл) на его поверхность.

Среди рассмотренных методов измерения динамических величин коэффициента Пуассона досточно просты в реализации и имеют высокую достоверность методы измерения высокоскоростной поперечной деформации образцов, в основу которых положено использование интерферометра миллиметрового диапазона и эффекта Доплера.

1.2 Теоретические исследования моделирования древесины

Существует две основные группы модели древесного материала: микромеханические модели, моделирующие детали структуры древесины, и континуальные модели, моделирующие поведение древесины в целом, которых относительно меньше. Существует несколько микромеханических моделей дерева, но их можно использовать только в определенном масштабе. Модель, состоящая ИЗ различных масштабных уровней, называется многомасштабной моделью, и такая модель необходима для полного понимания механического поведения древесины [122]. В работе [123] представлен современный обзор различных моделей древесины, а также новая модель древесины, основанная на анизотропном вязком разрушении при больших деформациях и высоких скоростях деформации.

1.2.1 Микромеханические модели

Одна из самых популярных микромеханических моделей – сотовая модель, представленная Гибсоном и Эшби [24, 122]. Авторы представили гексагональную сотовую модель и сравнили свои предположения для поперечных модулей упругости как функции относительной плотности с экспериментальными данными. Поведение древесины до первого разрушения было исследовано в работе [124] с помощью сотовой модели, построенной из шестиугольных ячеек. Аналогичная сотовая модель с гексагональными ячейками была использована Моденом [125], который разработал двухфазную сотовую модель, разделенную на раннюю и позднюю древесину с помощью различных относительных плотностей. Результаты двухфазной модели были значительно более точными, чем результаты, полученные с помощью однофазной модели.
Также существуют модели, учитывающие структуру клеточной стенки. Флорес в свое работе [126] заявил, что угол микрофибрилл является наиболее важным параметром, контролирующим баланс между жесткостью и гибкостью деревьев. Он изучал восстановление древесины в циклах нагрузки-разгрузки с помощью трехуровневой модели клеточных стенок МКЭ. Это позволило уловить механизм восстановления на уровне клеточной стенки и точно воспроизвести характерное повышение жесткости клеточной стенки при уменьшении угла микрофибрилл в клеточной стенке.

Клеточная стенка была смоделирована двумя [127] и тремя слоями [128]. Кейв разделил клеточную стенку на S2 и связующий слой. Кейв предположил, что концентрация лигнина во вторичной стенке является однородной и что только толщина слоя S2 вторичной стенки объясняет различную толщину стенок ячеек. Модель основана на относительной толщине слоев клеточной стенки на основе базовой плотности или общей толщины клеточной стенки. Ошибка в расчетной продольной усадке уменьшается, если принять во внимание относительную толщину слоев клеточной стенки [128]. Ямамото разработал трехслойную модель со средней пластиной S1 и S2. Деформация, вызванная углом наклона микрофибрилл, моделировалась лучше, когда принимались во внимание как набухание лигнина, так и натяжение целлюлозы. В работе [129] улучшили трехслойную модель Ямамото, заменив условие Ямамото, в котором интеграл напряжения равен нулю, условием, при котором напряжение везде равно нулю.

Копонен и др. [130, 131] объеденили соты с моделированием клеточной стенки. Они начали с моделирования клеточной стенки с помощью трехслойной модели [129, 130], а затем разработали модели, основанные на структуре и упругих свойствах клеточной стенки. В моделях использовались три группы ячеек правильной формы: ячейки ранней древесины, ячейки поздней древесины и лучевые ячейки. Сравнение шести различных моделей было использовано для определения общих упругих свойств древесного материала. Однако модели имели разные радиальные углы клеточной стенки и углы микрофибрилл S2, а в двух из них были полностью исключены лучевые клетки [131].

Хофштеттер и др. [132] разработали микроупругую модель, основанную на четырехступенчатой схеме гомогенизации. Ступени изготовлены из полимерной сетки, материала стенок ячеек, древесины хвойных и твердых пород. Их модель переоценивает продольную нормальную жесткость и недооценивает поперечную нормальную жесткость. Причина этого кроется в предположении, что угол микрофибриллы равен нулю. Это также считается причиной значительного занижения модулей сдвига. Модель также переоценивает жесткость на сдвиг, предположительно из-за упрощения просвета клетки и других сосудов, которые были представлены цилиндрами.

Перссон [133] провел многомасштабное моделирование древесины, начиная с химических компонентов клеточной стенки и заканчивая средними механическими свойствами годичного кольца. Свойства клеточной стенки рассчитывались на основе известных свойств основных компонентов клеточной стенки. Затем свойства древесного волокна и структуры древесины были рассчитаны с использованием двух различных ячеечных моделей.

Фортино и др. [134] представили трехмерное моделирование микро-конечных элементов с использованием пятислойной модели стенки ячеек древесины в сочетании с гексагональными ячейками. Они смоделировали два случая нагружения, в одном из которых использовалось сжатие, а в другом сочетание сжатия и сдвига. Затем они сравнили свои результаты с экспериментальными данными.

1.2.2 Континуальные модели

Адалян и Морлиер [135] изучали древесину при статическом и динамическом многоосном сжатии и представили модель сплошной древесины. Они сравнили свою модель дерева, основанную на законе гипоупругости, с традиционной упругопластической моделью и обнаружили, что результаты моделирования, основанные на законе гипоупругости, были более реалистичными, чем результаты, полученные с помощью упругопластической модели.

Холмберг [136] использовал как микромеханические, так и континуальные модели для изучения расслоения древесины. Для модели континуума Холмберг разделил материал на раннюю и позднюю древесину. Модель пластичности дробимого пенопласта, разделенная на несколько слоев, использовалась для ранней древесины, в то время как поздняя древесина моделировалась как линейно-упругий материал.

Бьёркквист и др. [137, 138] моделировали древесину как простое линейное твердое тело Фойгта-Кельвина. Их модель использовалась для моделирования, направленного на оптимизацию развития деформации и температуры, связанного с усталостной работой в процессе шлифования древесины. Смоделированный температурный профиль около точильного камня был очень похож на соответствующий экспериментальный профиль. Однако на больших расстояниях смоделированный профиль давления значительно отличался от измеренного профиля давления.

Ханхиярви и Маккензи-Хельнвайн [139] разработали модель материала для анализа древесины в поперечной плоскости. 2D-модель была основана на термодинамически согласованной гиперупругой формулировке. Модель определяет разложение общей деформации на сумму нескольких тензоров деформации, связанных с различными механизмами деформации. Модель включает в себя неисправимые деформации с пластиковым элементом.

Милч и др. [140] использовали модель эластопластического материала для моделирования деревянных соединений. Они достигли хорошего согласия между экспериментальными результатами и их моделированием. Результаты моделирования для европейской ели примерно на 10% отличались от экспериментальных результатов. Модели из эластопласта из дерева также были представлены в [141].

1.3 Выводы по главе 1

На основании обзора доступных научных статей, посвященных исследованиями различных пород древесины в области высоких скоростей деформации можно сделать следующие выводы.

1. Исследование эффектов внутреннего трения в древесине показали, что его причиной являются области лигнина в древесине и целлюлозные микрофибриллы, которые по своей структуре являются кристаллическими, что приводит к вязкоупругому поведению (внутреннему демпфированию). Чтобы улучшить демпфирующие свойства рекомендовано выбирать древесину с низким углом микрофибрилл.

2. 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.

3. Скорость деформации влияет на характеристики динамического сжатия древесины, а влажность древесины влияет на ее реакцию при различных скоростях деформации.

4. 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. Большинство исследований древесины было сосредоточено на ее объемных свойствах, а исследований относительно волокон в пределах одного годового кольца значительно меньше.

5. Среди рассмотренных методов измерения динамических величин коэффициента Пуассона достаточно просты в реализации и имеют высокую достоверность методы измерения высокоскоростной поперечной деформации образцов, в основу которых положено использование интерферометра миллиметрового диапазона и эффекта Доплера.

2 МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В настоящей главе представлено описание методов и схем, используемых в работе для экспериментального исследования процессов динамического деформирования и разрушения древесины. Для регистрации процессов, протекающих в образце в ходе нагружения используются методы динамической тензометрии, техника мерных стержней, метод корреляции цифровых изображений и метод радиоинтерферометрии.

2.1 Метод Кольского и его модификации

Изначально Гопкинсон разработал свою технику ударного стержня для измерения давления, создаваемого взрывчаткой [142]. Эта техника была далее развита Дэвисом [143] и Кольским [144], поэтому разрезной стержень Гопкинсона (РСГ) также известен, как установка Кольского. Более подробную информацию о методике РСГ можно найти в обзоре Гама и др. [145] и в статье Грея III [146].

Устройства для растяжения и кручения более сложны, чем устройства для сжатия. Основные различия заключаются в генерации импульса нагрузки, геометрии образца и в способе прикрепления образца [146]. Другие методы испытания материалов, такие как гидравлическая испытательная машина, которую использовали Умайер и Сальмен [147] для изучения радиального сжатия ели европейской, как правило, приводят к более низким скоростям деформации.

Среди методов динамических испытаний метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона получил наибольшее распространение. Данный метод имеет хорошую теоретическую обоснованность и простоту реализации, а также большую информативность, поскольку позволяет получить помимо диаграммы деформирования кривую изменения скорости деформации в течение всего испытания.

Образец из исследуемого материала помещается между двумя стержнями: нагружающим и опорным. Ударник – снаряд, разгоняемый сжатым воздухом, ударяет по нагружающему стержню, вызывая импульс упругой волны [145, 146]. Этот импульс упругой волны проходит через первый стержень и достигает образца. Часть импульса отражается на конце стержня, другая часть проходит через образец материала в опорный стержень. Тензодатчики, установленные на поверхности нагружающего и опорного стержней, измеряют деформации, вызванные импульсом упругой волны.

2.1.1 Классический вариант метода на сжатие

Метод Кольского основан на точном решении волнового уравнения, использует свойства распада волны, проходящей через стержни. Математическая модель РСГ представлена тремя стержнями: двух "бесконечно прочных" и "бесконечно длинных" тонких стержней и "мягкого", третьего короткого, по сравнению с первыми двумя – стержня-образца, зажатого между ними. Схема классического варианта метода Кольского показана на рисунке 2.1. В испытаниях по методу Кольского ударник ударяется о нагружающий (входной) стержень и посылает одномерную упругую волну сжатия $\varepsilon^{l}(t)$, которая распространяется по стержням со скоростью C. На рисунке показано распространение волн в РСГ в виде лагранжевой х~t диаграммы. При достижении образца эта волна ввиду разницы площадей их поперечных сечений, а также разницы в акустических импедансах рС мерных стержней и образца расщепляется: часть ее отражается обратной волной $\varepsilon^{R}(t)$, а часть проходит через образец во второй стержень волной $\varepsilon^{T}(t)$. Образец при этом претерпевает упругопластическую деформацию, в то время как стержни деформируются упруго. Амплитуды и формы волн $\varepsilon^{R}(t)$ и $\varepsilon^{T}(t)$ определяются соотношением акустических жесткостей материалов стержней и образца, а также реакцией материала образца на приложенную динамическую нагрузку. Регистрируя тензодатчиками упругие волны, можно определить процессы изменения во времени напряжения, деформации и скорости деформации в образце по формулам Кольского [148].



Рисунок 2.1. Схема метода Кольского при сжатии

Из трех импульсов (падающего, отраженного и прошедшего) два являются независимыми, а третий можно посчитать из условий равновесия образца в процессе нагружения. В связи с этим возможны разные варианты записи выражений для расчета напряжений, деформаций и скоростей деформаций образца. Если материалы и диаметры нагружающего и опорного стержней совпадают, то наиболее часто на практике используются следующие уравнения:

$$\sigma_{s}(t) = \frac{EA}{A_{s}^{0}}\varepsilon^{T}(t)$$

$$\varepsilon_{s}(t) = -\frac{2C}{L_{0}} \int_{0}^{t} \varepsilon^{R}(t) \cdot dt$$
$$\dot{\varepsilon}_{s}(t) = -\frac{2C}{L_{0}} \cdot \varepsilon^{R}(t) .$$

здесь C – скорость звука в материале стержней, E – модуль Юнга мерных стержней, A – площадь сечения мерных стержней, A_S^0 – начальная площадь сечения образца, L_0 - начальная длина образца.

Из полученных параметрических соотношений $\sigma_s(t)$, $\varepsilon_s(t)$ и $\dot{\varepsilon}_s(t)$ убирается время как параметр, и строится диаграмма деформирования $\sigma_s \sim \varepsilon_s$ определенного образца с известной зависимостью $\dot{\varepsilon}_s \sim \varepsilon_s$.

2.1.2 Использование модификации метода Кольского для исследования свойств материалов при пассивном ограничении радиальной деформации

Модифицированный метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона применяется для проведения динамических испытаний древесины, малосвязных материалов, хрупких материалов, композитов в условиях объемного напряженного состояния [149-152]. В отличие от классического варианта метода, между мерными стержнями располагается образец, помещенный в металлическую обойму (рисунок 2.2). Поскольку радиальной деформации образца препятствует жесткая обойма, в образце возникает объемное напряженное состояние. В то же время деформированное состояние образца можно считать одномерным.



Рисунок 2.2. Схема обоймы

Напряженно-деформированное состояние образца при испытании в обойме описывается следующими соотношениями:

$$\sigma_1 = \sigma_x; \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r; \varepsilon_1 = \varepsilon_x; \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$$

где σ_x – продольные напряжения, ε_x – продольные деформации, σ_r – радиальные напряжения.

Компоненты напряжения $\sigma_x(t)$, деформации $\varepsilon_x(t)$ и скорости деформации $\dot{\varepsilon}_x(t)$ определяются по формулам Кольского с использованием сигналов, зарегистрированных на мерных стержнях.

Окружная деформация, зарегистрированная с обоймы $\varepsilon_{\theta}(t)$ позволяет оценить радиальное напряжение в образце $\sigma_r(t)$ по формуле:

$$\sigma_r(t) = \frac{1}{2R_2^2} \left[E\left(R_1^2 - R_2^2\right) \varepsilon_{\theta}(t) \right]$$

Вычислив таким образом компоненты тензора деформаций и напряжений можно определить различные характеристики напряженно-деформированного состояния образца:

максимальные касательные напряжения (сопротивление сдвигу):

$$\tau(t) = \frac{\sigma_x(t) - \sigma_r(t)}{2}$$

давление:

$$P(t) = \frac{\sigma_x(t) + 2\sigma_r(t)}{3}$$

объемную деформацию:

$$\theta(t) = \varepsilon_x(t)$$

интенсивность напряжений:

$$\sigma_i(t) = \sigma_x(t) - \sigma_r(t)$$

интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{\varepsilon_x(t)}{(1+v)} \approx \frac{2}{3} \varepsilon_x(t)$$

Указанную модификацию часто применяют для определения кривых объемной сжимаемости и зависимости сопротивления сдвигу от давления при ударном нагружении.

2.1.3 Испытания малоплотных материалов под действием многократного нагружения

При испытаниях малоплотных материалов на сжатие (древесина, пенопласты, высокопористые керамики и др.) имеет место большая разница в акустических импедансах ρC мерных стержней и образца. Из-за этого амплитуда отраженного импульса может достигать 80-90% от амплитуды нагружающей волны. Отраженный импульс, который доходит до переднего (нагружаемого) торца первого мерного стержня, отражается обратно (так как

соприкосновения с ударником уже нет) и, при достижении образца, нагружает его во второй раз. Подобные циклы нагрузки повторяются многократно, до тех пор, пока импульс не угаснет до конца. Таким образом, образец во время одного испытания испытывает нагружение много раз, претерпевая в каждом цикле определенную деформацию. Для неискаженной регистрации прошедшего импульса в нескольких циклах, длина опорного стержня должна быть больше длины нагружающего (рисунок 2.3), чтобы обеспечить пространственную развязку регистрируемого импульса с сигналами, вернувшимися от свободного торца опорного стержня [153]. Осциллограмма испытания образца секвойи в жесткой ограничивающей обойме при трехцикловом нагружении импульсами одного знака показана на рисунке 2.4.



Рисунок 2.3. Схема установки на многократное нагружение



Рисунок 2.4. Типичная осциллограмма при испытаниях древесины

2.2 Динамический изгиб балок

Для определения прочности материала при изгибе в статике используют схему на трехточечный или четырехточечный изгиб балки (ГОСТ Р 56805-2015). Подобная методика была опробована для случая динамического нагружения деревянных балок. Общий вид схемы нагружения образца показан на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Схема испытаний балки на трехточечный изгиб

В экспериментах использовались мерные стержни диаметром 20 мм со сточенными на клин концами. Нагружение образцов производилось ударником диаметром 20 мм и длиной 400 мм через стальной мерный стержень. Для повышения уровня тензометрического сигнала в качестве опор использовались дюралевые мерные стержни.







Геометрические параметры установки (радиусы скруглений стержней и расстояние между опорными стержнями) показаны на рисунке 2.6. Геометрические параметры образцабалки изображены на рисунке 2.7. Конкретные значения размеров для каждого испытанного образца приводятся в таблицах в разделе с результатами динамических испытаний.

Для обработки экспериментальной информации, полученной при изгибе деревянной балки по сигналам с мерных стержней, используются следующие соотношения:

Скорость прогиба балки вычисляется по формуле:

$$V_b(t) = c_I \cdot (\varepsilon^I + \varepsilon^R) - 0.5 \cdot c_T(\varepsilon_1^T + \varepsilon_2^T)$$

Прогиб балки определяется соотношением:

$$U_b(t) = \int_0^t V_b(\tau) d\tau$$

Сила, действующая на образец со стороны нагружающего стержня вычисляется по формуле:

$$F(t) = E_I \cdot S_I \cdot \left(\varepsilon^I - \varepsilon^R\right)$$

Сила, действующая на образец со стороны опорных стержней, определяется формулами:

$$F_1(t) = E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon_1^T$$
$$F_2(t) = E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon_2^T$$

здесь $\varepsilon^{I}, \varepsilon^{R}$ – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне, $\varepsilon_{1}^{T}, \varepsilon_{2}^{T}$ – прошедшие импульсы деформации, зарегистрированные в первом и втором опорных стержнях, соответственно, c_{I} – стержневая скорость звука материала нагружающего стержня, c_{T} – стержневая скорость звука материала опорного стержней, E_{I}, S_{I} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения нагружающего мерного стержня, E_{T}, S_{T} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорных мерных стержней.

Согласно ГОСТ Р 56805-2015 при соблюдении определенных геометрических размеров образца-балки и параметров испытательной установки с использованием схемы на трехточечный изгиб можно определить характеристики материала:

• предельное растягивающее напряжение при изгибе:

$$\sigma^{\scriptscriptstyle \rm M} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

• предельную деформацию при изгибе:

$$\varepsilon^{\mu} = \frac{6 \cdot \omega_{Fmax} \cdot h}{L^2}$$

• модуль упругости:

$$E^{\mu} = \frac{\Delta F \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta \omega}$$

где F_{max} – сила, при которой происходит разрушение балки, L – расстояние между опорами, b – ширина балки, h – высота балки, ω_{Fmax} – прогиб, соответствующий максимальной силе.

Испытываемые в рамках настоящей работы балки не удовлетворяют требованиям указанного ГОСТ в силу ряда причин, связанных с особенностями испытания древесины при ударном нагружении с применением техники мерных стержней. Большой пролет не позволит получить состояние динамического равновесия балки в процессе нагружения из-за волновых процессов, а слишком маленькое сечение сделает невозможным регистрацию усилия, передаваемого на опоры.

В связи с этим, дополнительно к стандартным инструментам тензометрии, параметры динамического деформирования балки регистрировались с использованием высокоскоростной видеорегистрации (рисунок 2.8) и вычислялись с помощью методики корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation, DIC).





Рисунок 2.8 – Видеорегистрация процесса динамического изгиба балки Для определения прогиба балки выбирались точки вблизи нагружающего стержня (точка Р0, рисунок 2.9) и опорных стержней (точки Р1 и Р2, рисунок 2.9). Временная зависимость прогиба балки рассчитывалась по формуле:

$$U^{DIC}_{b}(t) = U^{P0}(t) - 0.5 \cdot (U^{P0}(t) + U^{P1}(t))$$

где $U^{P0}(t)$, $U^{P1}(t)$ и $U^{P2}(t)$ – вертикальные смещения точек P0, P1 и P2 соответственно.



Рисунок 2.9 – Положение точек для определения прогиба балки

Пример временных зависимостей смещения точек балки и рассчитанного прогиба балки приводится на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Временные зависимости смещения точек балки и прогиба

На рисунке 2.11 приводится сравнение прогибов балки посчитанного по приведенным выше формулам Кольского (синяя сплошная линия) и определенного с использованием метода DIC по данным высокоскоростной съемки (оранжевая пунктирная линия). Видно, что прогиб, полученный методом DIC заметно меньше. Это связано с тем, что опосредованные измерения смещений с использованием мерных стержней фактически не регистрируют смещения точек балки, а лишь смещения самих стержней. Поскольку древесина является мягким материалом, имеют место локальные промятия балок в местах воздействия на них металлических стержней. В силу несовершенств также имеет место выборка зазоров. Это приводит к отличию величин прогибов, измеряемых разными способами. Следует отметить, что максимальная разница прогибов составляет порядка 0.2 мм.



Рисунок 2.11 – Сравнение прогибов балки, расчитанных по формулам Кольского и с использованием DIC

Рисунок 2.12 иллюстрирует сравнение смещений нагружающего и опорного стержней (сплошные линии), рассчитанные по формулам Кольского, а также смещения соответствующих точек балки (P0, P1 и P2), определенные методом DIC (пунктирные линии).





Видно, что наибольшее расхождение наблюдается в смещениях опорных точек, определенных этими двумя методами, в то время как смещение нагружающего стержня разными способами определяется практически одинаково.

Для оценки предельных характеристик прочности материала по данным скоростной видеорегистрации в каждый момент времени определялись поля деформаций (нормальные компоненты тензора деформации в направлении оси балки). Пример полей деформации, на кадре, предшествующем зарождению трещины, показан на рисунке 2.13. Видно, что на нагружаемой поверхности имеют место деформации сжатия, а на противоположной – деформации растяжения. Для дальнейшего анализа и оценки предельной деформации

разрушения регистрировалось распределение величины деформации вдоль линии, показанной на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Поля деформаций в нагруженной балке



Рисунок 2.14 – Кинограмма процесса деформирования балки

Распределения деформаций по толщине образца на разные моменты времени представлены на рисунке 2.15. Можно отметить, что эти распределения являются линейными вплоть до момента, предшествующего разрушению, а нейтральная ось балки совпадает с её геометрическим центром.



Рисунок 2.15 – Распределения деформаций по толщине образца на разные моменты времени

Особенностью метода корреляции цифровых изображений является то, что поля перемещений и деформаций определяются не для всей поверхности образца. На части поверхности вблизи границы эти величины не вычисляются (рисунок 2.13).



Рисунок 2.16 – Разбиение поверхности образца на зоны при работе метода DIC

Это происходит потому, что, как и в методе конечного элемента, деформации рассчитываются в центральных точках элементарных изображений - паттернов (желтые прямоугольники на рисунке 2.16), которые используются для отслеживания перемещений. Паттерны не могут быть слишком маленькими, так как рисунок в каждой области должен быть уникальным и узнаваемым для алгоритма. Поэтому у границы поверхности образца образуется зона, ширина которой равна половине размера элементарного паттерна, в которой параметры деформирования неизвестны. Поскольку разрушение зарождается на поверхности образца, для деформации корректной оценки предельной разрушения необходимо проводить экстраполяцию. Для автоматизации процесса обработки экспериментальной информации, полученной в эксперименте на динамический трехточечный изгиб балок, создана специальная программа. Общий вид окна программы показан на рисунке 2.17. В левой части расположены

инструменты для обработки данных, полученных методом корреляции цифровых изображений, в правой – методом тензометрии и мерных стержней.



Рисунок 2.17 – Вид интерфейса программы обработки

На рисунке 2.18 показан результат экстраполяции деформаций из области, обрабатываемой методом DIC, на границу образца.



Рисунок 2.18 – Экстраполяций деформаций на границу образца

Можно отметить, что максимальная растягивающая деформация по области составляет 2.9 %, а экстраполированное значение равно 3.3 %. Повторяя подобную процедуру для каждого кадра, можно рассчитать временную зависимость экстраполированной величины деформации для каждого момента времени. Для оценки условий нагружения определяется значение скорости деформации путем дифференцирования временной зависимости деформации. Пример

соответствующих графиков приводится на рисунке 2.19. Можно отметить, что скорость деформации в данном виде испытаний не является постоянной.



Рисунок 2.19 – Временные зависимости экстраполированной деформации и скорости деформации



Рисунок 2.20 иллюстрирует обработку сигналов с мерных стержней.

Рисунок 2.20 – Обработка сигналов с мерных стержней

В левой части приводятся рассчитанные силы, действующие на образец со стороны мерных стержней. Буквами обозначены: F_i – сила, связанная с падающим импульсом деформации, F_r - сила, связанная с отраженным импульсом деформации, F_{t1} и F_{t2} – силы, измеренные на первом и втором опорном мерных стержнях, F_1 – сила, действующая на балку со стороны нагружающего стержня, $F_2 = F_{t1} + F_{t2}$. Можно отметить, что условие динамического равновесия ($F_1 = F_2$) достаточно хорошо выполняется на протяжении практически всего процесса

нагружения образца, за исключением интервала в области максимальной силы. Целесообразно силу определять по сигналу с опорных стержней. В правой части рисунка 2.20 показаны временные зависимости прогиба и силы.

2.3 Методика определения коэффициента Пуассона

Для определения коэффициента Пуассона требуется проводить нагружение образца в одном направлении и регистрировать деформации образца в направлении нагружения и в перпендикулярном направлении. В настоящей работе для динамического нагружения образцов древесины используется техника мерных стержней, реализованная на установке РСГ-60. Для разгона ударника и формирования импульса сжимающей нагрузки применяется газовая пушка калибра 57 мм. Для регистрации процессов, протекающих в образце в осевом направлении, используются дюралевые мерные стержни диаметром 60 мм и длиной по 1.5 м. История изменения осевой деформации образца определяется по тензометрическим сигналам с нагружающего мерного стержня по формуле Кольского:

$$\varepsilon_{x}(t) = -\frac{2C}{L_{0}}\int_{0}^{t} \varepsilon^{R}(t) \cdot dt$$

где C – стержневая скорость упругой волны в мерном стержне, L_0 – начальная длина образца, $\varepsilon^R(t)$ – отраженный от образца импульс упругой деформации в нагружающем стержне.

Для измерения радиальной компоненты деформации образца во времени $\varepsilon_r(t)$ используется трехканальный интерферометр миллиметрового диапазона, разработанный в НИИС им. Ю.Е. Седакова. Интерферометр работает на длине волны 3,2 мм. Несомненными достоинствами радионтерферометра при испытаниях структурно-неоднородных тел является достаточно большая область засветки, что позволяет нивелировать влияние структурной неоднородности поверхности и получать интегральное перемещение на выделенном участке боковой поверхности образца. Радиоинтерферометр нетребователен к качеству обработки отражающей поверхности и может работать с поверхностью, на которой имеются неоднородности 0,1-0,2 мм.

Измерения проводились с использованием двух независимых каналов (рисунок 2.21), облучающих диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца для исключения смещения образца как целого из измерения радиальной раздачи. Схема расположения антенн радиоинтерферометра для раздельной регистрации радиальных перемещений диаметрально противоположных зон деформации представлена на рисунке 2.21.



Рисунок 2.21 – Схема регистрации радиальной компоненты деформации радиоинтерферометром

Передающие 1 и приемные 2 антенны располагались в прямоугольных блоках из вспененного полиэтилена, размещенных на станине установки РСГ-60 в горизонтальной плоскости, проходящей через ось ствола пушки на одинаковом расстоянии от оси мерных стержней и образца. Антенная система радиоинтерферометра представляет собой «открытые концы» диэлектрических волноводов, по которым зондирующее излучение выводится из интерферометра и отраженный от образца сигнал возвращается обратно в интерферометр. Диэлектрические волноводы помещены в гибкую цилиндрическую оболочку из вспененного полиэтилена на всём протяжении от интерферометра. Передающая 1 и приемная 2 антенны размещались в блоке из вспененного полиэтилена под фиксированным углом α к нормали к боковой поверхности образца в точке облучения (рис. 2.21).

Радиоинтерферометр миллиметрового диапазона – устройство, предназначенное для измерения перемещений физических объектов, способных отражать радиоволны. Данный интерферометр реализует схему Майкельсона в радиодиапазоне. Прибор включает в себя высокостабильный генератор электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона, передающие и приемные антенны, приемное устройство и блок регистрации данных (осциллограф). Высокочастотные элементы схемы соединены волноводным трактом.

Интерферометр работает следующим образом. Создаваемые генератором непрерывные электромагнитные колебания постоянной мощности на фиксированной частоте через элементы волноводного тракта поступают на передающую антенну и излучаются в окружающую среду. Отраженный сигнал от движущегося объекта принимается приемной антенной и через волноводы поступает на вход приемного устройства. На другой вход приемного устройства с генератора подается опорное колебание с частотой равной частоте излучаемой электромагнитной волны. Связь параметров интерферограммы с параметрами движения исследуемого объекта обусловлена эффектом Доплера. Текущая фаза и мгновенная частота интерферограммы соответственно несут информацию о перемещении и мгновенной скорости исследуемого объекта, от которого произошло отражение излучаемой интерферометром радиоволны.

Зондирующий сигнал имеет длину волны $\lambda = 3,2$ мм в вакууме (частота 93,75 ГГц). Отраженный от поверхности радиосигнал имеет частоту, отличающуюся на величину доплеровского сдвига. В радиоинтерферометре принятый сигнал, содержащий доплеровский частотный сдвиг, с помощью гетеродина переносится на промежуточную частоту 2 ГГц, после чего регистрируется осциллографом Tektronix DPO 7254C с частотой дискретизации 20 ГГц. Одновременно регистрируется опорный сигнал (также перенесенный на промежуточную частоту) с генератора интерферометра на несмещенной частоте. Далее обработка полученных сигналов (опорного и отраженного, содержащего информацию о допплеровском сдвиге частоты) производится программно. Это позволило избежать применения аппаратного детектирования сигналов и вносимых им дополнительных погрешностей.

Определение величины разности фаз между опорным и отражённым сигналами для каждой точки записи осуществлялось методом численной оптимизации. Обозначим разность фаз для *n*-й точки через φ_n . Изменение φ_n от точки к точке несёт информацию о перемещении отражающей поверхности. Так как зондирование осуществляется под углом α к направлению перемещения (рис. 2.21), то справедливо следующее равенство, связывающее изменение φ_n от точки к точке и перемещение объекта Δx_n

 $\varphi_n - \varphi_{n-1} = 2k\Delta x_n \cos \alpha$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Для определения смещения боковой поверхности от начального положения производится суммирование полученных величин Δx_n

 $X_n = \Sigma \Delta x_n$.

2.4 Выводы по главе 2

Для проведения экспериментального исследования динамического деформирования и разрушения образцов древесины выбрано несколько экспериментальных схем, базирующихся на технике мерных стержней. Следует отметить следующее:

1. Метод Кольского является одним из наиболее распространенных методов динамических испытаний материалов различной физической природы. Напряженнодеформированное состояние образца в этом методе близко к однородному, а деформирование образца аналогично квазистатическому, но происходящему с высокими скоростями деформации. На основании закона сохранения импульса Кольским были получены параметрические соотношения для нахождения напряжения, деформации и скорости деформации в образце на основе импульсов деформации, зарегистрированных в стержнях.

2. Модификация метода Кольского при испытании образца в жесткой обойме позволяет проводить динамические эксперименты в условиях пассивного ограничения радиальной деформации при объемно-напряженном состоянии и одномерной деформации. Используя обойму, изготовленную из различных материалов, к образцу можно применять широкий диапазон нагрузок, верхняя граница которого перекрывается с нижней границей плосковолновых экспериментов.

3. При испытаниях древесины на сжатие имеет место большая разница в акустических импедансах ρC мерных стержней и образца. Используемая в работе модификация метода Кольского дает возможность испытывать образцы при многократном нагружении в одном эксперименте. При этом длина опорного стержня должна быть в несколько раз больше длины нагружающего стержня, чтобы обеспечить неискаженную регистрацию прошедшего сигнала в нескольких циклах нагружения. В результате образец во время испытания подвергается многократному нагружению, накапливая в каждом цикле определенную деформацию.

4. Современные средства регистрации быстропротекающих процессов, такие как метод корреляции цифровых изображений по данным высокоскоростной видеорегистрации, позволяют определять параметры деформирования образцов при ударном нагружении. В работе на основе этого метода предложена и реализована схема определения предельной деформации разрушения при динамическом трехточечном изгибе балок. Определение предельной деформации при этом проводится методом экстраполяции полей деформаций, определенных методом корреляции цифровых изображений. Условия нагружения (скорость деформации) оцениваются путем дифференцирования историй изменения деформаций в точке зарождения трещины.

5. Для определения коэффициента Пуассона предложена и реализована новая схема, в которой нагружение образца и регистрация его осевой деформации производится с использованием схемы разрезного стержня Гопкинсона, а радиальная деформация образца определяется с использованием радиоинтерферометра. Измерения проводятся с использованием двух независимых каналов, облучающих диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца для учета возможного смещения образца как целого при нагружении. Указанная схема позволяет оценить разницу свойств древесины в радиальном и окружном направлениях.

57

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

При выборе демпфирующего материала одним из критериев сравнительной оценки выступают удельные показатели, определяемые отношением механической характеристики (предел прочности, модуль упругости, ударная вязкость, твердость) к ее плотности. Удельные характеристики имеют особое значение, когда от конструкции требуется высокая прочность и способность поглощать удар (зависит от модуля упругости) при малом весе.

Удельная прочность при сжатии и статическом изгибе у хвойных пород оказывается выше, чем у лиственных. Значительно выше у хвойных пород и удельная жесткость (особенно у древесины ели и пихты). По остальным свойствам удельные характеристики у древесины лиственных пород выше, чем у хвойных.

По удельной прочности древесина вполне конкурентоспособна с другими современными материалами, а по удельной жесткости (вдоль волокон) во много раз превосходит полимеры. Кроме того, древесные материалы обладают высокой способностью поглощать энергию удара. При длительной нагрузке древесина ведет себя как весьма податливое тело, деформации которого велики, однако, при кратковременной нагрузке, соответствующей удару, древесина обладает свойствами достаточно жесткого малодеформируемого тела.

Древесина имеет сравнительно малую плотность, хорошо механически обрабатывается, является доступным и достаточно дешевым материалом.

Для проведения достоверного численного анализа конструкций контейнера, использующих в своем составе древесину в качестве демпфирующих ударные нагрузки компонентов, необходимы надежные математические модели, учитывающие ее сложную структуру. Чтобы получить соответствующие модели, должно быть исследовано механическое поведение древесины при нагружении под разными углами по отношению к направлению волокон с учетом различных типов НДС.

Чтобы достоверно описывать поведение древесины в динамически нагруженной конструкции, модель ее должна иметь в своем составе достаточно большой набор параметров, учитывающих деформационную анизотропию и зависимость прочностных свойств от скорости деформации, плотности, температуры и влажности. Например, в руководстве по программнорасчетному комплексу LS-DYNA (Manual for LS-DYNA Wood material model 143. Publication No. FHWA-HRT-04-097, 2007), модель древесины имеет 29 параметров.

Дерево – сложный изменчивый материал, однако, определенные тенденции очевидны. Жесткостные и прочностные свойства изменяются в зависимости от ориентации волокон между продольным, радиальным и тангенциальным направлениями. Жесткость и прочность являются наибольшими в направлении волокна. Тангенциальное и радиальное направления являются поперечными к направлению волокна и, соответственно, касательными и перпендикулярными к годовым кольцам. Для целей моделирования различия между тангенциальным и радиальным направлениями не всегда значительны. Поэтому в руководстве LS-DYNA используется термин, «перпендикулярно волокнам» (когда между радиальным и тангенциальным направлениями не делается различия) и «параллельно волокнам», чтобы описывать продольное направление.

Типы разрушения и измеренные соотношения напряжения и деформации древесины зависят от направления нагрузки относительно волокон и типа нагрузки (растяжение, сжатие или сдвиг). Соотношения напряжений и деформаций древесины при растяжении вдоль и поперек волокон, а также при сдвиге обычно являются линейными до хрупкого разрушения, тогда как отношения напряжений и деформаций древесины при сжатии вдоль и поперек волокон обычно являются нелинейными и вязкими.

В данной главе представлены результаты динамических испытаний некоторых пород древесины таких как: липа, осина, береза, секвойя и сосна. Динамические испытания проводились с использованием традиционного метода Кольского при испытаниях на сжатие, также была использована его модификация для испытаний в жесткой ограничивающей обойме. Для достижения большей степени деформации использовался режим многократного нагружения образца в одном эксперименте. Указанные схемы испытаний подробно описаны в предыдущей главе. Для оценки параметров анизотропии получены диаграммы деформирования пород древесины при нагружении под разными углами по отношению к волокну. По результатам экспериментов получены динамические диаграммы деформирования, определены предельные прочностные и деформационные характеристики, энергия разрушение пород древесины в разных типах испытаний, в зависимости от скорости деформации и угла вырезки образцов относительно направления волокон.

3.1 Экспериментальная установка и исследуемые образцы

В качестве методики динамических испытаний был использован метод Кольского при испытаниях на сжатие и его модификации для испытаний в жесткой обойме и трехточечном изгибе балок [153, 154]. Схема установки, реализующей классический метод Кольского представлена на рисунке 3.1. Применяются методики и схемы, описанные в главе 2. В качестве регистрирующей аппаратуры используются высокоскоростные цифровые осциллографы, а также высокоскоростная камера. Управление и синхронизация отдельных элементов (нагружающие устройства, регистрирующая аппаратура и пр.) осуществляется микроконтроллером.

59



Рисунок 3.1. Схема установки

Механические свойства древесины зависят от плотности, влажности и даже для одной породы оказываются неодинаковыми, это следствие различных условий произрастания деревьев. Кроме того, на механические характеристики (упругие модули, пределы прочности при растяжении и сжатии) существенное влияние могут оказать непостоянство свойств в разных частях ствола, различная влажность, пористость, ширина годичных колец и т.д. В настоящей работе испытывалась древесина комнатной влажности (7-10%) при нормальной температуре.

Для исследования динамических свойств с помощью метода Кольского для испытаний как правило изготавливаются образцы цилиндрической формы. Для обеспечения равномерного нагружения образца необходимо обеспечить плотное его прилегание к торцам мерных стержней. Следовательно, к образцам предъявляется ряд требований: гладкость поверхностей образцов; параллельность торцевых поверхностей и перпендикулярность оси образца; рекомендуемое соотношение диаметра к длине образца от 1 до 2, снижающее эффект трения и инерции.

Для изготовления образцов древесины различных пород из заготовок массива (как правило в виде балок) с помощью распиловочного станка с диском диаметром 350 мм нарезались пластины нужной толщины, из которых с помощью настольно-сверлильного станка HC-12M и коронок по дереву Bosch высверливались образцы необходимых диаметров (рисунок 3.2).

60



Рисунок 3.2. Изготовление образцов древесины

После этого рабочие поверхности образцов шлифовались с помощью наждачной бумаги с малой зернистостью. Далее производились замеры диаметра и длины каждого образца, измерялась масса для определения плотности и производились замеры влажности двумя контрольными измерителями (игольчатым ИВ 1-1 и поверхностным ВИМС-2 влагомерами). По окончанию подготовительных работ образцы нумеровались и упаковывались в полиэтиленовые пакеты с замком (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3. Подготовка образцов перед испытаниями

Образцы сосны для испытаний на одноосное сжатие изготавливались диаметром 18 мм и длиной 10 мм, а для испытаний в обойме в условиях ограничения радиальной деформации образцы изготавливались диаметром 20 мм с расчетом плотного прилегания образца к внутренним стенкам обоймы.

Для динамических испытаний липы были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 20 мм и длиной 10 мм, вырезанными из массива древесины под углом 0⁰ и 90⁰ по отношению к оси ствола дерева. Оба материала имели влажность около 7%.

Для исследования свойств березы были изготовлены образцы диаметром ~20 мм и высотой ~10 мм с различным направлением вырезки по отношению к оси ствола дерева. Углы между направлением приложения нагрузки и направлением расположения волокон составляли 0° и 90°. Влажность образцов составляла ~10%.

Были испытаны образцы секвойи диаметром ~20 мм и высотой ~10 мм с углами вырезки 0°, 30° и 90°. Влажность этих образцов составляла 7%.

Образцы осины для испытаний были также изготовлены в виде таблеток диаметром ~20 мм и высотой ~10 мм с различным направлением вырезки по отношению к оси ствола дерева. Влажность образцов составляла ~10%. Для оценки степени анизотропии углы между направлением приложения нагрузки и направлением расположения волокон составляли 0⁰ и 90⁰. Испытания проводились в условиях одноосного напряженного состояния.

Дли испытаний образцов сосны на трехточечный изгиб с помощью распиловочного станка нарезались отдельные бруски в трех направлениях волокон, длиной 100 мм, с размером сторон сечения 30-40 мм. Для бесконтактного измерения деформаций методом DIC на бруски наносилась черно-белая спекл структура – случайная интерференционная картина (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4. Образцы для испытаний на трехточечный изгиб

3.2 Результаты экспериментальных исследований хвойных и лиственных пород древесины при сжатии

В работе был проведен цикл экспериментальных исследований прочностных свойств древесины наиболее распространенных лиственных (береза, осина, липа), а также хвойных (сосна) пород деревьев. Испытания проводились при комнатной температуре.

Механические свойства древесины даже для одной породы оказываются неодинаковыми, что является следствием различных условий произрастания деревьев. Кроме того, на механические характеристики, такие как упругие модули, пределы прочности при растяжении и сжатии, существенное влияние могут оказать непостоянство свойств в разных частях ствола, различная влажность, пористость, ширина годичных колец и т.д. Некоторые статические характеристики пород древесины, аналогичных испытанным, заимствованные в Интернете, представлены в таблицах 3.1-3.4.

Порода	Плотность,	Модуль упругости:		Предел прочности, МПа при:				
древесины	г/см ³	вдоль поперек		растяжении	сжатии	изгибе	растяж.	растяж.
		волокон,	волокон,	вдоль	вдоль		радиал.	тангенц.
		MIIa	MIIa	волокон	волокон			
Береза	0,62	16100	1124	161	46,7	100	5,2	3,3
Осина	0,5	11500		120	36,5	77	6,9	4,3
Липа	0,54			116	39,8	68	8,0	4,6
Сосна	0,55	12100	1126	101	41,2	79	10,8	6,0

Таблица 3.1. Физико-механические свойства различных пород древесины

Порода	Модуль упругости на			Модуль упругости на			Модуль
	сжатие, МПа			растяжение, МПа			упругости при
	E_a	E_t	E_r	E_a	E_t	E_r	изгибе, МПа
Береза	16100	520	670	18300	490	670	15400
Сосна	12100	570	690	12100	500	580	12600

Таблица 3.2. Модули упругости при разных видах нагружения

Таблица 3.3. Коэффициенты поперечной деформации основных пород дерева

Порода древесины	μ_{ra}	μ_{ta}	μ_{ar}	μ_{tr}	μ_{at}	μ_{rt}
Береза	0,58	0,45	0,043	0,81	0,04	0,49
Дуб	0,43	0,41	0,07	0,83	0,09	0,34
Сосна	0,49	0,41	0,03	0,79	0,037	0,038
Ель	0,44	0,411	0,017	0,48	0,031	0,025

Таблица 3.4. Модуль сдвига основных пород древесины

Порода	G_{ra} (MПa)	G_{ta} (MIIa)	G_{rt} (MIIa)
Береза	1510	870	230
Дуб	1380	980	460
Сосна	1210	780	
Ель			50

Для оценки степени анизотропии проведены исследования механических свойств древесины лиственных пород (береза, осина и липа) и хвойных пород (сосна) при сжатии на образцах, вырезанных из брусьев вдоль и поперек волокон.

Все динамические испытания были проведены на установке РСГ-20 в лаборатории динамических испытаний НИИМ ННГУ с использованием комплектов мерных стержней диаметром 20 мм, изготовленных из алюминиевого сплава Д16Т и высокопрочной мартенситно-стареющей стали.

Следует отметить, что древесины практически всех исследованных пород имеет определенную «вязкость», проявляющуюся наиболее ярко при разгрузке: после окончания действия падающего импульса отраженный и прошедшие импульсы долго не возвращаются на нулевую линию, поэтому зарегистрировать полную разгрузку образцов при испытаниях не удается.

С целью идентификации полученных динамических диаграмм всем образцам испытуемых материалов были присвоены уникальные коды, состоящие из трехзначного условного кода марки материала и отделенного от него дефисом двузначного номера выполненного испытания данной марки материала. Кроме того, некоторые образцы (сохранившие свою целостность после одного цикла нагружения) нагружались второй раз (а отдельные - даже и третий раз) с увеличивающейся с каждым разом амплитудой нагружающей волны. К номеру таких образцов добавляется после слеша номер их нагружения.

Полученные в результате испытаний диаграммы представлены в работе в виде набора динамических кривых «напряжение-деформация» и соответствующих зависимостей изменения скорости деформации в процессе деформирования. Сплошными линиями на рисунках разными цветами показаны диаграммы $\sigma_s \sim \varepsilon_s$, а пунктирными линиями соответствующих цветов в нижней части рисунков показаны зависимости $\dot{\varepsilon}_s \sim \varepsilon_s$.

В таблицах с результатами испытаний каждого материала приведены определенные по полученным диаграммам средние модули нагрузочной и разгрузочной ветвей, модуль участка упрочнения. Ввиду нелинейности этих участков, определение их крутизны достаточно условно. Кроме того, по диаграммам в каждом эксперименте определены максимальные достигнутые напряжения.

3.2.1 Результаты динамических испытаний березы

Программой исследований влияния различных факторов на динамическое поведение образцов березы была предусмотрено следующее:

- исследование ортотропии березы путем проведения динамических испытаний на сжатие при комнатной температуре образцов, вырезанных вдоль и поперек направления волокон в условии одноосного напряженного состояния при различных скоростях деформации;
- исследование влияния вида напряженно-деформированного состояния на поведение березы при сжатии поперек волокон при нормальной температуре.

Условия проведения динамических испытаний образцов березы при нагружении вдоль и поперек волокон представлены в таблице 3.5.

Береза сухая	Плотность	Парам	Остат.						
Номер	образца,	Длина	Давление	Скорость	деформация,				
эксперимента	г/см ³	ударника,	в КВД,	ударника,	%				
		MM	атм	м/с					
	Вдоль волокон								
307-01	0.636	200	2	-	7				
307-02	0.624	200	2	28.4	8				
307-03	0.625	200	2	28.4	6				
307-04	0.623	200	2	29.4	9				
307-05	0.62	200	2	29.4	11				
307-06/1	0.644	300	1	15.9	0.4				
307-06/2	0.644	300	1	16.4	0.5				
307-06/3	0.644	300	1	16.7	0.3				
307-06/4	0.644	300	1.2	17.9	1.2				
307-06/5	0.644	300	1.7	21.7	6.7				
307-07	0.628	200	1.6	27	5.3				
Поперек волокон									
311-01/1	0.643	300	0.4	-	1				
311-01/2	0.643	300	1.2	-	10				
311-02/1	0.655	300	0.3	6.7	0.4				
311-02/2	0.655	300	1.4	19.6	13.5				
311-03	0.653	300	1.4	19.6	13.1				
311-04	0.658	300	1.4	19.2	12.5				
311-05	0.66	300	2.5	27	26.5				
311-06	0.657	300	2.5	32.2	23.3				

Таблица 3.5. Условия проведения испытаний образцов березы

Осмотр образцов, нагруженных вдоль волокон, позволил установить следующее. Все образцы после нагружения имеют продольные трещины на наружной поверхности и очень небольшое перекашивание продольного сечения, а образцы 307-01–307-05 кроме того еще и продольные трещины в центральной части. Образцы при нагружении с разными скоростями деформации либо сохранили свою видимую целостность (с небольшими повреждениями), либо разрушились на отдельные фрагменты.



Рисунок 3.5 – Диаграммы деформирования березы при нагружении вдоль волокон при сохранении целостности образца и в случае его разрушения

На рис. 3.5 показаны диаграммы деформирования при скорости деформации ~400 с⁻¹ и сохранении целостности образца, а также в случае разрушения при скорости деформации более 1000 с⁻¹. Нагрузочные ветви диаграмм нелинейны и практически совпадают, разгрузочная ветвь в случае сохранения целостности идет лишь немного круче. Можно сказать, что предел прочности материала составил ~110 МПа. Тот факт, что образцы при бо́льших скоростях деформации показали бо́льшие амплитуды напряжений, является эффектом перегрузки [155], когда за счет очень быстрого приложения нагрузки к образцу он не успевает разрушиться из-за ограниченной скорости распространения волны сжатия в образце. Считать достигнутое в испытании напряжение ~160 МПа пределом прочности материала нельзя, потому что, хотя в реальной конструкции эффект перегрузки также может иметь место, но элемент при этом потеряет свою целостность и далее нести нагрузку уже не сможет.



Рисунок 3.6 – Повторяемость результатов при испытаниях березы при нагружении вдоль волокон в близких условиях нагружения

66

О повторяемости результатов в номинально одинаковых условиях нагружения можно судить по рис.3.6. Обращает на себя внимание резкий спад напряжений при достижении ими максимума и более пологий участок дальнейшей релаксации, на котором происходит частичное или полное разрушение образца. Несмотря на явное нарушение целостности образца при этом и образование трещин (подтверждается осмотром после испытаний), разгрузочная ветвь диаграмм после окончания нагрузочного импульса имеет практически тот же наклон, что и в случае сохранения образцом целостности.

На рис. 3.7 представлены диаграммы при многократном нагружении одного и того же образца. Диаграммы расположены на оси деформации условно: каждая последующая диаграмма начинается от деформации, достигнутой при предыдущем нагружении. Видно, что после 4-го цикла нагружения, во время которого образец частично потерял свою целостность, произошла деградация свойств (потеря сплошности), в результате чего крутизна нагрузочной и разгрузочной ветвей уменьшилась.





Для образцов с нагружением вдоль волокон после достижения предельных напряжений наблюдается значительная релаксация напряжения, т.е. снижение несущей способности с ростом степени деформации, вызванная, возможно, микроразрушениями связей между волокнами и потерей ими устойчивости. Спад диаграммы деформирования и нелинейный характер разгрузки являются свидетельством разрушения образцов, что подтверждается их осмотром после испытания.

Далее представлены результаты испытаний образцов березы поперек волокон. Характер полученных диаграмм в этом случае сильно отличается от диаграмм при нагружении вдоль

волокон: материал показывает практически идеальную «текучесть», а прочностные свойства значительно ниже.

Результаты испытаний образцов поперек волокон представлены на рис. 3.8 - 3.9 и в таблице 3.6. На представленных диаграммах отсутствует участок релаксации напряжений: диаграммы идут практически горизонтально. Разгрузочные ветви имеют приблизительно ту же крутизну, что и нагрузочные, что особенно хорошо видно при повторных испытаниях.



Рисунок 3.8 – Повторные нагружения образцов березы поперек волокон



Рисунок 3.9 – Диаграммы деформирования образцов березы поперек волокон при разных скоростях деформации

Сравнение поведения образцов березы вдоль и поперек волокон показано на рис. 3.10. При нагружении образцов березы вдоль волокон материал имеет существенно более высокую прочность, чем при нагружении поперек волокон, поэтому величина отраженной волны и,

соответственно, степень достигнутой деформации образцов в первом случае будет меньше, чем во втором.



Рисунок 3.10 – Диаграммы деформирования березы вдоль и поперек волокон

Береза сухая	Модуль	Модуль	Модуль	Максимальное					
Номер	нагрузочной	участка	ветви	напряжение,					
эксперимента	ветви, МПа	упрочнения,	разгрузки,	МПа					
_		МПа	МПа						
	Вдоль волокон								
307-01	27000	-700	22000	152					
307-02	9400	-500	7000	163					
307-03	9000	-600	10100	152					
307-04	10500	-700	10700	162					
307-05	8300	-500	9000	161					
307-06/1	8500	1400	11100	110					
307-06/2	9200	1400	13200	110					
307-06/3	9000	2600	13000	109					
307-06/4	9600	-500	10100	110					
307-06/5	5400	-500	5100	106					
307-07	9700	-800	10400	132					
Поперек волокон									
311-01/1	570	-12	570	17					
311-01/2	610	-9	520	18					
311-02/1	500	100	570	17					
311-02/2	580	3	450	18					
311-03	790	15	460	21					
311-04	640	0	730	20					
311-05	590	2	920	19					
311-06	450	4	1000	20					

Таблица 3.6. Результаты испытаний образцов березы

Образцы после нагружения поперек волокон характеризуются неравномерной (овальной) раздачей с выдавливанием материала в направлении поперек волокон. Кроме того,

осевая деформация этих образцов весьма неравномерна: на краях образцов в зоне выдавливания материала коэффициент восстановления формы значительно выше, поэтому центральная часть образца в направлении малой оси эллипса (в который превращается поперечное сечение образца) продавлена значительно больше, чем периферийные зоны в направлении большой оси эллипса, т.е. остаточная деформации образцов имеет характер продавливания боковой поверхностью цилиндра.

Далее представлены результаты динамических испытаний на сжатие поперек волокон при комнатной температуре образцов березы воздушной влажности для исследования влияния вида НДС на механические свойства. Динамические испытания на сжатие проведены на установке с разрезным стержнем Гопкинсона по методике Кольского при скорости деформации ~2000 с⁻¹. Для оценки влияния вида напряженно-деформированного состояния на поведение материала, образцы в форме таблеток диаметром ~20 мм и длиной ~10 мм испытывались при сжатии в условиях двух типов НДС: одноосного напряженного состояния (свободная поперечная раздача образца при осевом сжатии), а также в условии одноосной деформации (образец в жесткой обойме, препятствующей его радиальной раздаче) [9]. Необходимо отметить, что образец помещался в ограничивающую обойму с небольшим зазором между его боковой поверхностью и внутренней поверхностью обоймы равным ~0,1мм, поэтому НДС, близкое к объемному, наступало только после выбора этого зазора. До выбора зазора, как будет показано ниже, поведение образца в обойме было аналогично поведению образца при испытаниях без ограничений его радиальной деформации, т.е. в условиях одноосного напряженного состояния.

Кроме двух указанных типов испытаний при одноосном напряженном состоянии и одноосной деформации проводился цикл испытаний при некотором промежуточном напряженно-деформированном состоянии, когда роль податливой ограничивающей обоймы играл сам материал. При этом деревянная пластина размером 80х80х10 мм размещалась между торцами мерных стержней диаметром 20 мм и подвергалась динамическому сжатию. Такое локальное нагружение древесного массива подобно его нагружению в реальной конструкции, однако, жесткость ограничивающего радиальную раздачу материала невелика и при больших амплитудах нагрузки материал, окружающий сжимаемую зону, разрушается и эффект ограничения теряется. Зато влияние эффекта ограничения проявляется, в отличие от режима испытаний в обойме, с самого начала нагружения.

Для этих трех типов НДС получены динамические диаграммы деформирования с регистрацией дополнительных циклов нагружения, что позволило оценить деградацию прочностных свойств..

В ходе испытаний получены традиционные осциллограммы, на которых зарегистрированы два луча: с первого (нагружающего) мерного стержня (верхний луч) и со второго (опорного) мерного стержня (нижний луч). Пример такой осциллограммы приведен на рис. 3.11(а). При этом на верхнем луче зафиксированы и отмечены маркерами падающий $\varepsilon^{I}(t)$ и

отраженный $\varepsilon^{R}(t)$ импульсы, а на нижнем луче - прошедший через образец импульс $\varepsilon^{T}(t)$. На рисунке 3.11(б) представлены те же импульсы в режиме синхронизации с добавлением суммарного импульса $\varepsilon^{R}+\varepsilon^{T}$. Хорошо заметно, что отраженный и прошедший импульсы не возвращаются на "нулевую" линию после окончания процесса нагружения, т.е. процесс разгрузки образца древесины имеет очень большую длительность.



Рисунок 3.11 – Традиционная регистрация импульсов в мерных стержнях при испытаниях древесины

Кроме того, хорошо видно, что, амплитуда отраженного импульса составляет значительную величину (до 90% от амплитуды исходной падающей волны). Причина такого факта - очень большая разница в акустических импедансах *рС* мерных стержней и образца. В результате, как было отмечено в разд. 2.1.3, образец подвергается нескольким циклам "нагрузка-разгрузка" с постепенно уменьшающейся амплитудой. Пауза между циклами равна времени распространения импульса по первому стержню туда и обратно. Некоторое представление об этом процессе дает осциллограмма (рис. 3.12), полученная при более медленной развертке осциллографа.



Рисунок 3.12 – Исходные импульсы деформаций при регистрации дополнительных циклов нагружения образца

Хорошо видно, что образец во время одного испытания нагружается много раз, получая в каждом цикле определенную деформацию. При обычной регистрации измеряется только основной первый цикл нагружения, а последующие циклы игнорируются. Это является причиной того, что при испытаниях материалов с малым акустическим импедансом расчетная остаточная деформация, получаемая в результате обработки импульсов только одного первого цикла нагрузки (при традиционной регистрации), не совпадает с фактической остаточной деформацией, измеренной у сохранивших свою относительную целостность образцов.

Как было отмечено выше, исследование поведения материалов при циклическом нагружении является весьма актуальной проблемой, поскольку в реальной ситуации при высокоскоростном воздействии на элементы различных конструкций вполне возможны многократные циклические нагружения из-за отражений и интерференции волн. Поэтому представляет интерес регистрация таких дополнительных циклов нагружения образца и построение соответствующих динамических диаграмм.

Для возможности проведения испытаний при циклическом нагружении образцов и регистрации повторных циклов нагружения в ходе одного опыта необходимо исключить возврат от заднего торца опорного стержня к образцу прошедшей через него волны сжатия ε^t , которая может оказать влияние на процесс нагружения в последующих циклах и исказить регистрацию последующих циклов нагружения [153]. Для этого длина опорного стержня должна быть увеличена по сравнению с длиной нагружающего стержня во столько раз, сколько циклов нагружения предполагается регистрировать. Время регистрации процесса испытания должно быть соответственно увеличено.

Был проведен цикл динамических испытаний образцов березы при сжатии поперек нормальной температуре в условиях различных типов напряженноволокон при деформированного состояния. При каждом режиме проводилось по 3-5 испытаний, результаты которых усреднялись. Амплитуда нагружающей волны, прямо пропорциональная скорости ударника, определяла величину скорости деформации, при которой происходило деформирование образцов.

Ниже на рис. 3.13а изображены образцы в форме таблеток, испытанные при одноосном напряженном состоянии. Разрушение таких образцов сопровождалось отколом на боковой поверхности и расщеплением вдоль волокон.

Образцы, испытанные в жесткой ограничивающей обойме, подвергались сжатию в условиях одноосной деформации. Образцы, сохранившие при нагружении видимую целостность, при извлечении из обоймы разваливались на осколки.

72
Кроме образцов в форме таблеток были проведены испытания прямоугольных пластин, вырезанных из доски. Характерный вид таких фрагментов после испытания приведен на рис. 3.136. Каждый фрагмент испытывался по два раза. Деформирование фрагмента доски характеризовалось смятием волокон в поперечном направлении в зоне контакта фрагмента и мерных стержней. Разрушение фрагмента происходило в волнах разгрузки в направлении перпендикулярном направлению волокон.



Рисунок 3.13 – Образцы березы после испытания: а) в форме таблеток, б) фрагмент доски Как было указано ранее, вследствие малой акустической жесткости р*C* древесины, образец подвергается большому числу циклов нагружения с постепенно убывающей амплитудой, а его пластическая деформация достигает большой величины. Использование мерных стержней длиной 1 м и 3 м позволило неискаженно зарегистрировать 3 цикла нагрузки образца в одном эксперименте и точно определить, в каком цикле нагружения произошло разрушение.

В результате испытаний для каждого режима получены параметрические зависимости $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$, а также диаграммы деформирования $\sigma(\varepsilon)$ с соответствующими историями изменения скорости деформации $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$.

На рис. 3.14 показан набор полученных усредненных диаграмм в результате испытаний без обоймы в условии одноосного напряженного состояния, а на рис. 3.15 показан аналогичный набор при сжатии в обойме в условии одноосной деформации. Далее на рис. 3.16 показан аналогичный набор усредненных диаграмм, полученных при нагружении образца в виде фрагмента доски (комбинированное напряженно-деформированное состояние).



Рисунок 3.14 – Диаграммы деформирования березы при сжатии в условии одноосного напряженного состояния (без обоймы)



Рисунок 3.15 – Диаграммы деформирования березы при сжатии в условии одноосного деформированного состояния (в обойме)

74

На каждом рисунке показаны полученные параметрические кривые $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$ при трех циклах нагружения и итоговые диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ и $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$. Истории изменения скорости деформации показаны в нижней части графиков пунктирными линиями, а соответствующая ось расположена справа. Как указывалось выше, процесс разгрузки образца имеет большую длительность, и зарегистрировать его полностью при существующей длине мерных стержней не представляется возможным.



Рисунок 3.16 – Диаграммы деформирования березы при сжатии в условии комбинированного напряженно-деформированного состояния (фрагмент доски)

Как видно, при сжатии березы поперек волокон в условии одноосного напряженного состояния амплитуда напряжения при повторных циклах уменьшается незначительно, т.е. в материале происходит дальнейшее сжатие, но с постепенно убывающей величиной полученной деформации в каждом последующем цикле. При сжатии древесины в массиве доски наоборот, амплитуда напряжения при повторных циклах увеличивается, но степень полученной деформации в каждом последующем цикле также уменьшается. При сжатии образца в обойме (в условии одноосной деформации) амплитуда напряжения во втором цикле нагружения увеличивается, а в последующих циклах уменьшается. Степень достигнутой деформации при трех зарегистрированных циклах нагружения для любого типа НДС составляет 40-45%. При дальнейших циклах образцы получают дополнительную деформацию, но достоверно зарегистрировать эти циклы невозможно.

Анализ полученных трехцикловых импульсов $\sigma(t)$ и $\dot{\epsilon}(t)$ в испытаниях с любым типом НДС позволил сделать заключение, что в течение трех зарегистрированных циклов нагрузки разрушение образца не произошло, следовательно, образцы разрушились в последующих циклах нагрузки, зарегистрировать которые не представилось возможным.

На рис. 3.17 представлено сравнение диаграмм деформирования при трех исследованных типах напряженно-деформированного состояния: 1 – одноосном напряженном состоянии, 2 – одноосном деформированном состоянии, 3 – комбинированном напряженно-деформированном состоянии. Пунктирными линиями в нижней части графиков показаны соответствующие кривые изменения скорости деформации.



Рисунок 3.17 – Сравнение динамической сжимаемости березы при различных типах напряженно-деформированного состояния

Хорошо видно, что при сжатии поперек волокон поведение березы в условии одноосного напряженного состояния (кривая 1) подобно идеальной пластичности: материал при каждом цикле сжатия получает определенную степень деформации (25%, 17% и 10%). При испытании образцов в жесткой ограничивающей обойме (кривая 2) из-за наличия небольшого зазора (~0.1мм) между боковой поверхностью образца и внутренней поверхностью обоймы состояние одноосной деформации наступает только при достижении образцом деформации ~10%, а до этой деформации материал ведет себя аналогично режиму одноосного напряженного состояния. После выбора зазора наблюдается значительный рост развиваемого в образце напряжения, вследствие ограничения его боковой деформации. В третьем цикле нагружения роста напряжения не наблюдается вследствие недостаточной амплитуды нагружающей волны в этом цикле. При сжатии фрагмента доски И условии комбинированного напряженнодеформированного состояния (кривая 3) влияние массива древесины, ограничивающего поперечную деформацию образца, вызывает интенсивный рост напряжения с самого начала нагружения в первом цикле нагрузки, зато в последующих циклах амплитуда достигнутого напряжения меньше, чем в условии одноосной деформации.

Таким образом, поведение березы при нагружении образцов с поперечным направлением волокон сильно зависит от вида напряженно-деформированного состояния, что должно быть учтено при идентификации модели древесины, используемой в слоистой защитной конструкции, подверженной динамическим нагрузкам.

3.2.2 Результаты динамических испытаний осины

Условия проведения динамических испытаний образцов осины с вырезкой вдоль и поперек направления волокон приведены в таблице 3.7. Реализована серия испытаний при малой скорости деформации и сохранении видимой целостности образцов и при большой скорости деформации и разрушении образцов.

Осина сухая	Плотность	Парал	метры нагрух	жения	Остат.
Номер	образца,	Длина	Давление	Скорость	деформация,
эксперимента	г/см ³	ударника,	в КВД,	ударника,	%
		MM	атм	м/с	
		Вдоль вс	локон		
312-01/1	0.521	300	0.6	11.1	-
312-01/2	0.521	300	0.6	11.1	-
312-01/3	0.521	300	0.8	13.3	-
312-02/1	0.51	300	0.6	10.5	-
312-02/2	0.51	300	0.7	10.9	-
312-02/3	0.51	300	-	19.6	-
312-03	0.512	300	2	23.3	8
312-04	0.514	300	2	23.3	7.6
312-05	0.515	200	2.5	-	14.4
312-06	0.507	200	2.3	-	11.2
		Поперек в	волокон		
316-01/1	0.538	300	0.4	5.2	5
316-01/2	0.538	300	0.4	8.7	3.5
316-01/3	0.538	300	0.4	7.7	2
316-02/1	0.508	300	0.4	7.1	5
316-02/2	0.508	300	0.4	7.5	2.2
316-03	0.473	300	0.6	11.8	13.4
316-04	0.509	300	-	15.1	22.5
316-05	0.446	200	2.5	32	49
316-06	0.484	200	2.4	31.2	42
316-07	0.401	200	2.5	32	52
316-08	0.507	200	2	28.5	35

Таблица 3.7. Условия проведения испытаний образцов осины

Образцы 312-01 и 312-02 нагружались троекратно с малой скоростью деформации для того, чтобы оценить деградацию свойств. Результаты этих испытаний приведены на сводном графике 3.18. Как и для сходных рисунков с повторными испытаниями для березы, диаграммы расположены на оси деформаций условно. Образец 312-02 в третьем цикле нагружения за счет увеличения скорости деформации доведен до незначительных разрушений. Участок релаксации при этом имеет небольшой отрицательный наклон, разгрузочная ветвь лишь немного положе, чем при "упругом" деформировании. Разрушающее напряжение составляет 90 МПа.



Рисунок 3.18 – Повторные нагружения образцов осины вдоль волокон при малых скоростях деформации

Нагрузочные ветви диаграмм нелинейны, разгрузочные ветви близки к линейным и имеют в 3 раза большую крутизну. Большая нелинейность диаграмм в самом начале нагружения связана, по-видимому, с недостаточной плоскостностью торцов образца, прилегающих к торцам мерных стержней.



Рисунок 3.19 – Влияние скорости деформации на диаграммы деформирования осины вдоль

волокон

Влияние скорости деформации на диаграммы деформирования осины вдоль волокон показано на рис. 3.19. Можно отметить довольно большой разброс модулей нагрузочной ветви и близкие значения модулей разгрузки (кроме диаграммы образца 312-06 при самой большой скорости деформации). В исследованном диапазоне скоростей деформаций от 1000 до 2500 с⁻¹ заметного влияния скорости деформации на прочностные и деформационные свойства осины не наблюдается.

Все образцы кроме 312-05 и 312-06 после испытаний сохранили свою целостность в центральной части, наблюдались лишь незначительные продольные трещины на боковой поверхности образцов.

Как и для березы, образцы осины с вырезкой поперек волокон показали значительно более низкие прочностные свойства, чем с продольной вырезкой.



Рисунок 3.20 – Исследование деградации прочностных свойств осины при нагружении поперек волокон

Для оценки деградации свойств осины при нагружении поперек волокон образец 316-01 нагружался с малой скоростью три раза при сохранении своей видимой целостности, причем зарегистрированы только первые циклы нагружения, а образец 316-02 нагружался дважды, но регистрировались по два цикла нагружения. Полученные диаграммы этих опытов, показанные на рис. 3.20, расположены на оси деформации условно.

Влияние скорости деформации на диаграммы деформирования осины вдоль волокон показано на рис. 3.21. Приведены диаграммы опытов с регистрацией вторых циклов нагружения, что позволило оценить деформативные свойства осины поперек волокон до значительных степеней деформации.

Видно, что во вторых циклах нагружения образцов имеет место релаксация напряжений вследствие их разрушения. Тем не менее, разгрузочные ветви диаграмм демонстрируют некоторое восстановление формы образцов (упругая разгрузка).



Рисунок 3.21 – Влияние скорости деформации на диаграммы деформирования осины поперек волокон

Как уже упоминалось выше, прочностные и деформативные свойства древесины изменяются не только от ориентации направления нагружения относительно направления волокон, но также и от места в теле ствола, из которого изготовлены образцы для испытаний. Поэтому образцы древесины всегда демонстрируют некоторый разброс механических свойств при испытаниях. Дополнительный вклад в разброс может вносить качество торцевых поверхностей образцов, поскольку шероховатость торцов, особенно сильная у образцов с поперечной вырезкой, с одной стороны, искажает картину деформирования образца, а с другой, - провоцировать локальные микроповреждения и неоднородность НДС в образце.

Пример разброса механических свойств, полученных при деформировании в одних условиях образцов осины поперек волокон, показан на рис. 3.22.



Рисунок 3.22 – Разброс свойств осины поперек волокон

Сравнение поведения образцов осины вдоль и поперек волокон показано на рис. 3.23. Как и для березы, при нагружении образцов осины вдоль волокон материал показал

существенно более высокую прочность и меньшую деформативность, чем при нагружении поперек волокон.



Рисунок 3.23 – Разброс свойств осины поперек волокон

Модули характерных участков диаграмм и величины максимальных достигнутых напряжений, определенные по полученным диаграммам образцов осины вдоль и поперек волокон, приведены в таблице 3.8.

Осина сухая	Молуль	Модуль участка	Модуль ветви	Максимальное
Номер	нагрузочной	vпрочнения, МПа	разгрузки. МПа	напряжение.
эксперимента	ветви, МПа	5 1	1 1 2 9	МПа
1	,			
	1770	Вдоль волокон	10000	
312-01/1	4550	0	12080	77
312-01/2	3830	0	12450	75
312-01/3	4350	130	12300	87
312-02/1	3450	-12	10360	68
312-02/2	3880	-21	11050	78
312-02/3	2940	-93	8880	96
312-03	3210	-110	9090	94
312-04	3310	-100	8960	97
312-05	2410	-220	11360	99
312-06	4450	-170	9010	104
		Поперек волокон		
316-01/1	620	45	1680	8
316-01/2	120	41	740	9
316-01/3	60	0	1550	6
316-02/1	280	29	670	6
316-02/2	110	20	370	7
316-03	210	21	330	6
316-04	210	9	350	7
316-05	80	9	760	6
316-06	140	12	380	8
316-07	100	4	-1040	5
316-08	120	-12	1400	13

Таблица 3.8. Результаты испытаний образцов осины

3.2.3 Результаты динамических испытаний липы

С использованием описанной выше методики были проведены динамические испытания липы, в результате которых были получены динамические диаграммы деформирования, а также предельные прочностные и деформационные характеристики образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон. Условия проведения испытаний представлены в таблице 3.9.

Материал	Код	Пар	раметры об	разца	Параметры нагружения				
	материала	длина,	диаметр,	плотность,	давление	длина	скорость		
	и номер	MM	MM	г/куб.см	в КВД,	ударника,	ударника,		
	испытания				атм	ММ	м/с		
Липа вдоль	296-05/1	9.6	19.6	0.5	0.6	250	13.66		
волокон	296-05/2	9.44			2.5	250	29.19		
	296-06	9.81	19.7		1.5	250	22.65		
	296-07/1	9.93	19.66		0.5	250	11.6		
	296-07/2	9.84			0.5	250	8.5		
	296-07/3	9.81			2.5	250	?		
	296-08		19.72	0.5	2.4	250	28.3		
Липа	296-01	9.93	19.65		1.4	250	23.1		
поперек	296-02	9.89	19.73		1	250	18.6		
волокон	296-03	9.98	19.69		1.3	250	20		
	296-04	9.82	19.7		0.7	250	14.6		

Таблица 3.9. Условия проведения испытаний образцов липы

Динамические диаграммы деформирования липы при одноосном напряженном состоянии при нагружении с разными скоростями деформации вдоль волокон представлены на рис. 3.24. Как обычно, сплошными линиями показаны зависимости напряжения в образце от его деформации $\sigma \sim \varepsilon$, а пунктирными линиями (в нижней части диаграмм) истории изменения скорости деформации $\dot{\varepsilon} \sim \varepsilon$ (соответствующая ось расположена справа).



Рисунок 3.24 – Диаграммы деформирования липы при нагружении вдоль волокон

Полученные диаграммы имеют нелинейный характер, особенно на начальном участке нагружения. Максимальные напряжения в экспериментах были достигнуты для скорости деформации 1500 1/с и составляет величину 106 МПа. Следует отметить, что, несмотря на увеличение скорости деформации с 900 1/с (опыт 296-05) до 1400 1/с (295-06), предельные амплитуды напряжений практически равны между собой, что, по-видимому, вызвано разбросом свойств образцов за счет их неоднородности. В экспериментах 296-06 и 296-08 после достижения своих максимальных значений напряжения начинают интенсивно убывать, а скорости деформации – возрастать, что свидетельствует о процессе разрушения структуры образца. После опыта в образце 296-08 имелись видимые разрушения, совпадающие с направлением приложения нагрузки.

Образец 296-07 после первого цикла нагружения был деформирован еще дважды (рис. 3.25). Во втором цикле нагрузки амплитуда достигнутых напряжений была на 4 МПа больше, чем в первом, что может быть следствием некоторого "упрочнения" образца. В третьем цикле скорость деформации достигала величины 2000 1/с, максимальное значение напряжений составило 100 МПа. В этом эксперименте также наблюдается спад напряжений: происходит как бы "разупрочнение" образца. Этот процесс, видимо, связан с разрушением целостности связей между волокнами древесины. После опыта образец имел видимые разрушения (трещины), направленные вдоль волокон.



Рисунок 3.25 – Диаграммы повторных нагружений липы вдоль волокон

Динамические диаграммы деформирования липы при испытании поперек волокон представлены на рис. 3.26. В этих экспериментах скорость деформации изменялась от 1300 1/с до 2000 1/с. В экспериментах 296-04 и 296-02 величины максимальных напряжений близки друг другу, после достижения максимума они остаются практически постоянными. Некоторое "упрочнение" наблюдается для образца 296-01.



Рисунок 3.26 – Диаграммы деформирования липы при нагружении поперек волокон

Необходимо отметить, что все испытанные образцы после опытов имели видимые разрушения, наиболее сильное разрушение наблюдалось в образцах 296-02 - 296-04. Образцы разрушались по двум противоположным боковым поверхностям. Разрушения имели вид треугольных выщербин вдоль волокон и поперек направления приложения нагрузки. Такой характер разрушения может быть связан с наличием трения по торцам образца и образованием конуса стесненной деформации. Величины напряжений, при которых происходило разрушение, изменялось от 8.6 до 9.5 МПа. Здесь также необходимо отметить, что, хотя образец в процессе нагружения начинает разрушаться, разгрузка близка к линейной, а ее модуль практически равен модулю нагрузки.



Рисунок 3.27 – Диаграммы повторного нагружения липы поперек волокон

Образец 296-03 был подвергнут повторному нагружению со скоростью примерно в два раза большей, чем в первом цикле (1800 1/с и 3400 1/с). На рис. 3.27 показаны (расположенные условно на оси деформации) диаграммы этих испытаний. Следует отметить факт, что после достижения сжимаемым образцом степени деформации ~25% отмечается рост напряжений при

84

дальнейшем сжатии, вызванном, по-видимому, сменой механизма деформирования с переупаковки волокон и выборки пористости на сжатие уплотненного материала, который оказывает этому процессу значительное сопротивление.

Хорошо видно, что при втором нагружении деформированного образца модуль нагрузочной ветви существенно меньше, чем при первом нагружении.

Совместное представление характерных диаграмм деформирования липы при нагружении вдоль и поперек волокон показано на рис. 3.28. Хорошо видно, что липа, как и остальные исследованные породы древесины, имеет существенно меньшую прочность и бо́льшую деформативность при нагружении поперек волокон, чем при нагружении вдоль волокон, что должно учитываться численной моделью.



Рисунок 3.28 – Диаграммы деформирования липы при нагружении вдоль и поперек волокон Полученные в результате испытаний параметры диаграмм липы представлены в таблице 3.10.

Материал	Код	Па	араметры диагр	рамм	Остаточн.
	материала	Модуль	Модуль	Модуль	деформация
	и номер	нагрузки,	упрочнения,	разгрузки,	ооразца, %
	испытания	МΠа	МПа	МПа	
Липа	296-05/1	5166	1004	9619	1.67
вдоль	296-05/2	5235	-166	4850	15.04
волокон	296-06	4090	-266	8518	7.34
	296-07/1	4707	2704	9837	0.90
	296-07/2	5535	2125	9534	0.30
	296-07/3	5313	-378	5127	18.45
	296-08	4050	-386	3827	13.20
Липа	296-01	413	10	409	12.39
поперек	296-02	414	2	366	14.76
волокон	296-03				17.23
	296-04	441	-3	392	7.94

Таблица 3.10. Результаты испытаний образцов липы

3.2.4 Результаты динамических испытаний секвойи

В экспериментах при одноосной деформации была оценена степень анизотропии секвойи путем раздельного измерения двух ортогональных составляющих радиального напряжения в образце. Для этой цели на боковой поверхности ограничивающей обоймы были приклеены два независимых тензодатчика (рисунок 3.29). Они позволяют отдельно регистрировать два ортогональных радиальных компонента напряжения и оценивать степень анизотропии древесины.







Вырезка образцов была под углами 0°, 30° и 90° к направлению волокон.

Рисунок 3.30 — Статические свойства секвойи

Результаты статических испытаний секвойи в условиях одноосного напряженного состояния представлены на рисунке 3.30. Хорошо видно, что наибольшую прочность и

наибольший модуль нагрузочной ветви имеют образцы с вырезкой 0°, а наименьшие показатели присущи образцам с углом вырезки 90°.



Рисунок 3.31 – Поведение секвойи при одноосной деформации (сплошные линии) и при одноосном напряженном состоянии (пунктирные линии)

По результатам проведенных экспериментов был получен набор динамических кривых напряжения-деформации с учетом многоциклового нагружения. Они получены при различных видах напряженно-деформированного состояния образцов секвойи под разными углами между направлением нагрузки и направлением древесных волокон (рисунок 3.31). В условиях одноосного напряженного состояния прочностные свойства секвойи выше, а деформативные меньше, чем в условиях одноосной деформации. Результаты показывают сильную анизотропию секвойи. Эти результаты могут быть использованы для параметрической идентификации модели дерева как анизотропного материала.



Рисунок 3.32 - Свойства секвойи при различных углах вырезки образцов

Представляет интерес сравнение полученных динамических свойств секвойи с результатами аналогичных испытаний, полученными другими авторами. На рисунке 3.32 показаны диаграммы напряжение-деформация для углов вырезки 0°, 30° и 90°, предоставленными Р.Греем (ЛАНЛ). К сожалению, в этих исследованиях в результате обычного однократного нагружения образца не была достигнута значительная степень его деформации. При нагружении вдоль волокон амплитуда нагружающей волны была недостаточна для разрушения образца, поэтому оценить прочность секвойи в этом случае невозможно.

На рисунке 3.33 для трех углов вырезки показаны статические кривые напряжениедеформация, а также динамические кривые, полученные независимо в НИИМ ННГУ и ЛАНЛ. Видно хорошее соответствие результатов. Несомненным достоинством результатов, полученных в НИИМ ННГУ, можно считать большую степень достигнутой деформации вследствие использования многоцикловой системы нагружения.



Рисунок 3.33 – Статические и динамические свойства секвойи

Два независимых тензодатчика на боковой поверхности ограничивающей обоймы позволили оценить неравномерность радиального расширения образца: в одной плоскости

обойма удлиняется, а в другой - сокращается. Соответственно, в образце компоненты радиального напряжения σ_2 и σ_3 могут иметь разную полярность (рисунок 3.34). Эти данные должны использоваться в сложной модели древесины с учетом различной природы поведения материала не только при сжатии и растяжении, но и в отношении ориентации волокон относительно направления нагрузки.



Рисунок 3.34 – Анизотропия свойств секвойи в условиях одноосной деформации

Обнаружено, что боковое ограничение сильно влияет на напряженно-деформированное поведение секвойи, подавляя трещины вдоль волокон и тем самым замедляя разрушение.

Количественная оценка динамических свойств древесины будет использоваться для оснащения моделей древесины, учитывающих ее анизотропные свойства. Такие модели необходимы для инженерного численного моделирования и оптимизации защитных конструкций с использованием древесины в качестве демпфирующего материала.

3.2.5 Результаты динамических испытаний сосны

Из хвойных пород динамические свойства исследовались только на образцах сосны. Для испытаний были изготовлены образцы в виде таблеток диаметром 20 мм и толщиной 10 мм с вырезкой вдоль и поперек волокон.

Условия проведения динамических испытаний образцов сосны с вырезкой вдоль и поперек направления волокон приведены в таблице 3.7. Реализована серия испытаний при малой скорости деформации и сохранении видимой целостности образцов и при большой скорости деформации и разрушении образцов.

Осина сухая	Плотность	Парам	иетры нагрух	кения	Остат.
Номер	образца,	Длина	Давление	Скорость	деформация,
эксперимента	г/см ³	ударника,	в КВД,	ударника,	%
		MM	атм	м/с	
302-01/1	0.404	200	0.5	13.2	1
302-01/2	0.404	200	0.5	12.2	1
302-02/1	0.486	200	0.7	15.9	2.5
302-02/2	0.486	200	0.7	16	1.5
302-03/1	0.404	200	0.7	15.9	2.5
302-03/2	0.404	200	0.7	15.9	2
302-03/3	0.404	200	0.7	15.9	2
302-04	0.408	200	2	28.7	23
302-05	0.408	200	2	29.1	22
302-06	0.404	300	0.8	16.9	2.5
		Поперек в	олокон		
306-01/1	0.433	300	0.4	?	4
306-01/2	0.433	300	0.4	6.8	4.5
306-02	0.489	300	0.6	11	12.2
306-03	0.438	200	2	28.6	33
306-04	0.434	200	2	287	47
306-05	0.458	300	0.6	10.6	14.8
306-06	0.442	200	2	28.7	49

Таблица 3.11. Условия проведения испытаний образцов сосны

Образцы с вырезкой вдоль волокон в процессе испытаний подвергались, как однократному нагружению (эксперименты 04, 05, 06), так и повторным нагружениям (эксперименты 01, 02, 03), поскольку целостность их после первого цикла нагружения в

большей или меньшей степени сохранялась. Диаграммы повторных нагружений условно располагаются на оси деформации последовательно за соответствующими диаграммами предыдущего нагружения. На рис. 3.35 показаны диаграммы деформирования двух образцов (01 и 02) при двукратном нагружении каждого с близкими скоростями деформации. Оба образца даже после второго цикла нагружения сохранили свою видимую целостность. Наблюдается довольно значительный разброс свойств, причиной которого может быть вырезка образцов из различных зон ствола: отличаются как радиусы годовых колец, так и плотности образцов.



Рисунок 3.35 – Повторное нагружение образцов 302-01 и 302-02 в случае сохранения ими своей целостности



Рисунок 3.36 – Трехкратное нагружение одного образца 302-03 при его незначительных повреждениях и однократное нагружение образца 302-05 при его разрушении

На рис. 3.36 представлены результаты сравнения трехкратного нагружения одного образца (эксп.302-03) в идентичных условиях испытания (средняя скорость деформации во всех

опытах равна ~800 1/с) с диаграммой однократного нагружения (эксп.302-05) при разрушении образца (скорость деформации ~1800 1/с).

Образец 03 после третьего нагружения имеет равномерную радиальную раздачу с превышением диаметра поперечного сечения над диаметром мерных стержней и небольшое равномерное продавливание торцами стержней центральной части образца. Наблюдается также небольшое перекашивание прямоугольного продольного сечения образца в направлении годичных колец. Выступающие за пределы площади стержней части образца имеют незначительную остаточную деформацию, образуя вокруг продавленной центральной части кольцевой венчик, связь его с центральной частью довольно слабая из-за трещины вдоль образующей по периметру образца.

Совсем иначе ведет себя сосна при нагружении поперек волокон. Поскольку ее прочностные свойства очень низкие, амплитуда прошедшего импульса тоже очень маленькая, поэтому практически весь падающий импульс отражается от образца, а затем нагружает его вторично, и так много раз с постепенно убывающей амплитудой. В связи с этим повторные импульсы вызывают дополнительное деформирование образцов. В серии проведенных испытаний использовались мерные стержни с соотношением длин 1:3, что позволило провести достоверную регистрацию трех циклов нагружения образца в одном эксперименте и получить значительную степень сжатия образца.



Рисунок 3.37 – Двукратное нагружение образца 306-01 с регистрацией трех циклов нагрузки при каждом нагружении

На рис. 3.37 показаны диаграммы испытаний образца 306-01 нагруженного дважды при трехцикловом нагружении в каждом испытании. Видно, что прочность материала при первых двух циклах одинаковая и составляет 5.5 МПа. В третьих циклах амплитуда достигнутого напряжения существенно повышается, что, по-видимому, связано с увеличением плотности

образца древесины в процессе его сжатия в первых двух циклах и увеличением сопротивления дальнейшему сжатию.

Как отмечалось ранее, образцы древесины могут иметь достаточно большой разброс свойств из-за неконтролируемости места вырезки из ствола дерева и возможном наличии в зоне вырезки дефектов структуры. Примером такого разброса служит рис. 3.38, где показаны диаграммы трехцикловых нагружений двух разных образцов сосны, вырезанных поперек волокон и испытанных при одинаковой скорости деформации. После достижения образцами степени сжатия 20% третий цикл нагружения обоих образцов показал существенный прирост прочности материала.

Подобный эффект увеличения прочности древесины после сжатия до определенной степени поперек волокон (в радиальном направлении) отмечался в ряде работ, например, в [76] осевая деформация, после которой наблюдается рост напряжений в древесных материалах, составляет от 10% (для белой ели) до 35% (для осины и серой сосны).



Рисунок 3.38 – Разброс свойств сосны поперек волокон при нагружении с одной скоростью деформации

Подобный разброс можно наблюдать на рис. 3.39, где показаны диаграммы трех опытов с трехцикловым нагружением в каждом опыте, полученные при близких величинах скорости деформации. Здесь два образца (306-04 и 306-06) показали схожие свойства: в двух первых циклах нагружения обе диаграммы имеют незначительный отрицательный наклон и только в третьих циклах обеих диаграмм наблюдается увеличение напряжений. Совершенно иной характер диаграмм можно видеть у образца 306-03: в каждом цикле нагружения происходит увеличение развиваемого в образце напряжения, что не характерно для древесины поперек волокон.





Полученные в результате испытаний параметры диаграмм сосны представлены в таблице 3.12.

Сосна сухая	Модуль	Модуль участка	Модуль ветви	Максимальное
Номер	нагрузочной	упрочнения,	разгрузки,	напряжение,
эксперимента	ветви, МПа	МПа	МПа	МПа
		Вдоль волокон	·	
302-01/1	3540	72	10500	74
302-01/2	3640	54	10300	71
302-02/1	6420	2350	6400	91
302-02/2	4980	-360	10400	92
302-03/1	3980	-160	8500	78
302-03/2	4440	-520	7600	81
302-03/3	2990	-390	6400	64
302-04	2650	-320	4300	83
302-05	3320	-480	18200	84
302-06	4140	-150	8900	81
		Поперек волокон		
306-01/1	150	-5	-1080	6
306-01/2	76	0	-2400	5
306-02	150	7	-4020	9
306-03	250	21	4270	19
306-04	94	10	-1690	7
306-05	170	5	-2510	6
306-06	120	-6	-1130	6

Таблица 3.12. Результаты испытаний образцов сосны

Для идентификации математической модели поведения сосны проводились обширные экспериментальные исследования поведения образцов сосны.

94

3.2.5.1 Результаты испытания при одноосном сжатии

Высокоскоростные испытания образцов сосны на одномерное сжатие производились в трех направления относительно расположения волокон: вдоль, поперек и под углом в 45 градусов. Эксперименты проводились на установке РСГ-20-1 с мерными стержнями диаметром 20 мм на образцах диаметром 18 мм и длиной 10 мм. При испытании образцов с направлением вырезки вдоль волокон (ВВ) применялись мерные стержни и ударник из дюралюминиевого сплава Д16Т: нагружающий длиной 1,0 м, опорный длиной 2,9 м. При испытаниях образцов поперек волокон (ПВ) и под углом в 45 градусов использовался нагружающий дюралюминиевый стержень Д16Т длиной 1,0 м, а в качестве опорного стержня использовалась дюралюминиевая трубка Д16Т длиной 1,7 м. Длина ударника из сплава Д16Т во всех экспериментах составляла 250 мм. Режимы нагружения подбирались в соответствии с постепенным ростом скорости деформации.

Результаты динамических испытаний образов сосны с направлением вдоль волокон

Цикл динамических испытаний сосны с направлением вырезки образцов вдоль волокон (BB) состоял из четырех скоростных режимов. Параметры испытаний приведены в таблице 3.13.

		c B	Парам	етры обј	разца		Результаты эксперимента								
Режим	Код экспери -мента	Скорост удар. м/	D, мм	S _{п.с.} , мм ²	L, мм	Плот- ность кг/м ³	Макс. напря- жения, МПа	Пред. деф., %	Скорость деформ., 1/с	Время жизни, мкс	Пред. деф., %	КДУ	Оста- точная длина (мм)	Прим.	
	c338-04	7,75	19,67	304	9,8	445	41,07	0,023	133	85	2,3	1,0	9,58	Не разру- шился	
ч.	c338-07	6,9	18,83	278	9,53	501	48,53	0,024	53	98	2,4	1,2	9,45	HP	
1 атм	с338-07(п1)	6,76	18,73	276	9,45	501	47,63	0,015	61	76	1,5	1,2	9,43	HP	
1. P=	с338-07(п2)	7,09	18,83	278	9,44	501	50,01	0,02	60	90	2	1,2	9,44	HP	
	с338-07(п3)	6,79	18,83	278	9,44	501	49	0,013	31	92	1,3	1,2	9,44	HP	
	с338-07(п4)	6,7	18,83	278	9,44	501	47,07	0,018	44	98	1,8	1,1	0	HP	
	c338-01	20,93	19,71	305	10,2	435	87,3	0,069	731	78	6,9	2,1	9,19	$\Pi = 435 \text{ kg/m}^3$	
	c338-06	21,8	18,7	275	9,53	508	92,79	0,039	1010	44	3,9	2,3	8,83		
atm.	c338-08	20	18,73	276	9,43	439	115,8	0,035	749	50	3,5	2,8	0		
. P=2	c338-27	20,82	18,73	276	9,77	452	96,24	0,047	1187	48	4,7	2,3	8,78	HP	
2	c338-28	22,69	18,7	275	9,83	489	111,8	0,044	1145	49	4,4	2,7	8,94	Част.откол (ЧО)	
	c338-29	24,26	18,64	273	9,83	684	96,7	0,016	1697	22,8	1,6	2,3	0	РП	
	c338-02	23,71	19,68	304	10	437	85,29	0,068	1120	61	6,8	2,1	8,67	437 кг/ м ³	
LTM.	c338-34	28,17	18,68	274	10,3	478	83,59	0,043	2062	36	4,3	2,0	0	РП	
j=3 a	c338-35	27,42	18,66	273	9,78	469	114,2	0,042	1941	35	4,2	2,8	0	ЧО	
3. I	c338-36	27,15	18,63	273	10,4	487	106	0,063	1922	46	6,3	2,6	0	ЧО	
	c338-37	26,81	18,67	274	10,3	464	97,74	0,053	1917	41	5,3	2,4	0	РП	
	c338-03	28,39	19,69	304	10,1	435	81,39	0,05	1705	40	5	2,0	0	435 кг/ м ³	
TM.	c338-30	29,29	18,65	273	10,3	406	80,45	0,042	2094	34	4,2	2,0	0	РП	
→ 4 a	c338-31	32,4	18,71	275	9,48	480	83,99	0,025	2682	25	2,5	2,0	0	РП	
4. I	c338-32	30,05	18,68	274	10,4	466	102,5	0,072	1992	50	7,2	2,5	0	РП	
	c338-33	32,01	18,73	276	9,6	482	74,08	0,027	2722	25	2,7	1,8	0	РП	

Таблица 3.13. Параметры испытаний сосны ВВ при динамическом сжатии

Представленный в данной и всех последующих таблицах параметр «Время жизни» определялся по диаграммам $\sigma(t)$, как время достижения напряжениями максимума, после которого начинается интенсивное разрушение образца.

На рисунке 3.40 представлена диаграмма импульсов эксперимента c338-32, демонстрирующая результаты проверки выполнения условий основной предпосылки метода Кольского об однородности напряжений в образце во время испытания. На диаграмме видно, что сумма падающего и отраженного импульсов (пунктирная линия) совпадает с прошедшим импульсом (зеленая линия), что говорит о том, что импульс на торце нагружающего стержня хорошо совпадает с импульсом на торце опорного стержня.

Подобные рисунки, характеризующие проверку выполнения условий однородности НДС в образце по импульсам мерных стержней приведены ниже в соответствующих разделах.



Рисунок 3.40. Диаграмма импульсов эксперимента с338-32

Зарегистрированные в мерных стержнях импульсы деформации синхронизировались во времени. Используя формулы метода Кольского, для каждого эксперимента строились зависимости напряжения от времени $\sigma(t)$, деформации от времени $\varepsilon(t)$ и скорости деформации от времени $\dot{\varepsilon}(t)$. Полученные зависимости синхронизировались во времени для каждого скоростного режима. После исключения параметра времени строилась диаграмма динамического деформирования σ(ε) с отображением по дополнительной вертикальной оси истории изменений скорости деформации $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ для каждого эксперимента. Далее для однотипных режимов нагружения строились осредненные диаграммы зависимости напряжений от деформаций $\sigma(\varepsilon)$ и скорости деформаций от деформаций $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$, а также зависимости напряжений от времени $\sigma(t)$ и скорости деформаций от времени $\dot{\varepsilon}(t)$. Ниже представлены диаграммы испытаний бетонных образцов для каждого отдельного режима, на которых сплошными линиями показаны зависимости напряжения от времени $\sigma(t)$ или напряжения от

деформации $\sigma(\varepsilon)$, вертикальная ось слева – напряжение; пунктирными линиями показана зависимость скорости деформации от времени $\dot{\varepsilon}(t)$ или скорости деформации от деформации $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$, вертикальная ось справа – скорость деформации.

При режиме №1 (рисунок 3.41) средние максимальные напряжения достигли 47 МПа, при средних скоростях деформации порядка 450 с⁻¹. Следует отметить, что в данном режиме образцы сохранили свою целостность, о чем свидетельствует характер диаграммы, а также визуальный осмотр образцов.



Рисунок 3.41 – Динамические диаграммы деформирования при режиме №1

При остальных экспериментальных режимах практически все образцы подверглись разрушению. При режиме №2 средние максимальные напряжения достигли 100 МПа, при средних скоростях деформации порядка 1100 с⁻¹. В третьем режиме средние максимальные напряжения достигли 97 МПа, при средних скоростях деформации порядка 1800 с⁻¹. В четвертом режиме средние максимальные напряжения достигли 84 МПа, при средних скоростях деформации порядка 2250 с⁻¹. Можно отметить, что в зависимости от скорости удара изменяются значения пределов прочности и величина деформации (см. табл. 3.13) с тенденцией небольшого роста. С целью экономии места диаграммы для режимов 2-4 не приводятся. Анализ полученных диаграмм режимов 2-4 показал, что начальные участки имеют характер, близкий к линейному, спадающие ветви диаграмм деформирования и осмотр образцов после проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что образцы в процессе испытания разрушились.

На рисунке 3.42 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации для трех скоростных режимов с доверительными интервалами.



Рисунок 3.42 – Осредненные диаграммы динамического деформирования при сжатии сосны



вдоль волокон

Рисунок 3.43 – Влияние скорости деформации на динамические свойства сосны при сжатии вдоль волокон (зелеными точками отмечены неразрушенные образцы)

98

Для полученных диаграмм отдельных экспериментов выделены характерные точки с максимально достигнутыми напряжениями (σ_{max}), для которых определены значения предельных деформаций (ε_{max}) и время до начала разрушения (τ_{max}). Скорости деформаций ($\dot{\varepsilon}$) были приняты максимальными до начала разрушения образцов, поскольку они меняются в процессе их деформирования (таблица 3.13). Результаты представлены на рисунке 3.43 в виде зависимостей от скорости деформации. Испытания на динамическое сжатие проводились с целью определения влияния изменения скорости деформации на диаграмму деформирования и прочностные характеристики.

Полученные зависимости демонстрируют то, что с ростом скорости деформации наблюдается тенденция небольшого роста максимальных напряжений, также растут и соответствующих им предельные деформации (по линейному закону), а время до начала разрушения снижается (по степенному закону).

Динамическую прочность материала характеризует коэффициент динамического упрочнения (КДУ), определяемый как отношение максимального динамического напряжения к статической прочности сосны при сжатии (41,2 МПа). Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 3.44. Показатель КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации изменяется от 1 до 2,8.



Рисунок 3.44 – Зависимость КДУ от скорости деформации

Результаты динамических испытаний образов сосны с направлением поперек волокон

Цикл динамических испытаний сосны с направлением вырезки образцов поперек волокон (ПВ) состоял из трех скоростных режимов. Параметры испытаний приведены в таблице 3.14.

			П	Іараметр	ы образі	ца	Результаты эксперимента						
Режим	Код экспери -мента	Скорость удар. м/с	D, мм	S _{п.с.} , мм ²	L, мм	Плот- ность	Макс. Напряже ния, Мпа	Пред. Дефор мация	Скоро сть дефор мации, 1/с	Время жизни, мкс	Плот- ность	кду	Приме -чание
	с338-11пв	9,04	18,81	278	10,1	463	5,02	0,053	844	84	463	1,5	РП
TM.	с338-12пв	9,84	18,8	278	10,1	456	5,81	0,055	1264	64	456	1,7	РП
⊨1 a	с338-45пв	9,01	18,65	273	9,84	506	5,1	0,088	1267	92	506	1,5	ЧО
1. F	с338-48пв	9,22	18,75	276	10,2	492	4,33	0,079	1438	85	492	1,3	РП
	с338-49пв	8,79	18,81	278	10	519	6,66	0,06	1090	79	519	2,0	РП
	с338-43пв	13,9	18,66	273	10,1	491	5,55	0,164	1538	109	491	1,6	ЧО
atm.	с338-44пв	14,1	18,65	273	9,52	508	5,84	0,11	2009	77	508	1,7	РП
=1,5 ;	с338-46пв	13,5	18,85	279	9,01	507	6,95	0,069	1730	58	507	2,0	РП
2. P=	с338-47пв	13,4	18,78	277	10	495	6,84	0,065	1613	59	495	2,0	РП
	с338-50пв	13,2	18,68	274	9,94	508	5,74	0,087	1571	76	508	1,7	РП
	с338-39пв	21,1	18,62	272	9,72	493	7,04	0,124	2332	70	493	2,1	РП
м.	с338-40пв	20,5	18,8	278	10,1	478	4,94	0,191	1764	109	478	1,5	ЧО
Р=2 ал	с338-41пв	22,8	18,73	276	9,74	503	5,67	0,226	1554	115	503	1,7	Разру шился
3.	с338-42пв	22,6	18,9	281	9,76	486	5,29	0,141	2419	79	486	1,6	РΠ
	с338-51пв	21,7	18,81	278	9,68	497	7,15	0,231	2322	101	497	2,1	РП

Таблица 3.14. Параметры испытаний сосны ПВ при динамическом сжатии

На рисунке 3.45 представлена диаграмма импульсов эксперимента с338-40пв, демонстрирующая результаты проверки выполнения условия однородности НДС в образце.



Рисунок 3.45. Диаграмма импульсов эксперимента с338-40пв

При режиме №1 средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 5 МПа, при средних скоростях деформации около 1200 с⁻¹.

При режиме №2 (рисунок 3.46) средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 6 МПа, при средних скоростях деформации около 1700 с⁻¹.



Рисунок 3.46 – Динамические диаграммы $\sigma(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$, $\sigma(\varepsilon)$ и $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$, режим №2

При режиме №3 средняя динамическая прочность достигла также порядка 6 МПа, при средних скоростях деформации порядка 2100 с⁻¹.

На рисунке 3.47 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации для трех скоростных режимов с доверительными интервалами.



Рисунок 3.47 – Осредненные диаграммы $\sigma(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$, $\sigma(\varepsilon)$ и $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ при сжатии для всех режимов

На вышеуказанных диаграммах в осях напряжение–деформация (σ~ε) на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей деформации, при достижении предельных значений напряжений, сосна интенсивно разрушается, что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Испытания на динамическое сжатие проводились с целью определения влияния

101

изменения скорости деформации на диаграмму деформирования и прочностные характеристики сосны, приведенные ниже (рисунок 3.48).



Рисунок 3.48 – Влияние скорости деформации на механические свойства сосны с направлением поперек волокон при динамическом сжатии

Полученные зависимости демонстрируют то, что с ростом скорости деформации по линейному закону наблюдается тенденция незначительного роста максимальных напряжений, а соответствующие им предельные деформации имеют существенный рост; время же до начала разрушения незначительно снижается.

Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 3.49.



Рисунок 3.49 – Зависимость КДУ от скорости деформации

Показатель КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации изменяется от 1,3 до 2,1.

Результаты динамических испытаний образов сосны с направлением волокон под углом 45 градусов

Цикл динамических испытаний сосны с направлением вырезки образцов под углом 45 градусов (45 гр.) относительно волокон состоял из трех скоростных режимов. Параметры испытаний приведены в таблице 3.15.

			П	араметр	ы образі	ца	Результаты эксперимента						
Режим	Код экспери -мента	Скорости удар. м/с	D, мм	S _{п.с.} , мм ²	L, мм	Плот- ность	Макс. Напряже ния, Мпа	Пред. Дефор мация	Скоро сть дефор мации, 1/с	Время жизни, мкс	Плот- ность	кду	Приме -чание
	c338-65-45	10,9	18,72	275	18,72	471	9,76	0,038	880	65	3,8	1,4	РП
TM.	c338-67-45	13,8	18,61	272	18,61	493	9,84	0,064	1203	73	6,4	1,4	РП
'=1 a	c338-69-45	12,7	18,78	277	18,78	487	11,77	0,087	1112	100	8,7	1,7	РП
1. P	c338-70-45	10,6	18,94	282	18,94	494	9,69	0,043	883	67	4,3	1,4	HP
	c338-71-45	9,4	18,86	279	18,86	485	12,18	0,054	799	91	5,4	1,7	ЧО
	c338-58-45	16,5	18,68	274	18,68	455	11,26	0,106	1462	96	10,6	1,6	РП
Ţ.	c338-59-45	15,8	18,65	273	18,65	490	11,62	0,105	1459	90	10,5	1,6	ЧО
5 atn	c338-60-45	17,6	18,73	276	18,73	498	7,41	0,146	1704	102	14,6	1,0	РП
P=1,	c338-61-45	18,0	18,69	274	18,69	435	6,28	0,134	1744	94	13,4	0,9	HP
2.	c338-62-45	16,7	18,62	272	18,62	492	8,89	0,116	1590	96	11,6	1,3	ЧО
	c338-64-45	14,5	18,76	276	18,76	489	9,87	0,083	1344	79	8,3	1,4	ЧО
	c338-52-45	22,3	18,71	275	18,71	479	24,41	0,0166	2102	24	1,66	3,4	РП
TM.	c338-54-45	21,3	18,71	275	18,71	662	17,51	0,013	1540	25	1,3	2,5	РП
=2 a	c338-55-45	20,9	18,75	276	18,75	493	13,95	0,014	1520	25	1,4	2,0	РП
3. F	c338-56-45	21,2	18,77	277	18,77	495	18,81	0,015	1884	24	1,5	2,6	РП
	c338-57-45	22,9	20	314	20	487	14,56	0,028	1850	31	2,8	2,1	ЧО

Таблица 3.15. Параметры испытаний сосны 45 гр. при динамическом сжатии

На рисунке 3.50 представлена диаграмма импульсов эксперимента с338-56-45, демонстрирующая результаты проверки выполнения условия однородности НДС в образце.



Рисунок 3.50. Диаграмма импульсов эксперимента с338-56-45

При режиме №1 средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 11 МПа, при средних скоростях деформации около 1000 с⁻¹.

При режиме №2 средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 9 МПа, при средних скоростях деформации около 1500 с⁻¹.

При режиме №3 (рисунок 3.51) средняя динамическая прочность достигла также порядка 18 МПа, при средних скоростях деформации порядка 1800 с⁻¹.



Рисунок 3.51 – Динамические диаграммы $\sigma(t)$ и $\dot{\epsilon}(t)$, $\sigma(\epsilon)$ и $\dot{\epsilon}(\epsilon)$, режим №3

На рисунке 3.52 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации для трех скоростных режимов с доверительными интервалами.



Рисунок 3.52 – Осредненные диаграммы $\sigma(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$, $\sigma(\varepsilon)$ и $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ при сжатии для всех режимов



Рисунок 3.53 – Влияние скорости деформации на механические свойства сосны с направлением волокон под углом 45 гр. при динамическом сжатии

На вышеуказанных диаграммах в осях напряжение–деформация (σ~ε) на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей деформации, при достижении предельных значений напряжений,

105

сосна интенсивно разрушается, что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Влияние изменения скорости деформации на диаграмму деформирования и прочностные характеристики сосны приведены на рисунке 3.53.

Полученные зависимости демонстрируют то, что с ростом скорости деформации по линейному закону наблюдается тенденция роста максимальных напряжений, а соответствующие им предельные деформации снижаются; время до начала разрушения также снижается по степенному закону.

Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 3.54.



Рисунок 3.54 – Зависимость КДУ от скорости деформации

Показатель КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации изменяется от 1 до 3,5.

3.2.5.2 Результаты испытания образцов сосны в обойме

Был проведен цикл динамических испытаний образцов сосны при сжатии вдоль и поперек направления волокон в ограничивающей обойме, оснащенной тензорезисторами для измерения окружной деформации наружной поверхности обоймы, по которым определялся радиальный компонент σ_r напряжения в образце (разд.2.1.2), что в совокупности с продольным компонентом σ_x напряжений, определенным по методу Кольского, позволило получить касательные напряжения в образце и величину развиваемого давления, а также построить диаграмму деформирования в интенсивностях. При сжатии древесины вдоль волокон радиальное расширение образца происходит практически осесимметрично, тогда как при сжатии поперек волокон радиальное расширение образца происходит неравномерно: в направлении вдоль волокон расширение меньше, а в направлении поперек волокон больше, поэтому расширение ограничивающей обоймы происходит неосесимметрично, и исходно превращается в овальную. Поэтому круглая форма обоймы для оценки такого неосесимметричного поперечного расширения образца на наружную поверхность ограничивающей обоймы наклеивалось две питаемые раздельно ортогонально расположенные группы тензорезисторов. Это позволило измерить два ортогональных компонента радиального

напряжения σ₂ и σ₃ (рис. 3.29). В этом случае давление в образце определяется не по формуле (2.12), справедливой для осесимметричного деформирования, а с учетом обоих этих компонентов:

$$P(t) = \frac{\sigma_1(t) + \sigma_2(t) + \sigma_3(t)}{3}.$$

Интенсивность напряжений при этом определяется также с учетом различных компонентов напряжений:

$$\sigma_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{1} - \sigma_{3})^{2}}.$$
(3.1)

Интенсивность деформаций, как и для случая осесимметричного деформирования образца в обойме, определяется только продольным компопонентом деформации:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{\varepsilon_x(t)}{(1+\nu)} \approx \frac{2}{3} \varepsilon_x(t).$$
(3.2)

Результаты динамических испытаний при сжатии в обойме образцов сосны с направлением вдоль волокон

Цикл динамических испытаний сосны с направлением вырезки образцов вдоль волокон состоял из трех скоростных режимов. Во всех испытаниях нагружение системы РСГ производилось стальным ударником длиной 300 мм. Параметры испытаний приведены в таблице 3.16.

		д о	Па	раметр	ы образ	ца		Результаты эксперимента						
Режим	Код экспери- мента	Скорост удар. м/	D, мм	S _{п.с.} , мм ²	L, mm	Плот- ность	Макс. продольн. напряжение, МПа	Макс. рад. напряжение, МПа	Макс. давление, МПа	Макс. интенсивн. напр, МПа	Скорость деформ., 1/с	Макс.кас. напр., МПа		
	j338-11BB	13.32	20.07	316	10.3	539	103.45	3.82	36.88	99.6	842.5	50.81		
	j338-12BB	12.89	19.97	313	10.35	457	94.90	3.17	33.69	91.7	857.1	46.41		
2 aTM	j338-13BB	12.65	19.97	313	10.17	482	84.72	3.17	29.90	81.6	898.8	41.45		
Γ.	j338-14BB	14.04	20.02	314	10.18	494	104.92	3.60 37.10		101.3	1053.0	51.58		
1	j338-15BB	12.04	20.1	317	10.2	456	101.80	1.22	34.74	100.6	735.6	50.58		
	j338-16BB	11.66	20.06	316	10.31	502	113.85	1.63	38.84	112.2	622.9	56.75		
	j338-01BB	17.87	19.76	307	10.33	455	104.13	104.13 5.23		98.9	1339.4	50.01		
TM.	j338-02BB	17.49	19.98	313	10.41	526	106.52	5.71	39.31	100.8	1289.4	50.51		
=4 a	j338-03BB	18.2	20.11	318	10.03	454	101.17	9.94	37.96	91.2	1417.9	48.11		
2. F	j338-04BB	17.35	19.87	310	10.37	532	110.98	5.52	39.87	105.4	1173.9	54.54		
	j338-05BB	17.61	19.82	308	10.33	477	106.61	2.86	37.18	103.7	1256.6	52.95		
	j338-06BB	22.03	20.18	319	10.37	498	95.29	11.46	39.00	83.8	1746.3	42.31		
	j338-07BB	21.84	19.92	311	10.4	472	81.88	6.36	30.78	75.5	1780.9	38.39		
5 aTN	j338-08BB	22.01	19.98	313	10.42	492	93.66	7.43	35.93	86.2	1742.6	44.60		
Щ. Ц	j338-09BB	21.97	20	314	10.43	498	100.74	8.98	39.21	91.8	1713.1	46.46		
<u>е</u>	j338-10BB	21.48	19.97	313	10.43	504	100.19	10.54	40.35	89.7	1643.1	47.70		
	j338-17BB	22.64	20.08	317	10.03	416	78.40	6.33	29.31	72.1	1961.7	37.16		

Таблица 3.16. Параметры испытаний сосны при динамическом сжатии вдоль волокон

При режиме №1 средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 101 МПа, при средних скоростях деформации около 850 с⁻¹.

При режиме №2 (рисунок 3.55) средняя динамическая прочность достигла порядка 106 МПа, при средних скоростях деформации порядка 1200 с⁻¹.

При режиме №3 средняя динамическая прочность достигла порядка 92 МПа, при средних скоростях деформации порядка 1700 с⁻¹.



Рисунок3.55 – Динамические диаграммы $\sigma(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$, $\sigma(\varepsilon)$ и $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$, режим №2

На рисунке 3.56 приведены осредненные диаграммы деформирования с доверительными интервалами для трех скоростных режимов, а также хронология изменения скорости деформации.



Рисунок 3.56 – Осредненные диаграммы $\sigma_x(t)$ и $\dot{\varepsilon}_x(t)$, $\sigma_x(\varepsilon_x)$ и $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ при сжатии для всех режимов
По результатам измерения импульсов деформации в мерных стержнях и окружной деформации наружной поверхности обоймы был определен тензор напряжений в образце, компоненты которого позволили определить касательные напряжения и давление в образце.

В проведенной серии динамических испытаний сосны в обойме при нагружении вдоль волокон реализовано 3 режима по скорости деформации (табл.3.16). Как и для результатов по продольным компонентам напряжения и деформации, показаны результаты только для режима №2.

На рис. 3.57 показаны кривые сдвиговой прочности $\tau(P)$ и диаграммы давления в образце $P(\theta)$ при сжатии образцов сосны вдоль волокон в условии одноосной деформации. На графике сдвиговой прочности $\tau(P)$ показано уравнение линии тренда с линейной аппроксимацией.



Рисунок 3.57 – Кривые сдвиговой прочности τ(*P*) и диаграммы давления в образце *P*(θ) при режиме №2

Далее для каждого режима по скорости деформации показаны усредненные зависимости развития радиальных напряжений и давления (рис.3.58)



Рисунок 3.58 – Осредненные диаграммы $\sigma_r(\theta)$ и $P(\theta)$ при сжатии для всех режимов

На рис.3.59 показаны осредненные диаграммы $\sigma_i(\varepsilon_i)$ в интенсивностях.



Рисунок 3.59 – Осредненные диаграммы $\sigma_i(\varepsilon_i)$ в интенсивностях при сжатии для всех режимов

Результаты динамических испытаний образов при сжатии в обойме сосны с направлением поперек волокон

Цикл динамических испытаний сосны с направлением вырезки образцов поперек волокон состоял из трех скоростных режимов. Во всех испытаниях нагружение системы РСГ производилось стальным ударником длиной 300 мм. Параметры испытаний приведены в таблице 3.17.

		Скорость удар. м/с	Параметры образца			Результаты эксперимента								
Режим	Код экспери- мента		Dag	S _{п.с.} ,	S _{n.c.} , L NOV	Плот-	Макс. продольн.	Скорость	Макс. давле-	Макс. рад. напряжение, МПа		Макс .кас. напр., МПа		
			Сk Уд	Сk Ул	Сk Уд	Ск Уд	D, MM	MM ²	L, MM	ность	напряж., МПа	деформ., 1/с	ние, МПа	Напр. 1
	ј338-01ПВ	12.95	20.25	322	10.15	511	22.55	1298	11.50	3.36	10.75	10.27	6.48	
TM.	ј338-02ПВ	14.2	20.13	318	10.01	513	14.19	1413	8.55	2.28	11.49	6.45	2.01	
=2 a	ј338-03ПВ	12.88	20.21	320	10.21	446	22.32	1267	9.96	-2.85	11.73	12.51	7.31	
1. F	ј338-04ПВ	13.81	20	314	10.05	485	22.17	1386	12.64	7.73	9.73	7.57	8.37	
	ј338-05ПВ	12.14	19.98	313	9.78	457	18.69	1275	8.59	3.56	4.18	7.61	7.55	
	ј338-07ПВ	18.66	20.25	322	10.2	524	15.76	1908	9.93	2.86	14.15	6.86	2.52	
	ј338-08ПВ	18.65	20.23	321	10.01	504	25.75	1951	13.31	8.29	12.33	11.31	9.22	
4 атм	ј338-09ПВ	19.08	20.13	318	10.2	546	31.51	1859	16.99	7.51	13.53	13.08	10.35	
$\mathbf{P}_{=}$	ј338-11ПВ	18.12	20.16	319	10	523	29.00	1827	15.46	9.07	9.46	9.97	10.34	
7	ј338-12ПВ	18.52	20.32	324	10.07	443	33.53	1873	16.29	8.12	13.27	15.68	10.26	
	ј338-13ПВ	18.51	20.15	319	10	528	32.98	1711	15.60	8.79	13.53	14.45	11.73	
	ј338-15ПВ	22.94	20.26	322	9.67	29.73	445.24	2397	15.27	5.89	11.29	11.99	9.74	
atm	ј338-16ПВ	22.73	20.02	315	10.15	39.46	481.41	2272	17.58	4.58	11.93	18.84	14.10	
. P=(ј338-17ПВ	21.93	20.1	317	9.62	17.15	538.60	2326	8.47	2.79	5.52	7.20	6.84	
ŝ	ј338-18ПВ	22.73	20.13	318	9.94	22.34	455.59	2399	9.17	9.62	0.95	8.72	12.99	

Таблица 3.17. Параметры испытаний сосны при динамическом сжатии поперек волокон

При режиме №1 средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 101 МПа, при средних скоростях деформации около 850 с⁻¹.

При режиме №2 (рисунок 3.60) средняя динамическая прочность достигла порядка 106 МПа, при средних скоростях деформации порядка 1200 с⁻¹.

При режиме №3 средняя динамическая прочность достигла порядка 92 МПа, при средних скоростях деформации порядка 1700 с⁻¹.



Рисунок3.60 – Динамические диаграммы $\sigma(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$, $\sigma(\varepsilon)$ и $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$, режим №2

На рисунке 3.56 приведены осредненные диаграммы деформирования с доверительными интервалами для трех скоростных режимов, а также хронология изменения скорости деформации.



Рисунок 3.61 – Осредненные диаграммы $\sigma_x(t)$ и $\dot{\varepsilon}_x(t)$, $\sigma_x(\varepsilon_x)$ и $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ при сжатии для всех режимов

По результатам измерения импульсов деформации в мерных стержнях и двух ортогональных компонент окружной деформации наружной поверхности обоймы был

определен тензор напряжений в образце с двумя ортогональными направлениями радиального напряжения, компоненты которого позволили определить раздельно две компоненты касательного напряжения, а также инвариантную характеристику давление в образце.

В проведенной серии динамических испытаний сосны в обойме при нагружении поперек волокон реализовано 3 режима по скорости деформации (табл.3.17).

На рис. 3.62 показаны кривые сдвиговой прочности $\tau(P)$ в направлениях 1 и 2 при сжатии образцов сосны поперек волокон в условии одноосной деформации. На графиках показаны уравнения линий тренда участков активного нагружения с линейной аппроксимацией.



Рисунок 3.62 – Кривые сдвиговой прочности т(Р) в направлениях 1 и 2

Видно, что ветвь активного нагружения имеет достаточно линейный характер, а на участке разгрузки вследствие интенсивного разрушения материала наблюдаются значительные колебания диаграммы.



Рисунок 3.63 – Диаграммы давления в образце от деформации *P*(θ) и соответствующие зависимости изменения скорости деформации при трех режимах нагрузки

На основании полученных компонент тензора напряжений была определена зависимость развития давления в образце от деформации при нагружении поперек волокон в условии одноосной деформации (рис.3.63).

На рис.3.64 показаны осредненные диаграммы $\sigma_i(\varepsilon_i)$ в интенсивностях, определенные с учетом различных компонентов радиальных напряжений по формулам (3.1-3.2).



Рисунок 3.64 – Диаграммы «Интенсивность напряжений–интенсивность деформаций» при трех режимах нагрузки

3.2.6 Сравнение энергопоглощения хвойных и лиственных пород древесины

Поскольку основной функцией древесины при использовании ее в защитных конструкциях является степень поглощения энергии ударной нагрузки для смягчения ее воздействия на защищаемые элементы, представляет определенный интерес оценка энергопоглощения различных пород древесины для выявления наиболее эффективного материала.

Для сравнительной оценки демпфирующей способности испытанных пород древесины при динамических воздействиях была определена удельная энергоемкость (энергопоглощение) материалов, которая рассчитывается путем численного интегрирования диаграмм деформирования σ(ε).

На рис. 3.65 показана энергоемкость испытанных пород древесины при нагружении вдоль и поперек волокон. Хорошо видно, что наибольшее энергопоглощение имеют образцы березы, как вдоль, так и поперек волокон, а наименьшее – образцы сосны.



Рисунок 3.65 – Сравнение энергопоглощения испытанных пород древесины

3.3 Динамический изгиб балок

В настоящем разделе приводятся результаты экспериментов по методу ударного трехточечного изгиба балок, изготовленных из сосны. Эксперименты проводились в соответствии с методикой, описанной в разделе 2.1.5. Образцы вырезались таким образом, что волокно было ориентировано по ширине (*b*) образца. Схема нагружения, обозначения размеров образцов и ориентация волокон показаны на рисунке 3.66.



Рисунок 3.66 – Схема испытания балок

114

Условия экспериментов и параметры образцов представлены в таблице 3.18.

шифр	b, мм	h, мм	l, мм	Скорость ударника, м/с	Скорость деформации, 1/с
bb338-01-ПВ	31,52	28,68	94,53	7,77	591
bb338-02-ПВ	30,76	28,87	92,09	7,59	632
bb338-03-ПВ	31,76	25,88	91,87	8,10	766
bb338-04-ПВ	32,42	27,78	92,68	7,72	685
bb338-05-ПВ	31,87	28,73	92,07	7,71	604

Таблица 3.18 – Параметры экспериментов на динамический изгиб балок

На рисунке 3.67 представлены временные зависимости прогиба балок, полученные в близких условиях нагружения. Сплошными линиями показаны данные, рассчитанные по формулам Кольского, пунктирные линии отвечают зависимостям, определенным методом DIC. Как и отмечалось ранее, прогибы, рассчитанные по сигналам с мерных стержней, оказываются больше прогибов, определенных по цифровым изображениям.



Рисунок 3.67 – Временные зависимости прогиба балок



Рисунок 3.68 – Временные зависимости сил

Рисунок 3.68 иллюстрирует временные зависимости сил, действующих на балку в ходе испытания и определенных по тензометрическим сигналам с мерных стержней. Можно отметить хорошую повторяемость результатов испытаний, проведенных в близких условиях.

На рисунке 3.69 показаны зависимости сил от прогиба. Для сплошных линий прогиб определялся по данным с мерных стержней, для пунктирных – по DIC. Максимальное значение силы составило порядка 4.8 кН. Наклон нагрузочной ветви равен 14 и 22 кН/мм для метода Кольского и DIC соответственно.



Рисунок 3.69 – Зависимость силы от прогиба

Как отмечалось ранее, размеры балки не соответствуют ГОСТ на определение характеристик прочности материала методом изгиба. Формальное применение формул для оценки предельных характеристик прочности по ГОСТ дает результат, представленный в таблице 3.19

Таблица 3.19 – Характеристики сосны, определенные из эксперимента на изгиб

Характеристика	По мерным стержням	По DIC
Предельное напряжение	$\sigma^{\scriptscriptstyle \rm H} = \frac{3 \cdot 4.8 \cdot 50}{2 \cdot 30 \cdot 29^2} = 14 \text{ M}\Pi a$	
Предельная деформация	$\varepsilon^{\mu} = \frac{6 \cdot 0.6 \cdot 29}{50^2} = 4.176 \%$	$\varepsilon^{\mu} = \frac{6 \cdot 0.4 \cdot 29}{50^2} = 2.78 \%$
Модуль Юнга	$E^{\mu} = \frac{14 \cdot 50^3}{4 \cdot 30 \cdot 29^3} = 600 \text{ M}\Pi a$	$E^{\mu} = \frac{22 \cdot 50^3}{4 \cdot 30 \cdot 29^3} = 940 \text{ M}\Pi a$

Можно отметить, что величины как предельного растягивающего напряжения перпендикулярно волокнам, так и модуля Юнга оказались существенно больше известных статических характеристик (2.1 МПа и 247 МПа соответственно). Величина предельной деформации оказалась близка к значению, определенному прямыми измерениями, проведенными методом DIC (см. рисунок 3.70 и таблицу 3.20).

На рисунке 3.70 и в таблице 3.20 сведены результаты прямого измерения истории растягивающей деформации поперек волокон и соответствующей скорости деформации с использованием метода DIC. При испытаниях балок получена скорость деформации растяжения порядка 700 с⁻¹. Значения предельной деформации разрушения равны ~3.5 %.



Рисунок 3.70 – Результаты прямого измерения деформации (слева) и скорости деформации (справа) методом DIC

шифр	Скорость деформации, 1/с	Предельная деформация, %
bb338-01-ПВ	591	3.3
bb338-02-ПВ	632	3.1
bb338-03-ПВ	766	3.2
bb338-04-ПВ	685	4.11
bb338-05-ПВ	604	2.87

Таблица 3.20 – Результаты определения предельной деформации по методу DIC

Несмотря на то, что габариты испытанных балок не соответствуют ГОСТ, прямое измерение деформаций в эксперименте на трехточечный динамический изгиб позволяет проводить оценку величины предельной деформации, а также определить условия (скорость деформации), при которых эта характеристика получена.

3.4 Определение коэффициента Пуассона сосны

Для определения коэффициента Пуассона сосны при динамическом нагружении использовалась описанная ранее схема (разд.2.3). Испытаниям подвергался образец сосны воздушной влажности в виде цилиндра диаметром 54 мм и высотой 30 мм (рисунок 3.71). Для лучшего отражения зондирующего излучения от боковой поверхности образца и повышения отношения сигнал-шум на диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца в направлении *T* и *R* наклеивались небольшие (5х10 мм) кусочки алюминиевой фольги (рисунок 3.71).



Рисунок 3.71 – Образец, подвергнутый испытаниям с регистрацией поперечной раздачи вдоль годичных слоев (тангенциальное – T– направление) и поперек годичных колец (радиальное – R– направление)

Образцы нагружались вдоль волокон импульсами сжатия малой амплитуды, создаваемыми за счет нагружения РСГ ударниками из сплава Д16Т диаметром 57 мм, разогнанными в стволе газовой пушки до скоростей 12-16 м/с. При такой скорости удара образец не испытывает необратимых деформаций и может быть испытан многократно. Наряду с импульсами деформации в мерных стержнях были зарегистрированы сигналы с интерферометра.



Рисунок 3.72 – Перемещения боковой поверхности образца в направлении Т (вдоль годичных

В первом эксперименте регистрировалось раздельное перемещение боковых поверхностей образца вдоль годичных слоев (направление *T*). Полученные истории развития поперечных перемещений приведены на рисунке 3.72.

Хорошо видно, что перемещения областей боковой поверхности образца, расположенных на диаметрально противоположных его сторонах, достаточно близки, но имеют некоторые отличия, связанные с движением и поворотом образца как целого. Относительная поперечная деформация образца при этом определялась как сумма боковых перемещений, отнесенная к диаметру образца. Полученные зависимости поперечной и продольной деформации были синхронизованы между собой по времени. Затем строилась зависимость поперечной деформации от продольной (рисунок 3.73). Данная кривая хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с тангенсом угла наклона ~0,2. Это и будет искомая компонента *XT* коэффициента Пуассона (в направлении вдоль годичных слоев).



Рисунок 3.73 – Процесс развития коэффициента Пуассона (компонента XT)

Так как образец в процессе испытаний не получил остаточных деформаций, то следующий эксперимент был проведен с тем же образцом, но регистрация поперечной деформации проводилась поперек слоев дерева (направление *R* на рисунке 3.71). На рисунке 3.74 приведены зависимости боковых смещений от времени, полученные в результате обработки сигналов интерферометра.



Рисунок 3.74 – Перемещения боковой поверхности образца в направлении *R* (поперек годичных слоев)

Хорошо видно, что вследствие существенной анизотропии свойств древесины перемещения с разных сторон образца совпадают только в начальные 50 мкс процесса. С ростом времени они становятся существенно различными, что подтверждает необходимость использования выбранной схемы измерения поперечной деформации анизотропного образца двумя группами антенн. Относительная поперечная деформация образца, как и в первом случае, определялась как сумма боковых перемещений, отнесенная к диаметру образца.



Рисунок 3.75 – Процесс развития коэффициента Пуассона (компонента XR)

Также по результатам обработки сигналов с мерных стержней были определены продольные деформации и затем построена зависимость поперечной деформации от

продольной (рисунок 3.75). Полученное значение тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой, соответствующей компоненте *XR* коэффициента Пуассона, равно ~0,24.

Таким образом, с использованием новой методики раздельного измерения двух компонент поперечной раздачи анизотропного материала удалось определить величины компонентов динамического коэффициента Пуассона *XT* и *XR*, которые могут быть использованы при идентификации модели древесины, необходимой для достоверных расчетов динамически нагруженных конструкций.

3.5 Выводы по главе 3

1. Выполнены сравнительные динамические испытания сосны и липы. По итогу этих экспериментов получены их динамические диаграммы деформирования, предельные прочностные и деформационные характеристики образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон.

2. Определена энергоемкость испытанных пород, как важная характеристика демпфирующей способности древесины посредством вычисления площади под кривой σ~ε. Необходимость данных вычислений вызвана расчетом количества энергии, которую сможет поглотить один из слоев, выполненных из древесины, в контейнере для перевозки взрывопасного вещества.

3. В условиях одноосной деформации проанализирована неравномерность радиального расширения образцов секвойи, образцы которой имели разный угол вырезки относительно волокон. Выяснено сильное влияние бокового ограничения на напряженнодеформированное поведение секвойи. Оно подавляет трещины вдоль волокон и этим замедляет разрушение. Такие данные используются в сложной модели древесины принимая во внимание различную природу поведения материала не только при сжатии и растяжении, но и касательно ориентации волокон относительно направления нагрузки.

4. Для свойств всех испытанных пород древесины отмечена значительная анизотропия: максимальная прочность была у образцов с направлением приложения нагрузки вдоль волокон, минимальная прочность – поперек направления волокон. Модуль нагрузочной ветви диаграмм нелинеен и в большинстве случаев, меньше модуля разгрузочной ветви (если образец остается целым). Развитие деформирования и разрушения образцов сильно зависит от угла вырезки материалов.

5. Можно отметить, что влияние скорости деформации на диаграмму деформирования древесины в большей степени проявляется при нагружении вдоль волокна.

6. Величина предельной деформации сосны при растяжении перпендикулярно волокну, определенная из экспериментов на трехточечный изгиб, составила порядка 3.5 %. При этом скорость деформации в момент разрушения составила порядка 650 1/с. В то же время, деформация сжатия при нагружении поперек волокон достигала 20 % и более, что согласуется с общими представлениями о том, что при растяжении древесина ведет себя хрупко, а при сжатии - пластично.

7. Определенные с использованием интерферометрических измерений радиальной раздачи образцов величины динамических коэффициентов Пуассона сосны составили 0.24 и 0.2 для радиального и касательного направлений, соответственно.

4 РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СОСНЫ

В настоящем разделе приводятся результаты расчетного исследования процессов деформирования и разрушения сосны. Дано описание модели материала MAT_WOOD из программного комплекса LS-DYNA, приводятся параметры по умолчанию, которые используются в этой модели для описания деформирования и разрушения сосны. Проводится калибровка и верификация модели на основании данных динамических экспериментов на сжатие образцов в различных направлениях угла вырезки с варьированием скорости деформации, а также на базе экспериментов на ударный трехточечный изгиб балки. Под калибровкой модели понимается идентификация параметров части уравнений на базе полученных экспериментальных данных. Верификация модели выполнена с использованием экспериментов на динамическое внедрение полусферического индентора в образцы сосны, вырезанные в различных направлениях.

4.1 Модель материала

Для моделирования поведения древесины в ПП LS-DYNA существует модель MAT_WOOD, описание которой дано в работах [156-158].

В рамках указанной модели заложены следующие особенности поведения древесины:

- Предполагается трансверсально-изотропное поведение материала
- Учитывается необратимое деформирование материала
- Учитывается деформационное упрочнение материала
- Заложено изменение свойств и разрушение материала в рамках теории повреждаемой среды
- Заложена возможность учета влияния скорости деформации на характеристики прочности

Отличительной особенностью модели MAT_WOOD является заложенный в неё предопределенный набор параметров для двух пород древесины: желтой сосны (yellow pine) и Дугласской ели (Douglas fir). Параметры по умолчанию для заданного значения влажности, температуры и «качества» древесины позволяют моделировать все эффекты, описанные ранее.

Теоретические основы модели MAT_WOOD описаны в работе [158]. Отмечается, что древесина – это достаточно разнообразный материал, однако можно выделить ряд особенностей, отличающих его от других материалов. Жесткостные и прочностные характеристики древесины зависят от направления и отличаются для продольного, радиального и касательного направлений. За продольное направление принимают направление волокна.

Также отмечается, что для целей моделирования, различия свойств в радиальном и касательном направлениях являются несущественными, поэтому поведение древесины, как правило, описывается трансверсально-изотропной моделью, а для классификации направлений используют термины «параллельное» и «перпендикулярное». Зависимость характеристик прочности от направления для древесины (рисунок 4.1) является наиболее существенным фактором, который необходимо учитывать при моделировании.



Угол в плоскости колец

Рисунок 4.1 – Зависимость прочности при сжатии от направления для ели [158]

Характеристики прочности древесины также различаются для разных видов нагружения: сжатия, растяжения и сдвига. Поведение материала при растяжении в «параллельном» и «перпендикулярном» направлениях, а также при сдвиге близко к линейному вплоть до разрушения (хрупкое поведение). При сжатии древесина ведет себя нелинейно, имеет место вязко-пластическое течение.

Реализованная в ПП LS-DYNA модель древесины включает следующие составляющие:

- Упругое определяющее соотношение;
- Критерий разрушения;
- Закон пластического течения;
- Закон упрочнения;
- Закон разупрочнения (деградации свойств) по мере накопления поврежденности;
- Уравнение, описывающее влияние скорости деформации на предельные напряжения разрушения.

Общая схема расчета напряжений и параметров состояния материала при использовании модели MAT_WOOD иллюстрируется на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Схема расчета напряжений и параметров состояния для модели MAT_WOOD

Для <u>упругой</u> модели ортотропного материала требуется задать 9 констант: $E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, v_{12}, v_{13}, u v_{23}$. Здесь E – модули Юнга, G - модули сдвига и v - коэффициенты Пуассона.

Связь напряжений и деформаций для упругого ортотропного материала описывается уравнением:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}$$

Коэффициенты матрицы жесткости через модули упругости определяются согласно выражениям:

$$\begin{split} C_{11} = E_{11}(1 - v_{23}v_{32})/\Delta \\ C_{22} = E_{22}(1 - v_{31}v_{13})/\Delta \\ C_{33} = E_{33}(1 - v_{12}v_{21})/\Delta \\ C_{12} = (v_{21} + v_{31}v_{23})E_{11}/\Delta \\ C_{13} = (v_{31} + v_{21}v_{32})E_{11}/\Delta \\ C_{23} = (v_{32} + v_{12}v_{31})E_{22}/\Delta \\ C_{44} = G_{12} \\ C_{55} = G_{23} \\ C_{66} = G_{13} \\ \Delta = 1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32} - v_{31}v_{13} - 2v_{21}v_{32}v_{13} \end{split}$$

В рамках модели MAT_WOOD пренебрегают различием свойств в радиальном и касательном направлениях, что приводит к следующим условиям: $E_{22} = E_{33}$, $G_{12} = G_{13}$, $v_{12} = v_{13}$. Более того, коэффициент Пуассона в изотропной плоскости не является независимой величиной и может быть определен следующим образом:

$$v = (E - 2G)/2G$$

 $_{\Gamma \not\equiv e} E = E_{22} = E_{33}, G = G_{23}.$

Это приводит к уменьшению необходимого набора характеристик до 5: E_{11} , E_{22} , v_{12} , G_{12} и G_{23} .

Предположение о трансверсальной изотропии древесины оправдано [158], так как различие свойств в радиальном и касательном направлениях пренебрежимо мало (около 2%) по сравнению с различием свойств в параллельном и перпендикулярном направлениях.

Параметры по умолчанию для упругих характеристик сосны, заложенные в модели МАТ_WOOD, приводятся в таблице 4.1.

Характеристики	Значение
E_1 (E_L), МПа	11350
<i>E</i> ₂ (<i>E</i> _T), МПа	247
<i>G</i> ₁₂ (<i>G</i> _{LT}), МПа	88
V12 (VLT)	0.16

Критерии разрушения (критерии перехода в предельные состояния) формулируются в терминах предельных величин напряжений: максимальные напряжения растяжения и сдвига и напряжения течения при сжатии.

Введем следующие обозначения:

*X*_T – прочность при растяжении в параллельном направлении,

*X*_C – прочность (предел текучести) при сжатии в параллельном направлении,

*Y*_T - прочность при растяжении в перпендикулярном направлении,

*Y*_C – прочность (предел текучести) при сжатии в перпендикулярном направлении,

S_{||} - прочность при сдвиге параллельно волокну,

S⊥ - прочность при сдвиге перпендикулярно волокну.

Для оценки предельных состояний древесины используется модифицированный критерий Хашина, который для случая древесины отличается для параллельного и перпендикулярного направлений.

Для параллельного режима вводится функция:

$$f_{\parallel} = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)}{S_{\parallel}^2} - 1 \quad X = \begin{cases} X_T, & \sigma_{11} > 0\\ X_C, & \sigma_{11} < 0 \end{cases}$$

Разрушение наступает, когда $f_{\parallel} \ge 0$.

Для перпендикулярного режима:

$$f_{\perp} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y^2} + \frac{(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{S_{\perp}^2} - 1 \quad Y = \begin{cases} Y_{\rm T}, & \sigma_{22} + \sigma_{33} > 0\\ Y_{\rm C}, & \sigma_{22} + \sigma_{33} < 0 \end{cases}$$

Предельные поверхности в пространстве напряжений показаны на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Предельные поверхности (слева – параллельный режим, справа – перпендикулярный режим)

Параметры по умолчанию для характеристик прочности сосны, заложенные в модели МАТ_WOOD, приводятся в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения по умолчанию для характеристик прочности сосны

Характеристики	Значение
<i>X</i> _T , МПа	85.2
<i>X</i> _C , МПа	21.2
<i>Y</i> _T , МПа	2.1
<i>Y</i> _C , МПа	4.1
<i>S</i> ∥, МПа	9.1
<i>S</i> ⊥, МПа	12.7

Для ограничения значений напряжений используются алгоритмы <u>пластического течения</u>, которые включаются при срабатывании критерия разрушения. При этом напряжения сносятся на поверхность текучести. Более подробно данный механизм описывается в работе [158].

<u>Нелинейное поведение поверхности текучести</u> определяется четырьмя параметрами (по два в каждом направлении): $N_{\rm par}$, $C_{\rm par}$, $N_{\rm per}$ и $C_{\rm per}$. Качественно смысл этих параметров

иллюстрирует левая часть рисунка 4.4. Параметры N отвечают за начало перехода от линейного участка к нелинейному, а C – определяют скорость перехода на пластическую ветвь. Наклон пластического участка кривой деформирования задается параметром G_{hard} (см. правую часть рисунка 4.4).



Рисунок 4.4 – Упрочнение материала

Параметры по умолчанию для описания поведения поверхности текучести для сосны, заложенные в модели МАТ_WOOD, приводятся в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения по умолчанию для описания поведения поверхности текучести для сосны

Характеристики	Значение
$N_{ m par}$	0.5
$C_{\rm par}$	400
$N_{ m per}$	0.4
$C_{\rm per}$	100
$G_{ m hard}$	0

Для моделирования разупрочнения материала за предельным напряжением используется модель деградации свойств. Используется скалярная модель повреждаемой среды. Напряжения в поврежденном материале рассчитываются следующим образом:

$$\sigma_{ij} = (1-d)\overline{\sigma}_{ij}$$

здесь $\bar{\sigma}_{ij}$ – напряжения в неповрежденном материале.

Кинетика накопления поврежденности определяется 6 параметрами (по три для каждого направления): dmax||, B, τ0|| и dmax_⊥, D, τ0_⊥ в соответствии со следующими уравнениями:

для параллельного режима:

$$d(\tau_{\parallel}) = \frac{d \max_{\parallel}}{B} \left[\frac{1+B}{1+Be^{-A(\tau_{\parallel}-\tau_{0\parallel})}} - 1 \right]$$

для перпендикулярного режима:

$$d(\tau_{\parallel}) = \frac{d \max_{\perp}}{D} \left[\frac{1+D}{1+De^{-C(\tau_{\perp}-\tau_{0}_{\perp})}} - 1 \right]$$

здесь τ - энергия деформирования, $\tau = \sqrt{C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}}$.

$$\tau_{\parallel} = \begin{cases} \sqrt{\sigma_{11}^{*} \varepsilon_{11} + 2(\sigma_{12}^{*} \varepsilon_{12} + \sigma_{13}^{*} \varepsilon_{13})} & \varepsilon_{11} \ge 0 \\ \sqrt{2(\sigma_{12}^{*} \varepsilon_{12} + \sigma_{13}^{*} \varepsilon_{13})} & \varepsilon_{11} < 0 \end{cases}$$
$$\tau_{\perp} = \begin{cases} \sqrt{\sigma_{22}^{*} \varepsilon_{22} + \sigma_{33}^{*} \varepsilon_{33} + 2\sigma_{23}^{*} \varepsilon_{23}} & \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \ge 0 \\ \sqrt{2\sigma_{23}^{*} \varepsilon_{23}} & \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} < 0 \end{cases}$$

Связь различных мод поврежденности при расчете напряжений учитывается следующим образом:

$$d_m = \max(d(\tau_{\parallel}), d(\tau_{\perp}))$$
$$d_{\parallel} = d(\tau_{\parallel})$$
$$\sigma_{11} = (1 - d_{\parallel})\overline{\sigma}_{11}$$
$$\sigma_{22} = (1 - d_m)\overline{\sigma}_{22}$$
$$\sigma_{33} = (1 - d_m)\overline{\sigma}_{33}$$
$$\sigma_{12} = (1 - d_{\parallel})\overline{\sigma}_{12}$$
$$\sigma_{13} = (1 - d_{\parallel})\overline{\sigma}_{13}$$
$$\sigma_{23} = (1 - d_m)\overline{\sigma}_{23}$$

Параметры по умолчанию для модели накопления поврежденности для сосны, заложенные в модели МАТ_WOOD, приводятся в таблице 4.4.

Характеристики	Значение	
GF1 , МПа·см	2.2344	Энергия разрушения при растяжении
<i>GF</i> 2∥, МПа·см	8.3843	Энергия разрушения при сдвиге
В	30	Параметр разупрочнения
dmax	0.9999	Максимальная поврежденность
$GF1_{\perp}$, МПа·см	0.021	Энергия разрушения при растяжении
$GF2_{\perp}$, МПа·см	0.0788	Энергия разрушения при сдвиге
D	30	Параметр разупрочнения
$dmax_{\perp}$	0.99	Максимальная поврежденность

Таблица 4.4 – Значения по умолчанию для модели накопления поврежденности для сосны

Для учета влияния <u>скорости деформации</u> используется масштабирование предельных напряжений:

при растяжении в параллельном направлении:

$$X_T^{DYNAMIC} = X_T + E_L \cdot \dot{\varepsilon}_{||}^{(1-n_{||})} \cdot \eta_{||}$$
(4.1)

при сжатии в параллельном направлении:

$$X_{\rm C}^{DYNAMIC} = X_{\rm C} + E_L \cdot \dot{\varepsilon}_{||}^{(1-n_{||})} \cdot \eta_{\rm c||}$$
(4.2)

при сдвиге в параллельном направлении:

$$S_{||}^{DYNAMIC} = S_{||} + G_{LT} \cdot \dot{\varepsilon}_{||}^{(1-n_{||})} \cdot \eta_{||}$$

при растяжении в перпендикулярном направлении:

$$Y_T^{DYNAMIC} = Y_T + E_T \cdot \dot{\varepsilon}_{\perp}^{(1-n_{\perp})} \cdot \eta_{\perp}$$
(4.3)

при сжатии в перпендикулярном направлении:

$$Y_{\rm C}^{DYNAMIC} = Y_{\rm C} + E_T \cdot \dot{\varepsilon}_{\perp}^{(1-n_{\perp})} \cdot \eta_{\rm c\perp}$$

$$\tag{4.4}$$

при сдвиге в перпендикулярном направлении:

$$S_{\perp}^{DYNAMIC} = S_{\perp} + G_{TR} \cdot \dot{\varepsilon}_{\perp}^{(1-n_{\perp})} \cdot \eta_{\perp}$$

Здесь характеристики с индексом *DYNAMIC* - динамические характеристики прочности, рассчитанные с учетом скоростного упрочнения материала.

Видно, что модель позволяет задавать разные законы скоростного упрочнения для растяжения и сжатия, однако показатель степени является общим для всех видов напряженного состояния. Скоростные зависимости предельных характеристик описываются отдельными законами для параллельного и перпендикулярного направлений.

Параметры по умолчанию для модели скоростного упрочнения для желтой сосны, заложенные в модели МАТ_WOOD, приводятся в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Значения по умолчанию для модели скоростного упрочнения для желтой сосны

Характеристики	Значение
$\eta_{ }$	0.0045
$\eta_{ m c }$	0.0045
$n_{ }$	0.107
η_{\perp}	0.0962
$\eta_{ m c\perp}$	0.0962
$\overline{n_{\perp}}$	0.104

4.2 Идентификация параметров скоростного упрочнения

В настоящем разделе проводится сравнение данных моделирования с применением модели MAT_WOOD с результатами выполненного экспериментального исследования. Моделирование поведения материала выполняется на единичном конечном элемента (рисунок 4.5). Ориентация материала определялась направлением векторов *L* и *T*. С использованием граничных условий в виде предопределенных узловых скоростей, в элементе задавался закон изменения скорости деформации во времени, соответствующий индивидуальному натурному эксперименту. Сравнивался силовой отклик (зависимость напряжения от деформации), полученный по модели и зарегистрированный в натурном испытании.



Рисунок 4.5 – Постановка задачи численного исследования модели

Результаты такого сравнения для случая сжатия образцов в параллельном направлении с разными скоростями приводятся на рисунке 4.6. Цветными линиями показаны кривые деформирования, полученные в натурном эксперименте, сплошная черная линия соответствует кривой, рассчитанной по модели без учета влияния скорости деформации, черный пунктир отвечает данным, полученным с использованием модели, учитывающей влияние скорости деформации. При численном моделировании использовались параметры по умолчанию модели МАТ_WOOD для сосны.

Можно отметить, что учет скоростного упрочнения заметно повышает предсказательную способность модели. Видно, что для режимов от 450 до 2000 1/с совпадение максимальных напряжений оказалось приемлемым. По-видимому, это связано с тем, что значения параметров по умолчанию для скоростной зависимости прочности сосны определялось на данных, полученных при скоростях деформации 500 и 1000 1/с (см. [158]). Режим же 2500 1/с находится в области экстраполяции и предсказывается заметно хуже.



Рисунок 4.6 – Сжатие в параллельном направлении. Параметры по умолчанию

Для уточнения скоростной зависимости предельного напряжения сжатия в параллельном направлении проводилась аппроксимация полученных в работе экспериментальных данных уравнением (4.2). Результаты аппроксимации в сравнении с экспериментальными данными и зависимостью, используемой в модели по умолчанию, представлены на рисунке 4.7. Параметры скоростного упрочнения, определенные по экспериментальным данным настоящей работы, приводятся в таблице 4.6.

134

Таблица 4.6 – Параметры аппроксимации скоростной зависимости предельного напряжения сжатия в параллельном направлении

Характеристики	Значение
$\eta_{ m c }$	0.00497
$n_{ }$	0.6379



Рисунок 4.7 – Аппроксимация скоростной зависимости предельного напряжения сжатия в параллельном направлении

Сравнение уточненной модели и эксперимента для случая сжатия образцов в параллельном направлении с разными скоростями приводится на рисунке 4.8. Кривые по модели рассчитывались для каждой истории изменения скорости деформации в натурных экспериментах. Модельные кривые показаны пунктирными линиями. Соответствие индивидуальных натурных и численных экспериментов можно установить по цвету.



Рисунок 4.8 – Сжатие в параллельном направлении. Уточненные параметры скоростного упрочнения

На рисунке 4.9 показаны результаты сравнения моделирования с параметрами по умолчанию и натурных испытаний для сжатия в перпендикулярном направлении. Цветовые обозначения кривых такие же, какие использовались на рисунке 4.6. Видно, что учет динамического упрочнения приводит к завышению силового отклика материала.

136



Рисунок 4.9 – Сжатие в перпендикулярном направлении. Параметры по умолчанию

Для уточнения скоростной зависимости предельного напряжения сжатия В перпендикулярном направлении проводилась аппроксимация полученных работе В экспериментальных данных уравнением (4.4). Результаты аппроксимации в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунке 4.10. Параметры скоростного упрочнения приводятся в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Параметры аппроксимации скоростной зависимости предельного напряжения сжатия в перпендикулярном направлении

Характеристики	Значение
$\eta_{ ext{c}ot}$	0.004
n_{\perp}	0.8383



Рисунок 4.10 – Аппроксимация скоростной зависимости предельного напряжения сжатия в перпендикулярном направлении

Сравнение уточненной модели и эксперимента для случая сжатия образцов в перпендикулярном направлении с разными скоростями приводится на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Сжатие в перпендикулярном направлении. Уточненные параметры скоростного упрочнения

Сравнение уточненной модели и эксперимента для случая сжатия образцов под углом 45⁰ к направлению волокна с разными скоростями приводится на рисунке 4.12. Данный вид эксперимента не является базовым. Свойства материала из этого эксперимента не определяются. Этот вид нагружения моделировался для проверки работы модели при нагружении в направлении, отличном от параллельного и перпендикулярного.

139



Рисунок 4.12 – Сжатие под углом 45⁰ к направлению волокна

В целом можно отметить, что модель MAT_WOOD позволяет воспроизвести как качественно, так и количественно эффекты, наблюдаемые в натурных испытаниях. Учет влияния скорости деформации является существенным. Корректировка скоростных зависимостей прочности материала на основе данных о поведении конкретной партии образцов позволяет значительно повысить предсказательные возможности математической модели.

140

4.3 Моделирование ударного изгиба балки

Проводилось моделирование процесса высокоскоростного изгиба балок на базе экспериментальной схемы, описанной ранее. Моделирование проводилось с использованием ПП LS-DYNA с применением явной схемы интегрирования уравнений по времени и метода конечного элемента в лагранжевой формулировке для дискретизации пространства. Задача решалась в трехмерной постановке. Геометрическая постановка задачи и граничные условия показаны на рисунке 4.13. Нагружающий И опорный стержни моделировались недеформируемыми телами, для которых задавались временные зависимости вертикальных смещений, определяемые методом корреляции цифровых изображений по данным натурного испытания.



Рисунок 4.13 – Постановка моделирования динамического изгиба балки

В натурном эксперименте зарождение трещины начиналось в момент времени между кадрами, соответствующими 309 и 324 мкс (в системе отсчета времени, в которой рассчитывались граничные условия). При использовании модели MAT_WOOD с параметрами прочности при растяжении в перпендикулярном направлении, имеющими значения по умолчанию, разрушения балки в расчете не наблюдается.

Как показало экспериментальное исследование, разрушение зарождается при деформации растяжения порядка 3.5 %. Это соответствует напряжению около 8.6 МПа. Результаты моделирования ударного трехточечного изгиба балки после внесении соответствующих корректировок в модель показаны на рисунке 4.14. Красный цвет соответствует разрушенному материалу.



Рисунок 4.14 – Разрушение балки при динамическом изгибе

При уменьшении размера конечного элемента в зоне разрушения появляются множественные трещины (рисунок 4.15), момент зарождения первого разрушения при этом практически не меняется.





Рисунок 4.15 – Влияние сетки на результаты моделирования

4.4 Верификация модели на базе эксперимента на индентирование

Для верификации модели поведения сосны была использована экспериментальная схема на динамическое индентирование в системе разрезного стержня Гопкинсона, которая ранее в работе [159] использовалась для верификации моделей деформирования вязкопластических сталей и сплавов. Схематично указанная методика изображена на рисунке 4.16. В этой схеме между мерными стержнями 1 и 5 устанавливается образец 3 и сменный индентор 4, выполненный из высокопрочного материала. Стержень 5 нагружается ударом бойка 6, при этом в нем формируется импульс сжатия, длительность которого зависит от длины ударника, а амплитуда от скорости ударника.



1-опорный стержень, 2-тензодатчики, 3-образец, 4-индентор, 5-нагружающий стержень, 6ударник

Рисунок 4.16 – Схема эксперимента на высокоскоростное индентирование

В экспериментах с образцами из сосны использовался сменный индентор со сферической головной частью. Геометрические размеры индентора показаны на рисунке 4.17. Размеры приведены в мм. Радиус полусферы - 10.12 мм. Индентор изготовлен из высокопрочного вольфрамокобальтого сплава ВК6 (р=15300 кг/м³).



Рисунок 4.17 – Геометрические размеры индентора

Эксперименты на внедрение проводились на образцах в виде таблеток длиной 10 мм и диаметром 20 мм. Часть образцов была вырезана в направлении волокон древесины, часть – в направлении перпендикулярном волокну.



Рисунок 4.18 – Высокоскоростная съемка процесса индентирования

На рисунке 4.18 показан процесс динамического внедрения индентора в образцы из сосны. Левая часть рисунка отвечает эксперименту с образцом, вырезанным в направлении волокна, правая – эксперименту с образцом, вырезанным в направлении перпендикулярном
волокну. Цифрами обозначены номера циклов нагружения (пробеги импульса в нагружающем мерном стержне). Видно, что образцы, вырезанные параллельно волокнам, остаются целыми в течении всего эксперимента, что подтверждается конечным состоянием таких образцов. Образцы, полученные вырезкой в направлении перпендикулярном волокну, сохраняют целостность в течение первого цикла нагружения, однако во втором цикле появляются трещины и разрывы между слоями древесины, которые растут и прогрессируют в последующих циклах нагружения, приводя к разделению образца на части.

Помимо высокоскоростной киносъемки для получения количественных характеристик процессов, протекающих в образце при ударном нагружении, использовалась информация, полученная с мерных стержней. В соответствии с формулами Кольского можно рассчитать закон изменения скорости внедрения индентора в образец V(t) и силу сопротивления внедрению F(t).

$$V(t) = C_1 \cdot \left(\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t)\right) - C_2 \cdot \varepsilon^T(t)$$
$$F(t) = E_2 \cdot S_2 \cdot \varepsilon^T(t)$$

здесь ε^{I} , ε^{T} и ε^{R} обозначают падающий, отраженный и прошедший импульсы деформации в мерных стержнях соответственно, E – модуль упругости, c – стержневая скорость звука. Нижние индексы 1 и 2 относятся к первому (нагружающему) и второму (опорному) мерным стержням соответственно.

На рисунке 4.19 показаны временные зависимости скорости внедрения ударника, определенной по сигналам с мерных стержней (в левой части рисунка) и силы сопротивления внедрению (в правой части рисунка).



Рисунок 4.19 – Слева – история изменения скорости индентора, рассчитанная по импульсам в мерных стержнях, справа – силы сопротивления внедрению, рассчитанные по импульсам с опорного стержня

При моделировании процесса динамического внедрения в образцы из древесины использовалась следующая схема: рассматривался образец и индентор (рисунок 4.20). В силу наличия симметрии рассматривалась четверть геометрической модели. На плоскостях симметрии задавались соответствующие граничные условия. Индентор моделировался абсолютно жестким недеформируемым телом. Для индентора задавался закон изменения скорости его движения в осевом направлении. Временная зависимость V(t) рассчитывалась по информации с мерных стержней. Между индентором и образцом задавался контакт. На противоположной контактному торцу поверхности образца запрещались смещения узлов в осевом направлении. Сила сопротивления внедрению определялась как сила на контакте «образец-индентор» и сравнивалась с данными натурных испытаний. Моделировался только первый цикл нагружения.



Рисунок 4.20 – Геометрическая постановка задачи численного моделирования

Формы отпечатка индентора на образце в вычислительном и натурном испытании показаны на рисунке 4.21.



Рисунок 4.21 – Форма отпечатка – численное моделирование

Сравнение временных зависимостей сил сопротивления внедрению, полученных в натурных экспериментах (цветные линии) и численных экспериментах (черные линии)

приводится на рисунке 4.22. Видно, что как для случая нагружения параллельно волокнам, так и для случая нагружения перпендикулярно волокнам наблюдается приемлемое качественное и количественное совпадение данных расчетов (черные сплошные линии) и натурных испытаний (цветные линии).



Рисунок 4.22 – Сравнение сил сопротивления внедрению: цветные линии – данные натурных испытаний, черные линии – результаты моделирования

4.5 Выводы по главе 4

1. Выполненное численное исследование деформирования и разрушения древесины с применением модели MAT_WOOD из библиотеки материалов ПП LS-DYNA позволило выявить особенности этого определяющего соотношения.

2. Показано, что параметры по умолчанию позволяют достаточно близко воспроизвести результаты натурных экспериментов для ряда случаев.

3. Уточнение скоростных зависимостей характеристик прочности позволило значительно приблизить данные расчетов к результатам экспериментов на ударное сжатие образцов, выполненных с разными скоростями в разных направлениях.

4. Предельная деформация растяжения в перпендикулярном направлении сосны, определенная из эксперимента на ударных трехточечный изгиб балки, позволила уточнить значение прочности при растяжении перпендикулярно волокнам и достоверно смоделировать разрушение балки в данном виде испытаний.

5. Верификация нелинейной части модели деформирования сосны проведена на базе экспериментов на ударное внедрение полусферического индентора, которая показало хорошую предсказательную способность математической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогу выполненной работы можно заключить следующее:

1. Проведенный аналитический обзор и анализ результатов динамических испытаний древесины при средней и высокой скорости деформации позволил выявить основные особенности поведения древесины: ортотропию свойств, зависимость характеристик прочности от скорости деформации, влажности, температуры.

2. Для исследования скоростных зависимостей характеристик прочности при сжатии для различных углов вырезки образцов относительно волокна в работе использовался метод Кольского и его модификация, в которой сжатие образца производится в обойме. Реализация многократного нагружения образца в одном эксперименте в данных типах испытаний позволила достичь больших степеней деформации образцов (до 50 %).

3. Для определения динамической величины предельной деформации растяжения в направлении перпендикулярном волокну на базе техники мерных стержней, эксперимента на трехточечный изгиб и метода корреляции цифровых изображений созданы экспериментальная установка, методика и программная реализация алгоритма обработки экспериментальных данных.

4. Для определения коэффициента Пуассона при динамическом нагружении предложена и реализована новая схема, в которой нагружение и регистрация продольной деформации осуществляется в системе разрезного стержня Гопкинсона, а регистрация изменения радиальных размеров образца производится с использованием радиоинтерферометрии.

5. Были проведены динамические испытания сосны, липы, осины, секвойи и березы нормальной влажности (7-10 %) при комнатной температуре, в результате которых были получены их диаграммы деформирования, предельные прочностные и деформационные характеристики образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон. Результаты исследований показали, что наибольший модуль нагрузочной ветви диаграммы, предельные напряжения и энергоемкость имеют образцы, вырезанные вдоль волокон. Оценена энергоемкость испытанных пород при нагружении вдоль и поперек волокон. Показано, что наибольшую способность поглощать энергию имеют образцы березы, как вдоль, так и поперек волокон, а наименьшее – образцы сосны.

6. Испытаны образцы сосны нормальной влажности при комнатной температуре с варьированием скорости деформации на образцах, вырезанных под углами 0⁰, 90⁰ и 45⁰ относительно волокна. Показано, что скорость деформации оказывает существенное влияние на прочностные характеристики материала, при этом наиболее ярко скоростное упрочнение проявилось при нагружении в направлении волокон.

7. Предложенная схема определения величины предельной деформации древесины при растяжении перпендикулярно волокну, на базе экспериментов на трехточечный изгиб и метода корреляции цифровых изображений, позволила получить предельную деформацию разрушения сосны, которая составила порядка 3.5 % при скорости деформации порядка 650 1/с.

8. Определенные с использованием интерферометрических измерений радиальной раздачи образцов величины динамических коэффициентов Пуассона сосны для радиального и касательного направлений оказались довольно близки и составили 0.24 и 0.2, соответственно.

9. На базе данных, полученных в ходе экспериментального исследования динамического поведения сосны, идентифицированы функции, характеризующие скоростные зависимости характеристик прочности в рамках модели MAT_WOOD из библиотеки ПК LS-DYNA вдоль и поперек волокон.

10. Проведена верификация модели сосны с использованием трех групп расчетов (моделирование сжатия при разных скоростях деформации и углах вырезки образцов, моделирование трехточечного изгиба балки и моделирование динамического внедрения полусферического индентора), которая показала хорошее соответствие результатов натурных и вычислительных экспериментов.

Список использованной 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.

 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. PhD thesis, 2009, Bergische Universitat Wuppertal, Germany

3. 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 June 2006, 43-51.

Eisenacher G. et al. Crushing Characteristics of Spruce Wood Used in Impact Limiters of Type
 B Packages. Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013, San Francisco,
 USA

5. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V Numerical analysis of impact and thermal resistances of air transport package PAT-2. Problems of Strength and Plasticity J., 78(1) (2016), 101-111. (in Russian)

6. International Atomic Energy Agency IAEA: Regulations for the safe transport of radioactive material. Specific safety requirements. No. SSR-6. Safety standards series. 2012, Vienna, Austria

7. Buchar J., Severa L., Havlicek M., Rolc S. Response of wood to the explosive loading, J.Phys. IV France 10 (2000), 529-534.

8. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood, Int. J. Imp. Eng., 4(3) 1986, 161-174.

9. 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 J. 80(4) 2018 555-565.

10. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Yuzhina T.N., Filippov A.R. Experimental complexes for investigation of behavior of materials at a strain rate of 5·102?105 s-1 // XIV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2018) Ростовна Дону, 12-14 сентября 2018 MATEC Web of Conferences 226, 2018.

11. Bragov A.M., Isola F., Litvinchuk S.Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N. Deformation and destruction of lime-tree and pine under intense dynamic effects // The Sixteenth International Conference on Civil, Structural & Environmental Engineering Computing CIVIL-COMP 2019 16-19 September 2019 | Riva del Garda, near Lake Garda, Italy.

12. Ломунов А.К., Южина Т.Н., Крушка Л., Чен В. Деформирование и разрушение липы и сосны при интенсивных динамических воздействиях // Проблемы прочности и пластичности, т. 82, №1, 2020.

13. Брагов А.М., Ломунов А.К., Южина Т.Н. Влияние вида напряженно-деформированного состояния на динамическую сжимаемость березы // Проблемы прочности и пластичности, т.82, №3, 2020, с.269-282.

14. Bragov A.M., Gonov M.E., Konstantinov A.Y. Lomunov A.K. Iuzhina T.N. Deformation and destruction at deformation rate of order 103 s-1 wood of hardwood trees // Chapter 26 In: B.E. Abali and I.Giorgio (eds.), Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials vol 130. p.443-451 (2020).

15. Bragov A.M., Lomunov A.K, Yuzhina T.N. Dynamic compressibility of birch under various types of stress-strain state // Chapter 7. In: Altenbach H., Eremeyev V.A., Igumnov L.A. (eds) Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials, vol 141. 2021 69-80.

16. 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, 13(22), 5261.

17. Balandin V.V., Balandin VI.VI., Lomunov A.K., Parkhachev V.V., Yuzhina T.N. Using a radio interferometer for measurement of the dynamic Poisson's ratio of wood // Chapter 3. In: Altenbach H., Eremeyev V.A., Galybin A., Vasiliev A. (eds) Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications, vol 155. 2021

18. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Гонов М.Е., Южина Т.Н. Деформирование и разрушение березы и осины при скоростях деформации порядка 103 с-1 // В книге: Материалы XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.56-57 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 18-22 марта 2019.

19. Баландин Вл.Вл., Ломунов. А.К., Южина Т.Н. Исследование ударно-волновой сжимаемости березы // В книге: Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.31-33 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 16-20 марта 2020.

20. Баландин Вл.Вл., Ломунов. А.К., Южина Т.Н. Ударная сжимаемость секвойи и берёзы // В книге: Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.33-35 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 16-20 марта 2020.

21. Reid S.R., Reddy T.Y., Peng C. Dynamic compression of cellular structures and materials. In: Jones N, Wierzbicki T, eds. Structural crashworthiness and failure. Taylor & Francis Publ., London-New York; 1993. 257–294.

22. Reid S.R., Peng C. Dynamic Uniaxial Crushing of Wood. Int. J. Imp. Eng., 19 (1997) 531-570.

23. 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, 47 (2005) 521–544.

24. Gibson L.J., Ashby M.F. Cellular solids-structure and properties, 2nd ed. Cambridge University Press, 1997. 510 p.

25. Bolshakov A.P., Gerdyukov N.N., Novikov S.A. et al. Damping Properties of Sequoia, Birch, Pine, and Aspen under Shock Loading. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 42(2), (2001) 202-210.

26. Buchar J., Adamik V. Wood strength evaluation under impact loading. 39th Int. Conf. Experimental Stress Analysis, 4-6 June 2001, Tabor, Czech Republic.

27. 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.

28. Widehammar S. Stress-strain relationships for spruce wood: Influence of strain rate, moisture content and loading direction, Experimental Mechanics, 44 (2004), 44-48.

29. Allazadeh M.R., Wosu S.N. (2012) High strain rate compressive tests on wood. Strain 48(2):101–107.

30. 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 Conf. Series: Materials Science and Engineering 137 (2016), 012036

31. Gilbertson C.G. Dynamic properties of wood using the Split-Hopkinson Pressure Bar, Dissertation, Michigan Technological University, 2011.

32. Riggio M., Sandak J., Sandak A., Babinski L. Analysis and prediction of selected mechanical/dynamic properties of wood after short and long-term waterlogging. Construction and Building Materials. 68 (2014), 444-454.

33. Backman A.C., Lindberg K.A.H. Difference in wood material responses for radial and tangential direction as measured by dynamic mechanical thermal analysis. J. Mater. Sci. 36(15) (2001), 3777–3783.

34. 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 149 (2016), 315–328.

35. Vural M., Ravichandran G. (2003). Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis. International Journal of Solids and Structures 40, pp. 2147–2170.

36. Frantisek Sebeka, Petr Kubika, Martin Brabecb, Jan Tippner (2020). Modelling of impact behaviour of European beech subjected to split Hopkinson pressure bar test. Composite Structures 245, 112330.

37. Nitin Kumar Jain, M. K. Gupta (2018). Dynamic Mechanical Properties of Hybrid Teak/Shorea Robusta Wood Reinforced Epoxy Composite. Materials Today: Proceedings 19893–19898.

38. F. Gomesa, J. Xavierb*, H. Koerber (2019). High strain rate compressive behaviour of wood on the transverse plane. Procedia Structural Integrity 17 pp. 900–905.

39. S.C. Zhou, C. Demartino, Y. Xiao (2020). High-strain rate compressive behavior of Douglas fir and glubam. Construction and Building Materials 258 119466.

40. Salit MS. Tropical natural fibre composites: properties, manufacture and applications. Engineering Materials. Singapore: Springer; 2014.

41. Ratna Prasad AV, Mohana Rao K. Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: jowar, sisal and bamboo. Mater Des 2011; 32:4658-63.

42. Dai D, Fan M. Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. Nat. Fibre Compos 2014;1: 3-65.

43. Nabi Saheb D, Jog JP. Natural fiber polymer composites: a review. Adv Polym Technol 1999;18:351-63.

44. Stokke D, Wu Q, Han G, Stevens CV. Introduction to wood and natural fiber composites. first ed. Chichester, England: Wiley; 2014.

45. La Mantia FP, Morreale M. Green composites: a brief review. Compos. Part A Appl Sci Manuf 2011;42:579-88.

46. Edison E. Haro, Jerzy A. Szpunar, Akindele G. Odeshi (2018). Dynamic and ballistic impact behavior of biocomposite armors made of HDPE reinforced with chonta palm wood (Bactris gasipaes) microparticles. Defence Technology 14 pp. 238-249.

47. V.L. Tagarielli, V.S. Deshpande, N.A. Fleck (2008). The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood Composites: Part B 39 pp. 83–91

48. CSA. Design and assessment of buildings subjected to blast loads. CSA S850. Mississauga, ON: CSA Group; 2012.

49. ASCE. Blast protection of buildings. ASCE/SEI 59–11. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2011.

50. Unified Facilities Criteria Program. Structures to resist the effects of accidental explosions (UFC 03–340-02). Washington, D.C.: United States of America Department of Defense; 2008.

51. Christian Viau, Ghasan Doudak (2019). Behaviour and modelling of cross-laminated timber panels with boundary connections subjected to blast loads. Engineering Structures 197 109404.

52. C. Adalian, P. Morlier. "WOOD MODEL" for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression Holz als Roh- und Werkstoff 60 (2002) 433–439.

53. Joshua Fortin-Smith, James Sherwood, Patrick Drane, and David Kretschmann. Characterization of maple and ash material properties as a function of wood density for bat/ball impact modeling in LS-DYNA. Procedia Engineering 147 (2016) 413 – 418.

54. Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Gray III G.T. Dynamic behaviour of birch and sequoia at high strain rates. "Shock Compression of Condensed Matter". Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group "APS-845" held in Baltimore, Maryland, July 31-August 5, 2005, Melville, New York, 2006, p.1511-1514.

55. S. Zhao1, J. X. Zhao, G. Z. Han. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 137 (2016) 012036.

56. Liska JA (1950) Effect of rapid loading on the compressive and flexural strength of wood. USDA for serv report no. 1767, USDA For Serv Forest Products Laboratory, Madison, WI, United States

57. Keeton JR (1968) Dynamic properties of small, clear specimens of structural-grade timber. Technical report R-573, Y-F011-05-04-003, U.S. Navy Civ Eng Lab, Port Hueneme, CA, United States, 50 pp

58. Gatchell C, Michie J (1974) Pendulum impact tests of wooden and steel highway guardrail posts. USDA for serv research paper NE-311, Upper Darby, PA, United States

59. Leijten AJM (2000) Literature review of impact strength of timber and joints. World conference on timber engineering, Whistler, Canada

60. Bocchio N, Paola R, van de Kuilen JWG (2001) Impact loading tests on timber beams. In: IABSE, vol 85, Lahti, Finland, pp 19–24

61. Botting JK (2003) Development of an FRP reinforced hardwood glulam guardrail. Master thesis, The University of Maine, Orono, ME, United States

62. Kubojima Y, Ohsaki H, Kato H, Tonosaki M (2006) Fixed-fixed flexural vibration testing method of beams for timber guardrails. J Wood Sci 52(3):202–207

63. Gutkowski RM, Shigidi A, Abdallah MT, Peterson ML (2007) Dynamic impact load tests of a bridge guardrail system. MPC report no. 07-188, Mountain-Plains Consortium, Fargo, ND, 37 pp

64. Polocoser T, Stockel F, Kasal B (2016) Low-velocity transverse impact of small, clear spruce and pine specimens with additional energy absorbing treatments. J Mater Civ Eng. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001545

65. Turnbull-Grimes C, Charlie WA, Gutkowski RM, Balogh J (2010) Bus-Stop shelters–Improved Safety. Report for North Dakota State University. Fargo, ND, United States

66. Benthien JT, Georg H, Maikowski S, Ohlmeyer M (2012) Infill planks for horse stable constructions: Thoughts about kick resistance determination and alternative material development. Landbauforsch Appl Agric For Res 62(4):255

67. Kasal B, Guindos P, Poloco?er T, Heiduschke A, Urushadze S, Pospisil S (2014) Heavy laminated timber frames with rigid three-dimensional beam-to-column connections. J Perform Constr Facil. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000594

68. Jacques E, Lloyd A, Braimah A, Saatcioglu M, Doudak G, Abdelalim O (2014) Influence of high strainrates on the dynamic flexural material properties of spruce–pine–fir wood studs. Can J Civ Eng 41 (1):56–64

69. Abe, H., Ohtani, J. & Fukazawa, K. (1991). Fe-Sem Observations on the Microfibrillar Orientation in the Secondary Wall of Tracheids, IAWA Journal, Vol. 12 (4), pp. 431-438.

70. Gilbertson GG, Bulleit WM (2013) Load duration effects in wood at high strain rates. J Mater Civ Eng 25 (11): 1647-1654.

71. Chen W, Lu F, Frew DJ, Forrestal MJ (2002) Dynamic compression testing of soft materials.Trans ASME 69(3):214–223

72. Bucur V (2006) Acoustics of wood, 2nd edn. Springer, Berlin

73. Murphey WK (1963) Cell-wall crystallinity as a function of tensile strain. For Prod J 13(4):151–155

74. Obataya E, Ono T, Norimoto M (2000) Vibrational properties of wood along the grain. J Mater Sci 35 (12):2993–3001

75. Obataya E, Norimoto M, Gril J (1998) The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood. Polymer 39(14):3059–3064

76. Tabarsa, T. & Chui, Y.H. (2001). Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction, Wood and Fiber Science, Vol. 33(2), pp.223-232.

77. Law, K.N., Kokta, B.V. & Mao, C. (2006). Compression properties of wood and fibre failures, Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 32(4), pp. 224-230.

78. Muller, U., Gindl, W. & Teischinger, A. (2003). Effects of cell anatomy on the plastic and elastic behaviour of different wood species loaded perpendicular to grain, IAWA Journal, Vol. 24(2), pp. 117-128.

79. Salmen, L., Dumail, J.F. & Uhmeier, A. (1997). Compression behaviour of wood in relation to mechanical pulping, Proceedings of the International Mechanical Pulping Conference, June 9-13, Stockholm, pp.207-211.

80. Uhmeier, A. & Salmen, L. (1996b). Repeated large radial compression of heated spruce, Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol. 11(3), pp. 171-176.

81. Bragov A, Lomunov A (1997) Dynamic properties of some wood species. J Phys IV 7(C3):487–492

82. Peng C (1991) Crushing and indentation of wood under static and dynamic loading conditions.Doctoral dissertation, The University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, UK.

83. J. Wouts, G. Haugou, M. Oudjene, D. Coutellier, H. Morvan. Strain Rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities - Part A: Experimental investigations. Composite Structures, Volume 149, 2016, Pages 315-328.

84. Boutelje J.B. (1962). Relation of structure to transverse anisotropy of wood with reference to shrinkage and resilience // Holzforschung, Vol. 16(2), pp. 33-46.

85. Watanabe, U., Fujita, M. & Norimoto, M. (2002). Transverse Young's moduli and cell shapes in coniferous early wood, Holzforschung, Vol. 56(1), pp. 1-6.

86. Cramer, S., Kretschmann, D., Lakes, R. & Schmidt, T. (2005). Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine, Holzforschung, Vol. 59(5), pp. 531-538.

87. Jernkvist L.O., Thuvander F. (2001). Experimental determination of changes in tree ring stiffness in Picea abies // Holzforschung, Vol. 55 (3), pp. 309-317.

88. Eder, M., Jungnikl, K. & Burgert, I. (2009). A close-up view of wood structure and properties across a growth ring of Norway spruce (Picea abies [L] Karst.), Trees - Structure and Function, Vol. 23(1), pp. 79-84.

89. Oscarsson, J., Olsson, A. & Enquist, B. (2012). Strain fields around knots in Norway spruce specimens exposed to tensile forces, Wood Science and Technology, Vol. 46(4), pp. 593-610.

90. Hickey, K.L. & Rudie, A.W. (1993). Preferential Energy absorption by Earlywood in cyclic compression of Loblolly pine, International Mechanical Pulping Conference, June 15-17, Oslo, Norway, pp. 81-86.

91. Wennerblom, M., Olsson, A.-. & Salmen, L. (1996). Softening properties of early wood and latewood of spruce, Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol. 11(4), pp. 279-280.

92. Hamad, W.Y. & Provan, J.W. (1995). Microstructural cumulative material degradation and fatigue-failure micromechanisms in wood-pulp fibres, Cellulose, Vol. 2(3), pp. 159-177.

93. De Magistris, F. (2005). Wood fibre deformation in combined shear and compression, Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden, 49 p.

94. Salmen, L., Tigerstrom, A. & Fellers, C. (1985). Fatigue of Wood - Characterization of Mechanical Defibration, Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 11(3), pp. 68-73.

95. Salmen, L. (1987). The Effect of the Frequency of a Mechanical Deformation on the Fatigue of Wood, Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 13(1), pp. 23-28.

96. Bergander, A. & Salmen, L. (2000). Transverse elastic modulus of the native wood fibre wall, Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 26(6), pp. 234-238.

97. Miksic, A., Myntti, M., Koivisto, J., Salminen, L. & Alava, M. (2013). Effect of fatigue and annual rings orientation on mechanical properties of wood under cross-grain uniaxial compression, Wood Science and Technology, Vol. 47(6), pp. 1117-1133.

98. Mauranen, A., Ovaska, M., Koivisto, J., Salminen, L.I. & Alava, M. (2015). Thermal conductivity of wood: effect of fatigue treatment, Wood Science and Technology, Vol. 49(2), pp. 359-370.

99. Salmi, A., Saharinen, E. & H?ggstrom, E. (2011). Layer-like fatigue is induced during mechanical pulping, Cellulose, Vol. 18(6), pp. 1423-1432.

100. Kure, K.A., Dahlqvist, D., Sabourin, M.J. & Helle, T. (1999). Development of spruce fiber properties by a combination of a pressurized compressive pretreatment and high intensity refining, International Mechanical Pulping Conference, May 24-26, TAPPI, Houston, USA, pp. 427-433.

101. Viforr, S. & Salmen, L. (2008). Shear/compression of chips for lower energy consumption in TMP refining, Appita Journal, Vol. 61(1), pp. 49-55.

102. Salmi, A., Salminen, L.I., Lucander, M. & H?ggstrom, E. (2012b). Significance of fatigue for mechanical defibration, Cellulose, Vol. 19(2), pp. 575-579.

103. Tensile testing / edited by J.R. Davis. – 2nd ed. ASM International. 2004.

104. Carrington H (1921) The determination of values of Young's modulus and Poisson's ratio by Edinb Dublin Philos J the method of flexures. Lond Mag Sci 41. 206-210. https://doi.org/10.1080/14786442108636212

105. Carrington H (1922) The elastic constants of spruce as influenced by moisture. Aeronaut J (Lond Engl 1897) 26, 462–471. https://doi.org/10.1017/S2398187300139465

106. Carrington H (1922) Young's modulus and Poisson's ratio for spruce. Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci 43, 871–878. https://doi.org/10.1080/14786442208633943

107. Horig H (1931) Zur Elastizitat des Fichtenholzes. I. Folgerungen aus Messungen von H. Carrington an Spruce (To the elasticity of spruce wood. I. Consequences of the measurements conducted by H. Carrington on Spruce). Zeitschr f techno Phys 12, 369 (In German) https://www.scienceopen.com/document?vid=b97d5031-646a-41c2-b76a-58f166ef1717

108. Voigt W (1882) Allgemeine Formeln fur die Bestimmung der Elastizitatskonstanten von Kristallen durch Beobachtung der Biegung und Drillung von Prismen (General formulas to determine the elastic constants of crystals by observing the bending and twisting of prisms). Ann Phys 252, 273–321 (In German) https://doi.org/10.1002/andp.18822520607

109. Voigt W (1887) Theoretische Studien uber die Elastizitatsverhaltnisse der Kristalle (Theoretical studies on the elasticity of crystals). Konigliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Guttingen (In German) https://www.worldcat.org/title/theoretische-studien-uber-die-elasticitatsverhaltnisse-der-krystalle/oclc/634403068

110. Voigt W (1966) Lehrbuch der Kristallphysik (Textbook of crystal physics). Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden (In German) https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-663-15884-4

111. Horig H (1935) Anwendung der Elastizitatstheorie anisotroper Korper auf Messungen an Holz (Application of the elasticity theory of anisotropic bodies to wood measurements). Arch Appl Mech 6,
8–14 (In German) https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02086407

112. Wommelsdorff O (1966) Dehnungs-und Querdehnungszahlen von Holzern (Elongation and transverse strain constants of wood). Dissertation, Leibniz Universitat Hannover (In German) https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A046346732/Dehnungs-und-Querdehnungszahlen-von-H%C3%B6lzern/

113. NeuhausFH (1981)Elastizitatszahlen von Fichtenholz in Abhangigkeit von derHolzfeuchtigkeit (Elasticity constants of spruce wood in relation to the wood moisture content).Dissertation,Ruhr-UniversitatBochum (In German)https://books.google.ru/books/about/Elastizit%C3%A4tszahlen_von_Fichtenholz_in_A.html?id=nRv0SgAACAAJ&redir_esc=y

114. Niemz P, Caduff D (2008) Untersuchungen zur Bestimmung der Poissonschen Konstanten an Fichtenholz (Investigations to determine the Poisson's ratio of spruce wood). Holz Roh Werkst 66, 1–
4. (In German) https://doi.org/10.1007/s00107-007-0188-2

115. Wang G-G, Zhang X, Gao Z-Z, Wang Y-L, Yu C, Wang Z (2017) Dynamic testing and analysis of Poisson's ratio constants of timber. In: Mechanics and Architectural Design, 9-18 https://doi.org/10.1142/9789813149021_0002

116. Gao Z, Zhang X, Wang Y, Yang R, Wang G, Wang Z (2016) Measurement of the Poisson's Ratio of Materials Based on the Bending Mode of the Cantilever Plate. BioResources 11(3), 5703-5721. DOI:10.15376/BIORES.11.3.5703-5721

117. Cao Y, Li M, Wang Z, Wang Y, Gao Z (2019) Dynamic Testing and Analysis of Poisson's Ratio of Lumbers Based on the Cantilever-Plate Bending Mode Shape Method, Journal of Testing and Evaluation, https://doi.org/10.1520/JTE20160521.

118. Pal P (2019) Dynamic Poisson's Ratio and Modulus of Elasticity of Pozzolana Portland Cement Concrete. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 9(2), 131-144. https://core.ac.uk/download/pdf/228833802.pdf

119. Kumpenza C., Matz P., Halbauer P., Grabner M., Steiner G., Feist F., Muller U. Measuring Poisson's ratio: mechanical characterization of spruce wood by means of non-contact optical gauging techniques. Wood Science and Technology, 52, 1451–1471 (2018) https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-018-1045-7

120. Keunecke D, Hering S, Niemz P (2008) Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. Wood Sci Technol 42:633–647. https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-008-0192-7

121. Valla A., Konnerth J., Keunecke D. et al Comparison of two optical methods for contactless, full field and highly sensitive in-plane deformation measurements using the example of plywood. Wood Sci Technol 45, 2011 755–765. https://doi.org/10.1007/s00226-010-0394-7

122. Mishnaevsky Jr., L. & Qing, H. (2008). Micromechanical modelling of mechanical behaviour and strength of wood: State-of-the-art review, Computational Materials Science, Vol. 44(2), pp. 363-370.

123. D. Supriatna, C. Steinke, M. Kaliske (2020). Advances in computational dynamics for inelastic continua with anisotropic material behavior: Formulation and numerical implementation of inelastic ductile behavior of spruce wood. International Journal of Solids and Structures 198 pp. 41–56.

124. Ando, K. & Onda, H. (1999). Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure II: First buckling mechanism of cell walls under radial compression using the generalized cell model, Journal of Wood Science, Vol. 45(3), pp. 250-253.

125. Moden, C.S. (2008). A two-phase annual ring model of transverse anisotropy in softwoods, Composites Science and Technology, Vol. 68(14), pp. 3020-3026.

126. Saavedra Flores, E.I., De Souza Neto, E.A. & Pearce, C. (2011). A large strain computational multiscale model for the dissipative behaviour of wood cell-wall, Computational Materials Science, Vol. 50(3), pp. 1202-1211.

127. Cave, I.D. (1976). Modelling the structure of the softwood cell wall for computation of mechanical properties, Wood Science and Technology, Vol. 10(1), pp. 19-28.

128. Yamamoto, H. (1998). Generation mechanism of growth stresses in wood cell walls: Roles of lignin deposition and cellulose microfibril during cell wall maturation, Wood Science and Technology, Vol. 32(3), pp. 171-182.

129. Guitard, D., Masse, H., Yamamoto, H. & Okuyama, T. (1999). Growth stress generation: A new mechanical model of the dimensional change of wood cells during maturation, Journal of Wood Science, Vol. 45(5), pp. 384-391.

130. Koponen, S., Toratti, T. & Kanerva, P. (1989). Modelling longitudinal elastic and shrinkage properties of wood, Wood Science and Technology, Vol. 23(1), pp. 55-63.

131. Koponen, S., Toratti, T. & Kanerva, P. (1991). Modelling elastic and shrinkage properties of wood based on cell structure, Wood Science and Technology, Vol. 25(1), pp. 25-32.

132. Hofstetter, K., Hellmich, C. & Eberhardsteiner, J. (2005). Development and experimental validation of a continuum micromechanics model for the elasticity of wood, European Journal of Mechanics, A/Solids, Vol. 24(6), pp. 1030-1053.

133. Persson, K. (2000). Micromechanical modelling of wood and fibre properties, Doctoral Thesis, Lund University, Lund, Sweden, 213 p.

134. Fortino, S., Hradil, P., Salminen, L. & De Magistris, F. (2015). A 3D micromechanical study of deformation curves and cell wall stresses in wood under transverse loading, Journal of Materials Science, Vol. 50(1), pp. 482-492.

135. Adalian, C. & Morlier, P. (2001). A model for the behaviour of wood under dynamic multiaxial compression, Composites Science and Technology, Vol. 61(3), pp. 403-408.

136. Holmberg, S. (1998). A numerical and experimental study of initial defibration of wood, Doctoral Thesis, Lund University, Structural Mechanics, Lund, Sweden, 203 p.

137. Bjorkqvist, T. (2002). A design method for an efficient fatigue process in wood grinding - an analytical approach, Doctoral Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 104 p.

138. Bjorkqvist, T., Lautala, P., Saharinen, E., Paulapuro, H., Koskenhely, K. & Lonnberg, B. (1999). Behaviour of spruce sapwood in mechanical loading, Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 25(4), pp. 118-123.

139. Hanhijarvi A. & Mackenzie-Helnwein P. (2003). Computational analysis of quality reduction during drying of lumber due to irrecoverable deformation. I: Orthotropic viscoelastic-mechanosorptive-plastic material model for the transverse plane of wood, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 129(9), pp. 996-1005.

140. Milch J., Tippner J., Sebera V., Brabec, M. (2016). Determination of the elasto-plastic material characteristics of Norway spruce and European beech wood by experimental and numerical analyses, Holzforschung, Vol. 70(11), pp. 1081-1092.

141. Kollman F.F., Cote W.A. (1968). Principles of Wood Science and Technology, Volume 1 SolidWood. Vol. 1 ed., Springer-Verlag, New York, USA, 592 p.

142. Hopkinson, B. (1914). A Method of Measuring the Pressure in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 213, pp. 437-456.

143. Davies, R.M. (1948). A critical study of the Hopkinson pressure bar, Philos. Trans. R. Soc. London, Sect. B, Vol. 240(821), pp. 375-457.

144. Kolsky, H. (1949). An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, Proc. Phys. Soc. London, Sect. B, Vol. 62(II-B), pp. 676-700. doi:10.1088/0370-1301/62/11/302

145. Gama, B.A. (2004). Hopkinson bar experimental technique: A critical review, Applied Mechanics Reviews, Vol. 57(4), pp. 223-250.

146. Gray III, G.T. (2000). Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing, in: Vol 8 Mechanical Testing and Evaluation, ASM Handbook, ASM International, pp. 462-476.

147. Uhmeier, A. & Salmen, L. (1996a). Influence of strain rate and temperature on the radial compression behavior of wet spruce, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, Vol. 118(3), pp. 289-294.

148. Брагов А.М., Ломунов А.К., Русин Е.Е. Методика исследования динамических свойств материалов с использованием составных стержней Гопкинсона // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т, Горький. -1980. -Вып.16., С.138-144.

149. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils // DYMAT Journal. 1994. Vol.1, №3. p.253-259.

150. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky Method for Confined Tests of Soft Soils // Experimental Mechanics. 1996. Vol.36, p.237-242.

151. Брагов А.М. Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов / А.М.Брагов, В.П.Гандурин, Г.М.Грушевский, А.К.Ломунов // Прикладная механика и техническая физика, 1995, т.36, №3, с.179-186.

152. Брагов А.М. Методические особенности изучения динамической сжимаемости мягких грунтов в диапазоне давлений 0.05-1.5 ГПа / А.М.Брагов, В.П.Гандурин, Г.М.Грушевский, А.К.Ломунов // Химическая физика 1995, т.14, N 2-3, с.126-135.

153. Брагов А.М., Ломунов А.К., Сергеичев И.В. Модификация метода Кольского для исследования свойств малоплотных материалов при высокоскоростном циклическом деформировании // Прикладная механика и техническая физика, 2001, т.42, №6, с.199-204.

154. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Баландин Вл.Вл. Оценка радиальной деформации образца на основе теоретико-экспериментального анализа методики динамических испытаний материалов в жесткой обойме. Проблемы прочности и пластичности, 2016, Вып. 78(4), с.378-387.

155. Златин Н.А., Пугачев Г.С., Степанов В.А. О разрушающих напряжениях при коротком ударе. // ЖТФ, 1979, т.49, 8, с.1786-1788.

156. LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume2, Version 960, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 2001.

157. Murray, Y.D., Manual for LS-DYNA Wood Material Model 143, Report No. FHWAHRT-04-097, Federal Highway Administration, 2004.

158. Y.D. Murray, J.D. Reid, R.K. Faller, B.W. Bielenberg, and T.J. Paulsen. Evaluation of LS-DYNA Wood Material Model 143, Report No. FHWA-HRT-04-096, Federal Highway Administration, 2005.

159. Константинов А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дисс... канд. техн. наук.-Нижний Новгород, 2007