

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-1-5-21

## **ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСИНЫ\***

© 2021 г.

**Брагов А.М.<sup>1</sup>, Константинов А.Ю.<sup>1,2</sup>,  
Ломунов А.К.<sup>1</sup>, Южина Т.Н.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский институт механики  
Национального исследовательского Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Научно-образовательный математический центр «Математика  
технологий будущего» Национального исследовательского Нижегородского  
государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород,  
Российская Федерация*

lomunov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 02.11.2020*

Применение древесины разных пород в качестве демпфирующего материала в конструкциях контейнеров для транспортирования опасных материалов в различных климатических условиях приводит к необходимости изучения свойств древесины при повышенных температурах. Представлены результаты динамических испытаний осины при одноосном сжатии при условии повышенной до +60 °С температуры. Испытания проводились по методу Кольского на установке с разрезным стержнем Гопкинсона. Для исследования анизотропии свойств образцы осины были изготовлены и испытаны при вырезке образцов вдоль и поперек направления волокон. В результате обработки экспериментальных данных были получены динамические диаграммы деформирования. По данным экспериментов определены напряжения, при которых имеют место нарушения целостности образцов. Представлены также средние значения модулей деформации на участках активного нагружения. Наибольшая крутизна нагрузочных ветвей и наибольшие разрушающие напряжения наблюдались для образцов при нагружении вдоль волокон, а наименьшие величины этих параметров отмечены при нагружении поперек волокон. Для образцов при нагружении вдоль волокон при скоростях деформации выше 1500 с<sup>-1</sup> после достижения предельных значений напряжений наблюдается спад (релаксация) напряжений при росте деформаций. Для образцов при нагружении поперек волокон более характерен почти горизонтальный участок диаграммы или даже с некоторым упрочнением. Оценено влияние повышенной температуры на прочностные и деформационные свойства осины. Отмечена тенденция к некоторому снижению диаграмм при температуре +60 °С по сравнению с диаграммами при комнатной температуре. При этом уменьшаются

---

\* Анализ проблемы и имеющихся результатов по исследованиям динамических свойств древесины выполнен при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (проект 0729-2020-0054). Экспериментальные исследования осины выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-38-90226).

как модули на нагруженных и разгруженных ветвях, так и предельные (разрушающие) напряжения. Полученные особенности поведения образцов осины при повышенной температуре следует учитывать при разработке модели деформирования древесины.

*Ключевые слова:* древесина, метод Кольского, сжатие, диаграмма деформирования, температура.

## **Введение**

Для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива и высокоактивных загрязненных веществ используют транспортно-упаковочные комплекты (ТУК), которые для снижения динамических нагрузок на корпус и защиты его содержимого от повреждения вследствие неаккуратного обращения с ним, в том числе при аварийных условиях эксплуатации, снабжают демпфирующими амортизаторами [1–4]. Согласно международным и национальным требованиям [5, 6], конструкция упаковки должна выдерживать нормальные и регламентированные аварийные условия транспортировки. Демпфирующий материал в конструкции демпферного устройства ТУК должен удовлетворять требованиям высокой способности поглощать и рассеивать энергию удара, невысокой плотности материала (так как от нее зависит масса демпфирующего устройства и, как следствие, масса всего транспортно-упаковочного комплекта), доступности материала, возможности механической обработки, минимальной стоимости и экологичности.

Анализ литературы показал, что древесина является сложным натуральным полимерным композиционным материалом, обладающим пористостью и ярко выраженной анизотропией механических характеристик [7–11]. Отмечается также существенное влияние скорости деформации на деформационные и прочностные характеристики древесины. Так, исходя из данных [12], максимальное напряжение в образцах из пробкового дерева (balsa wood) при одноосном сжатии увеличивается в 1,75 раза при возрастании скорости деформации от  $10^{-3}$  до  $10^2$  с<sup>-1</sup> и еще в 1,3 раза при дальнейшем увеличении скорости деформации до 3000 с<sup>-1</sup>. В статье [13] на примере моделирования процесса индентирования конусов с различными углами раствора в образцы из пробкового дерева показано, что учет анизотропии свойств является обязательным условием для получения реалистичных результатов. Другой важной особенностью является существенное отличие поведения древесины в зависимости от вида напряженного состояния. Так, деформирование южной желтой сосны при растяжении и сдвиге носит хрупкий характер, в то время как на диаграмме деформирования при сжатии наблюдается пластический участок [14].

В качестве демпфирующего материала наряду с алюминием или медью предлагается использовать древесину разных пород, фиброкерамзитобетон и синтетические пеноматериалы. При выборе демпфирующего материала одним из критериев сравнительной оценки выступают удельные показатели, определяемые отношением механической характеристики (предел прочности, модуль упругости, ударная вязкость, твердость) к плотности материала. Удельные характеристики имеют особое значение, когда от конструкции требуется высокая прочность и способность поглощать удар при малом весе.

По удельной прочности древесина вполне конкурентоспособна с другими современными материалами. Кроме того, древесные материалы обладают высокой способностью поглощать энергию удара. При длительной нагрузке древесина ве-

дет себя как весьма податливое тело, деформации которого велики, а при кратковременной нагрузке, соответствующей удару, древесина обладает свойствами достаточно жесткого малодеформируемого тела. Древесина имеет малую плотность, хорошо механически обрабатывается, является доступным и сравнительно дешевым материалом. В Германии распространенной конструкцией ограничителя удара является сварная конструкция из стального листа, заполненная древесиной. Древесный материал является основным поглотителем энергии, а стальной лист обеспечивает целостность ограничителя удара.

В мире активно ведется разработка моделей деформирования и разрушения древесины, которые могут использоваться в различных расчетных комплексах для моделирования поведения технически сложных конструкций, имеющих в своем составе элементы из древесины [12, 13, 15–17]. Основополагающая модель для дерева изучалась в течение многих лет. Новые модели могут учитывать температуру и скорость деформации и в большинстве случаев способны удовлетворять потребностям расчетов деревянных конструкций. Однако сложность структуры дерева означает, что ни одна модель не может быть использована для всех целей, и для решения технически сложных проблем необходимо использовать разные модели.

Древесина обладает значительными анизотропными деформационными свойствами при упругом и пластическом сжатии. Это является результатом ее клеточной микроструктуры. Клетки выровнены по своей длинной оси в направлении ствола. Поэтому изменение деформации вдоль длинной оси ячеек (продольной) отличается от изменения деформации ячеек, перпендикулярных этому направлению. Тангенциальное и радиальное направления являются поперечными к направлению волокон 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 [18] используются термины «перпендикулярно волокнам» (когда между радиальным и тангенциальным направлениями не делается различия) и «параллельно волокнам», чтобы описывать продольное направление. Древесина может быть описана как упруго-пластический, трансверсально-изотропный ячеистый материал. Поведение древесины под нагрузкой можно разделить на три типа: упругое, пластичное и в виде уплотнения. Иногда уплотнение не кажется очень важным, но его нельзя игнорировать при механическом анализе.

Ранее [19] были исследованы свойства осины при комнатной температуре, однако, поскольку контейнеры транспортируют в различных климатических условиях, имеется настоятельная необходимость изучения свойств древесины при повышенных до +50–+60 °С температурах.

В настоящей статье исследовано поведение образцов осины с продольной и поперечной вырезкой образцов при температуре +60 °С при динамическом сжатии.

### **Экспериментальная методика**

Для проведения динамических испытаний на сжатие образцов осины при повышенной температуре была применена экспериментальная установка [20], реализующая метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). В комплект установки входит нагружающее устройство (газовая пушка), комплект мерных стержней и регистрирующая аппаратура. Схема установки показана на рис. 1. Мерные стержни диаметром 20 мм изготовлены из алюминиевого сплава Д16Т.

С помощью малобазных тензорезисторов, наклеенных на боковую поверхность мерных стержней, регистрируются упругие импульсы деформации: падающий  $\epsilon^i(t)$ , отраженный  $\epsilon^r(t)$  и прошедший  $\epsilon^t(t)$ , с помощью которых по формулам метода Кольского [21] определяются параметрические зависимости развития во времени напряжения, деформации и скорости деформации образца. После синхронизации этих импульсов строятся кривые  $\sigma_s(\epsilon_s)$  и  $\dot{\epsilon}_s(\epsilon_s)$ .

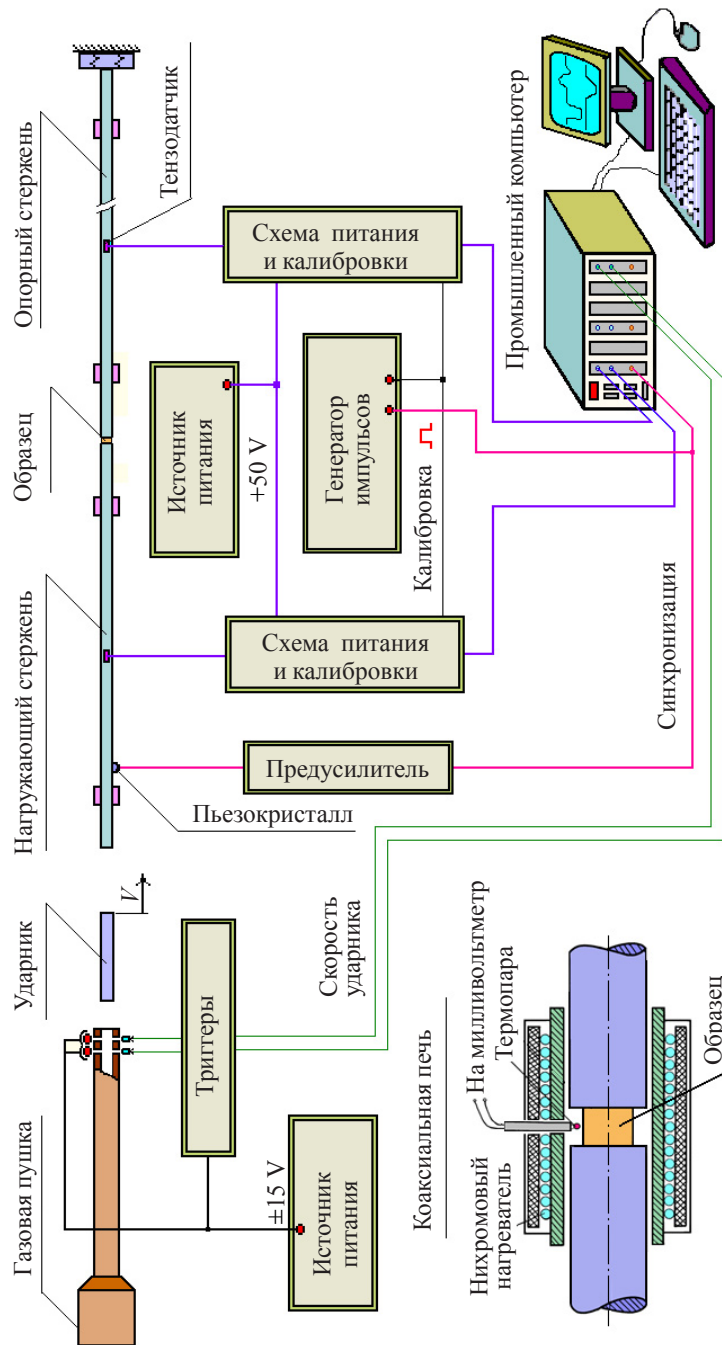


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Поскольку длина нагружающего импульса значительно больше длины образца, образец подвергается сжатию в условиях одноосного и однородного напряженного состояния, то есть процесс деформирования подобен квазистатическому, только происходящему при высокой скорости деформации (около  $10^3 \text{ с}^{-1}$ ).

Для регистрации упругих импульсов деформации в мерных стержнях применяется высокоточная измерительная система фирмы National Instruments. Обработка первичной экспериментальной информации, включающая в себя синхронизацию исходных импульсов и их сглаживание, а также построение диаграммы деформирования  $\sigma_s(\epsilon_s)$  с зависимостью скорости деформации  $\dot{\epsilon}_s(\epsilon_s)$  осуществляется с использованием оригинальной программы.

Для нагрева испытуемых образцов до  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$  используется миниатюрная печь трубчатой конструкции (см. рис. 1), надеваемая на торцы мерных стержней с расположенным между ними образцом. Печь представляет собой трубку длиной 150 мм с внутренним диаметром 22 мм. На трубку намотан слой нихромовой проволоки, изолированный снаружи слоем слюды, асбеста и стеклоткани. В середине длины печи оставлено небольшое отверстие для пропуска внутрь печи к боковой поверхности образца измерительной ХК-термопары для контроля температуры. В течение рабочего дня торцы мерных стержней в рабочей зоне постоянно находились в нагретом состоянии, что исключало уменьшение температуры образца при его помещении в рабочее положение. Поскольку эта температура составляла величину, существенно меньшую, чем половина температуры плавления материала стержней, при которой происходят уже заметные изменения упругих характеристик материала стержней (скорость упругих волн и модуль упругости), какой-либо коррекции формул и способа обработки экспериментальной информации не производилось.

Порядок проведения испытаний следующий:

– печь надевалась на торцы мерных стержней, подключалась к регулируемому источнику напряжения и производился ее нагрев до температуры  $\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  (контроль по термопаре) в течение по меньшей мере 30–50 минут; таким образом, торцы мерных стержней во время испытаний постоянно находились в нагретом состоянии, что исключало уменьшение температуры образца при его размещении между торцами стержней;

– производился обмер всех наличных образцов партии (порода древесины и угол вырезки), взвешивание их и определение начальной плотности образцов;

– образцы перед испытаниями помещались в термошкаф с температурой  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ , где выдерживались не менее часа, поскольку древесина имеет низкую теплопроводность; для уменьшения высыхания образцы располагались в шкафу в металлической коробке;

– подготавливалась к испытанию экспериментальная установка, печь сдвигалась вдоль одного из мерных стержней, освобождая зазор между их торцами, образец извлекался из термошкафа, достаточно быстро (за 10–15 с) помещался в рабочее положение и на него надвигалась печь;

– испытание производилось после небольшой (1–2 мин) выдержки образца в полости печи, затем образец извлекался из печи и, в случае сохранения его целостности, достаточно быстро (менее 1 мин) обмерялся, устанавливался в рабочее положение, выдерживался в течение 2–3 мин и нагружался вновь.

## Образцы для испытаний

Для проведения испытаний при сжатии осины воздушной влажности (~12%) при повышенной температуре были изготовлены образцы в виде цилиндров высотой ~10 мм и диаметром ~20 мм с различным направлением вырезки образцов из брусьев относительно расположения волокон. Углы между направлением приложения нагрузки и направлением расположения волокон составляли 0° и 90°. Плоские торцы образцов перед испытанием, как правило, тщательно отшлифовывались.

## Результаты испытаний

Проведен цикл испытаний образцов осины с вырезкой вдоль и поперек волокон при температуре +60 °С. Целью экспериментов было определение предельного напряжения, при котором в образце появляются видимые нарушения сплошности, трещины, сколы. Для этого образцы нагружались с различными скоростями деформации, определяемыми скоростью ударника. Некоторые образцы, сохранившие свою видимую целостность после одного цикла нагружения, нагружались второй раз (а отдельные – даже и третий раз) с увеличивающейся с каждым разом амплитудой нагружающей волны.

Основной предпосылкой метода Кольского является однородность напряженно-деформированного состояния образца во время испытания. Это условие проверяется путем сравнения импульсов деформации на двух торцах образца  $\epsilon^i(t) + \epsilon^r(t) = \epsilon^i(t)$  в течение всего испытания. На рис. 2 показаны отмеченные цифровыми маркерами импульсы деформации в мерных стержнях: 1 – падающий  $\epsilon^i(t)$ , 2 – отраженный  $\epsilon^r(t)$ , 3 – прошедший  $\epsilon^t(t)$ . Красной линией без цифрового маркера показан суммарный импульс  $\epsilon^i(t) + \epsilon^r(t)$ . Видно хорошее соответствие импульсов деформаций на обоих торцах образца в течение всего нагружения.

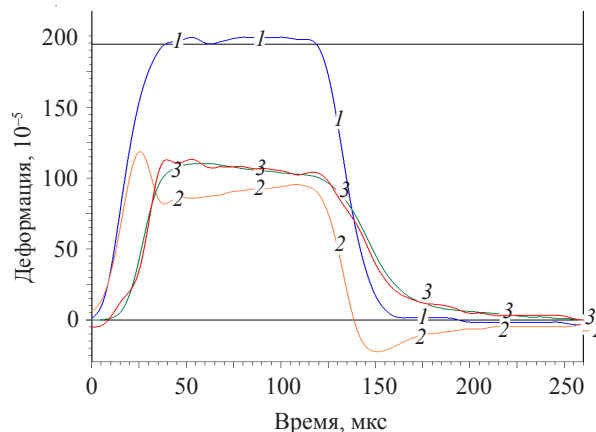


Рис. 2. Импульсы деформации в мерных стержнях

Можно отметить, что при динамическом нагружении образца древесины отраженный и прошедший импульсы не возвращаются на нулевую линию после окончания процесса нагружения. Процесс разгрузки образца из древесины имеет очень большую длительность вследствие большой вязкости материала, поэтому зарегистрировать процесс разгрузки образца полностью не удастся из-за ограниченной длины мерных стержней.

В таблице 1 приведены условия проведения испытаний образцов вдоль и поперек волокон и некоторые полученные прочностные и деформационные характеристики. Каждому испытанию присвоен условный номер, состоящий из трехзначного кода материала и (после дефиса) номера конкретного образца в испытываемой партии. Образцы в процессе испытаний подвергались как однократному нагружению до разрушения, так и многократным повторным нагружениям, поскольку целостность таких образцов после испытаний в большей или меньшей степени сохранялась. Номер нагружения образца указан в номере опыта после слеша. Диаграммы повторных нагружений располагаются на оси деформации условно: последовательно за соответствующими диаграммами предыдущего цикла нагружения.

Таблица 1

**Условия испытаний и полученные результаты**

Номер опыта	Плотность образца, г/см <sup>3</sup>	Длина ударника, мм	Скорость ударника, м/с	Остаточная деформация, %	Модуль на нагрузочной ветви, МПа	Предел прочности, МПа
Нагружение вдоль волокон						
312-07/1	0,496	300	11,4	2,70	2229	72,0
312-07/2	0,496	300	13,7	2,20	3074	81,6
312-07/3	0,496	300	20,0	8,50	3333	78,7
312-08/1	0,479	300	11,1	1,70	1512	56,5
312-08/2	0,479	300	13,5	2,50	2923	75,7
312-08/3	0,479	300	20,0	7,50	2961	84,2
312-09/1	0,478	300	15,9	5,00	2229	79,1
312-09/2	0,478	300	20,0	7,00	3071	86,2
312-10/1	0,489	300	20,0	7,40	2349	84,6
312-10/2	0,489	200	27,8	17,50	2210	74,5
312-11	0,484	200	28,1	25,80	2930	86,5
Нагружение поперек волокон						
316-09/1	0,486	300	4,8	2,00	289	5,3
316-09/2	0,486	300	4,2	1,00	149	4,2
316-09/3	0,486	300	4,7	1,00	145	3,8
316-09/4	0,486	300	15,4	22,00	124	7,19
316-10/1	0,488	300	4,1	2,00	351	4,9
316-10/2	0,488	300	7,3	4,50	150	6,3
316-10/3	0,488	300	9,3	8,00	117	7,0
316-10/4	0,488	300	15,9	19,00	108	11,0
316-11	0,376	300	15,6	8,50	110	3,8
316-12	0,423	200	28,1	38,00	139	5,2

На рис. 3–6 показаны диаграммы деформирования  $\sigma_s(\epsilon_s)$  и соответствующие зависимости скорости деформации  $\dot{\epsilon}_s(\epsilon_s)$  для образцов при нагружении вдоль волокон. Диаграммы повторных испытаний расположены на оси деформации условно: каждая последующая диаграмма начинается с деформации, полученной образцом в предыдущем цикле нагрузки.

На рис. 3 показаны диаграммы трехкратного нагружения образца 312-07 вдоль волокон при нарастающей от опыта к опыту скорости ударника, но достаточно близких значениях скорости деформации при сохранении целостности образца (кривые 312-07/1 и 312-07/2) и небольшом разрушении образца (кривая 312-07/3). После

двух первых циклов нагружения образец сохранил свою целостность, хотя приобрел остаточную деформацию около 2%. В третьем цикле остаточная деформация составила 8,5%, образец получил равномерную радиальную раздачу и на его боковой поверхности образовались незначительные продольные трещины.

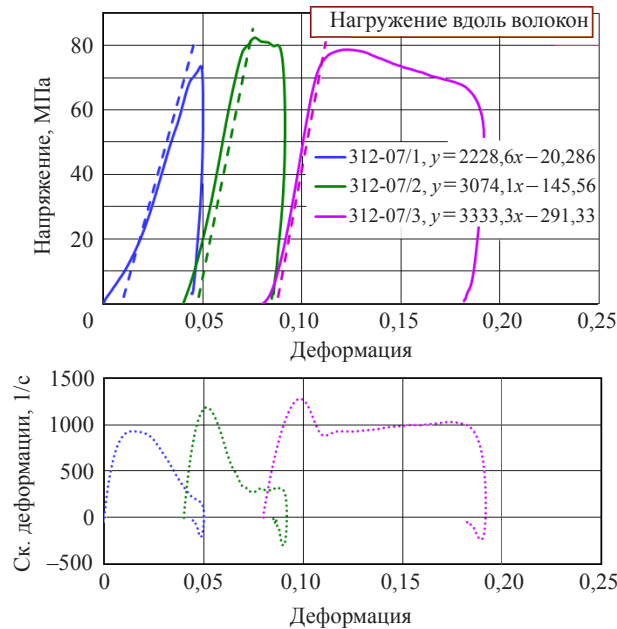


Рис. 3. Повторное нагружение образца 312-07 вдоль волокон

В нижней части рисунка пунктирными линиями приведены соответствующие зависимости изменения скорости деформации  $\dot{\epsilon}_s(\epsilon_s)$ . Видно, что при отсутствии разрушения образца (первый цикл) скорость деформации после своего максимума неуклонно спадает, тогда как при разрушении образца (третий цикл) скорость деформации нарастает на участке активного нагружения, затем начинает уменьшаться, но после достижения образцом пика напряжения в начале участка релаксации скорость деформации вновь начинает увеличиваться.

Нагрузочные ветви диаграмм  $\sigma_s(\epsilon_s)$  нелинейны, особенно в начальной части, разгрузочные ветви ближе к линейным и имеют большую крутизну. Как видно по полученным кривым, прочность образца при скорости деформации  $\sim 800 \text{ с}^{-1}$  составила около 75 МПа. При превышении этого уровня на диаграммах наблюдается участок релаксации напряжений с ростом степени деформации, что свидетельствует о разрушении. Но, тем не менее, после окончания действия нагружающего импульса происходит упругая разгрузка образца.

Особенностью при циклическом нагружении вдоль волокон образцов из осины является некоторое увеличение модуля деформации  $d\sigma/d\epsilon$  (крутизна участка активного нагружения), то есть материал после предыдущего нагружения становится более жестким. Штриховыми линиями показаны линейные аппроксимации участков активного нагружения, уравнения которых приведены на рисунке. В третьем цикле нагружения модуль деформации увеличился по сравнению с модулем деформации в первом цикле в полтора раза. Определенные величины модулей нагрузочных ветвей диаграмм занесены в таблицу 1.



На рис. 4 приведены результаты трехкратного нагружения образца 312-08 с нарастающей от опыта к опыту скоростью деформации. Как видно в таблице 1, степень деформации образца в первых двух циклах нагружения незначительна, тогда как в третьем цикле явно происходит разрушение образца: образование трещин на боковой поверхности образца и раскалывание его на куски.

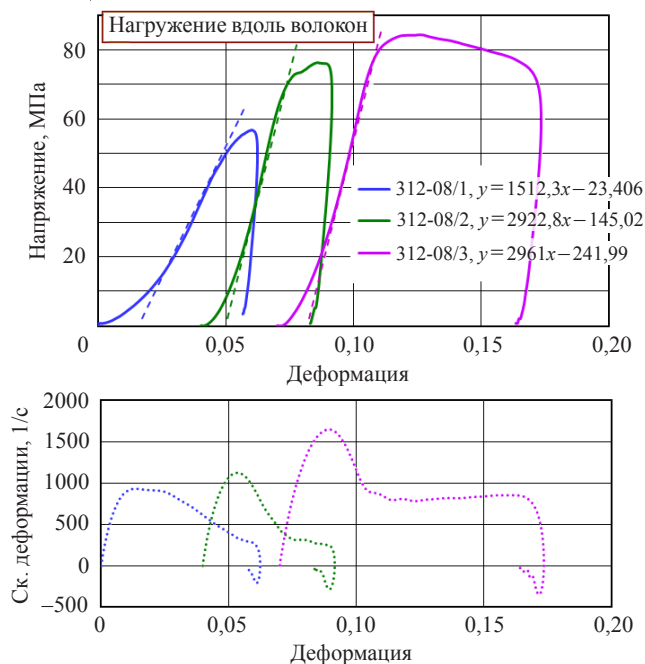


Рис. 4. Повторное нагружение образца 312-08 вдоль волокон

По полученным кривым  $\sigma_s(\epsilon_s)$  также определены модули деформации участков активного нагружения. Можно видеть ту же тенденцию, что у предыдущего образца: модуль деформации увеличивается при повторных нагружениях.

На рис. 5 показано совместно двукратное нагружение вдоль волокон одного образца 312-09 с увеличивающейся от опыта к опыту скоростью деформации (при сохранении целостности образца после первого цикла нагружения) и однократное нагружение другого образца 312-11 при большой скорости нагружения и разрушениях образца. Заметна существенно меньшая нелинейность начального участка нагрузочной ветви. Образец после испытания имел несколько продольных трещин, но, тем не менее, после окончания действия нагружающего импульса произошла упругая разгрузка образца. Наличие упругой разгрузки образца свидетельствует о том, что при сжатии древесины вдоль волокон происходит нарушение относительно слабых связей между волокнами, а сами волокна незначительно сжимаются вдоль и искривляются, а после окончания нагрузки происходит их выпрямление.

На этом рисунке также видно увеличение модуля деформации  $d\sigma/d\epsilon$  при повторном нагружении образца 312-09. Штриховыми линиями показаны линейные аппроксимации участков активного нагружения, уравнения которых приведены на рисунке. При однократном нагружении с большой скоростью деформации модуль деформации оказался больше, чем при первых нагружениях образцов.

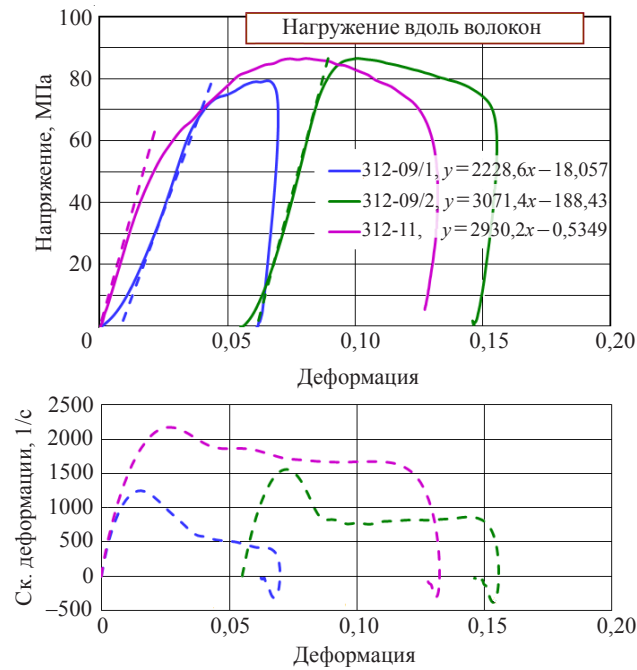


Рис. 5. Нагружение образцов 312-09 и 312-11 вдоль волокон

На рис. 6 показаны диаграммы двукратного нагружения образца 312-10, причем в первом цикле нагрузки образец приобрел остаточную деформацию 7,4%, хотя внешних повреждений замечено не было.

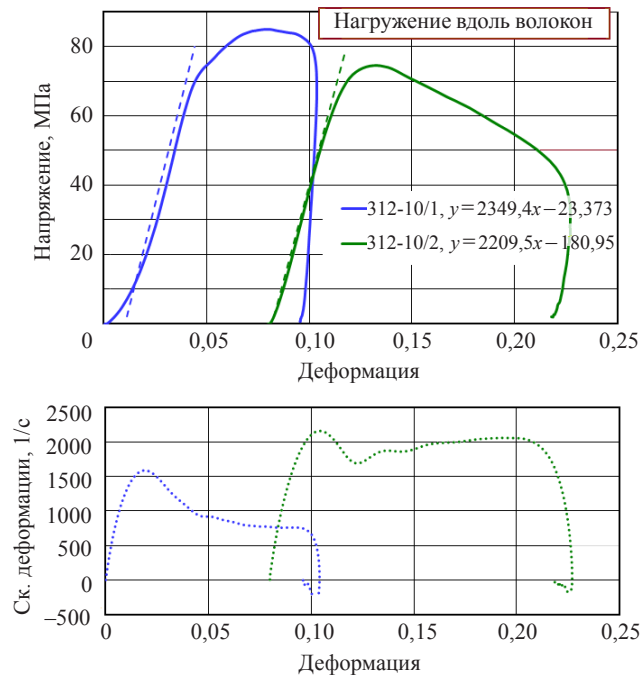


Рис. 6. Двукратное нагружение образца 312-10 вдоль волокон

Второй цикл нагружения с большой скоростью деформации не привел к росту достигнутых напряжений и увеличению модуля деформации. По-видимому, в образце при первом нагружении произошли серьезные внутренние повреждения и его несущая способность уменьшилась.

Образцы с поперечным расположением волокон также нагружались по несколько раз для оценки выносливости материала. Полученные кривые  $\sigma_s(\epsilon_s)$  и соответствующие зависимости скорости деформации  $\dot{\epsilon}_s(\epsilon_s)$  приведены на рис. 7–9. Вследствие высокой вязкости древесины (особенно ее межволоконных соединительных тканей) разгрузка образца после окончания действия нагружающего импульса имеет большую длительность, и проследить ее до конца не удастся из-за недостаточной длины мерных стержней. Следует отметить, что амплитуда прошедшего импульса для образцов осины при нагружении поперек волокон составляет очень малую величину (порядка 1-2 мВ), поэтому сигналы с опорного стержня подвергались предварительному усилению. На рис. 7 показано четырехкратное последовательное нагружение образца 316-09, а на рис. 8 – такое же четырехкратное последовательное нагружение образца 316-10. Условия испытаний, полученные образцами остаточные деформации, а также определенные по диаграммам прочностные и деформационные характеристики приведены в таблице 1.

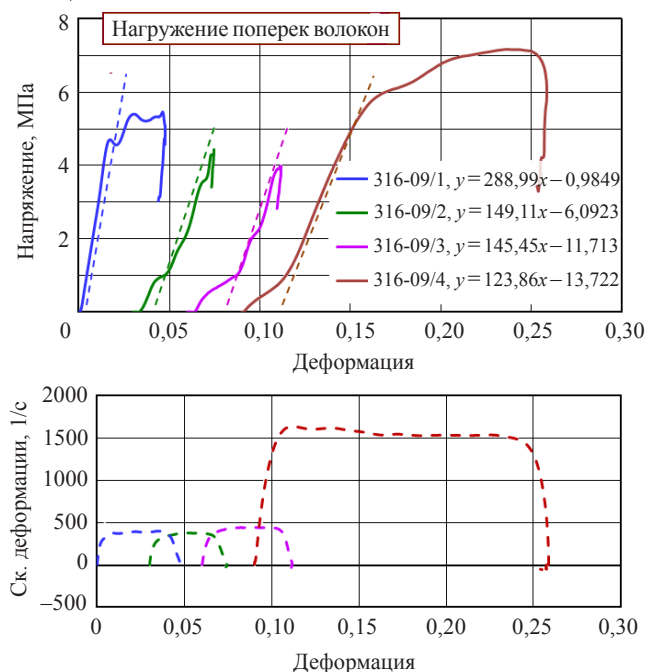


Рис. 7. Четырехкратное нагружение образца 316-09 поперек волокон

Приведенные на рис. 7 и 8 диаграммы испытаний образцов с поперечным расположением волокон свидетельствуют о том, что на них, в отличие от образцов с продольным направлением волокон, наблюдается существенное уменьшение линейности и крутизны нагрузочной ветви при повторных циклах нагружения. Замечен ступенчатый характер нагрузочной ветви, причем величина ступеньки уменьшается, если максимальное напряжение при повторных нагружениях с близкой скоростью деформации становится больше.

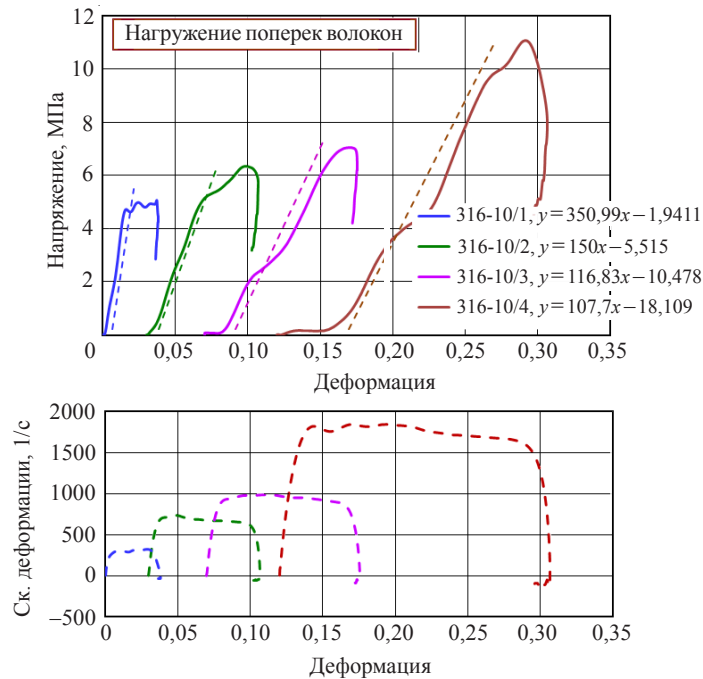


Рис. 8. Четырехкратное нагружение образца 316-10 поперек волокон

На рис. 9 показаны диаграммы двух образцов 316-11 и 316-12 при нагружении поперек волокон со скоростями деформации, отличающимися в 2 раза. Видно сильное влияние скорости деформации на прочностные свойства. Модули деформации участка активного нагружения отличаются на  $\sim 30\%$ .

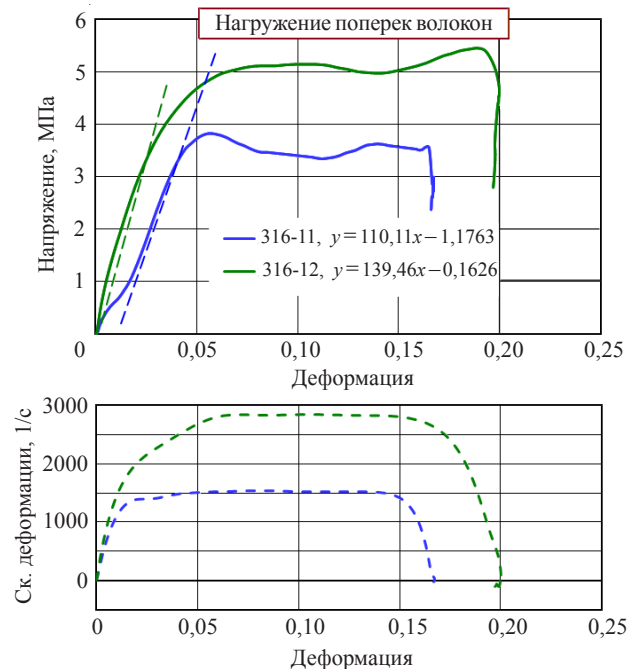


Рис. 9. Нагружение образцов 316-11 и 316-12 поперек волокон

Сравнение механических характеристик древесины осины при повышенной температуре с аналогичными характеристиками, полученными ранее [19] при нормальной температуре, показано на рис. 10 и 11.

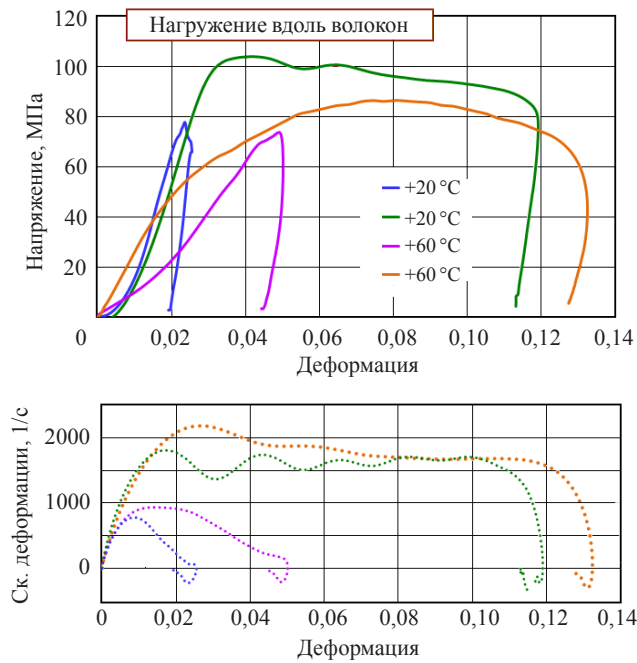


Рис. 10. Влияние температуры на поведение образцов осины при нагружении вдоль волокон

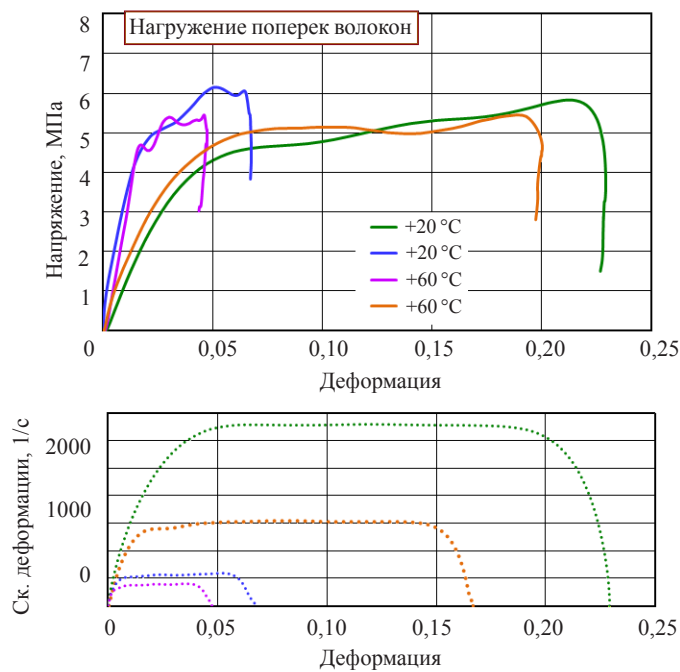


Рис. 11. Влияние температуры на поведение образцов осины при нагружении поперек волокон

Хорошо прослеживается тенденция уменьшения модуля деформации участка активного нагружения образцов вдоль волокон (см. рис. 10). Прочностные свойства при повышенной температуре немного уменьшаются. Однозначную трактовку сравнения результатов испытаний образцов поперек волокон (см. рис. 11) дать затруднительно вследствие сложностей достоверной регистрации сигналов малой амплитуды с опорного стержня и недостаточного количества образцов для детального исследования.

Как видно из результатов проведенных испытаний, свойства древесины осины при повышенной до  $+60^{\circ}\text{C}$  температуре отличаются от свойств при комнатной температуре. Это следует учитывать при разработке модели деформирования древесины.

### Заключение

По результатам испытаний образцов осины необходимо отметить следующее. Для образцов при нагружении вдоль волокон при скоростях деформации выше  $1500\text{ c}^{-1}$  после достижения предельных значений напряжений наблюдается спад (релаксация) напряжений при росте деформаций. Для образцов при нагружении поперек волокон более характерен почти горизонтальный участок диаграммы деформирования или даже с некоторым упрочнением. После окончания действия нагрузки, несмотря на иногда значительные повреждения образца, происходит упругая разгрузка образца, после которой в нем остается значительная остаточная деформация. Визуальный контроль образцов после этих опытов свидетельствует о частичном разрушении образца, поэтому максимальные значения напряжений могут быть приняты в качестве характеристики прочности материалов при сжатии.

Сравнение механических характеристик древесины осины при повышенной температуре с аналогичными характеристиками при нормальной температуре показало, что модуль деформации участка активного нагружения образцов вдоль волокон при повышенной температуре уменьшается, прочностные свойства при повышенной температуре также уменьшаются.

Выявленные особенности поведения образцов осины при повышенной температуре следует учитывать при разработке модели деформирования древесины.

### Список литературы

1. Neumann M., Herter J., Droste B.O., Hartwig S. Compressive behaviour of axially loaded spruce wood under large deformations at different strain rates. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2011. Vol. 69. Iss. 3. P. 345–357. DOI: 10.1007/s00107-010-0442-x.
2. Eisenacher G., Scheidemann R., Neumann M., Wille F., Droste B. Crushing characteristics of spruce wood used in impact limiters of type B packages. *International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013*. 18–23 Aug. 2013. San Francisco, USA.
3. Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С., Маслов Е.Е., Циберев К.В. Численный анализ прочности ТУК-109Т в нормальных и аварийных условиях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №2. С. 177–187. DOI: 10.32326/1814-9146-2016-78-2-177-187.
4. Васильев А.С., Шегельман И.Р., Романов А.В. Некоторые направления модернизации демпфирующих устройств крупногабаритных контейнеров. *Инженерный вестник Дона*. 2012. №3(21). С. 418–422.
5. Фрейман Э.С., Щупановский В.Д., Калошин В.М. *Основы безопасности перевозки радиоактивных веществ*. М.: Энергоатомиздат, 1986. 176 с.

6. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. Safety Standard Series No TS-R-1*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. 159 p.
7. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Coutellier D., Morvan H. Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities – Part A: Experimental investigations. *Composite Structures*. 2016. Vol. 149. P. 315–328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.058.
8. Reiterer A., Stanzl-Tschegg S.E. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain. *Mechanics of Materials*. 2001. Vol. 33. Iss. 12. P. 705–715. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00086-2.
9. Vural M., Ravichandran G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: Experiment and analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2003. Vol. 40. Iss. 9. P. 2147–2170. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00057-X.
10. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2012. Vol. 48. Iss. 2. P. 101–107. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2010.00802.x>.
11. Gilbertson C.G., Bulleit W.M. Load duration effects in wood at high strain rates. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. Vol. 25. Iss. 11. P. 1647–1654. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000708.
12. Zhao S., Zhao J.X., Han G.Z. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research. *Global Conference on Polymer and Composite Materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 20–23 May 2016. Hangzhou, China. 2016. Vol. 137. P. 012036. DOI:10.1088/1757-899X/137/1/012036.
13. Tagarielli V.L., Deshpande V.S., Fleck N.A., Chen C. A constitutive model for transversely isotropic foams and its application to the indentation for balsa wood. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. P. 666–686. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2004.11.010.
14. Murray Y.D., Reid J.D., Faller R.K., Bielenberg B.W., Paulsen T.J. Evaluation of LS-DYNA wood material model 143. *Report No FHWA-HRT-04-096*. 2005. 152 p.
15. Eisenacher G., Wille F., Droste B., Neumann M. Development of a wood material model for impact limiters of transport packages. *WM2014 Conference*. 2–6 March 2014. Phoenix, Arizona, USA. 2014. P. 1–10. DOI: 10.13140/2.1.2470.7845.
16. Adalian C., Morlier P. "WOOD MODEL" for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2002. Vol. 60. Iss. 1. P. 433–439. DOI: 10.1007/s00107-002-0333-x.
17. Li P., Guo Y.B., Shim V.P.W. A constitutive model for transversely isotropic material with anisotropic hardening. *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 138. P. 40–49. DOI: 10.1016/j.ijstr.2017.12.026.
18. Manual for LS-DYNA wood material model 143. *Publication No FHWA-HRT-04-097*. 2007. 166 p.
19. Bragov A., Gonov M., Konstantinov A., Lomunov A., Yuzhina T. Deformation and destruction at deformation rate of order  $10^3 \text{ s}^{-1}$  in wood of hardwood trees. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics*. Eds. B.E. Abali, I. Giorgio. Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 443–451. DOI: 10.1007/978-3-030-50460-1\_26.
20. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G.
21. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications*. New York: Springer Science & Business Media, 2010. 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-7982-7.

#### References

1. Neumann M., Herter J., Droste B.O., Hartwig S. Compressive behaviour of axially loaded spruce wood under large deformations at different strain rates. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2011. Vol. 69. Iss. 3. P. 345–357. DOI: 10.1007/s00107-010-0442-x.
2. Eisenacher G., Scheidemann R., Neumann M., Wille F., Droste B. Crushing characteristics of spruce wood used in impact limiters of type B packages. *International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013*. 18–23 Aug. 2013. San Francisco, USA.

3. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Maslov E.E., Tsiberev K.V. Chislennyy analiz prochnosti TUK-109T v normalnykh i avariynykh usloviyakh [Numerical stress analysis of TUK-109T package in normal and accident conditions]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 2. P. 177–187 (In Russian).
4. Vasiliev A.S., Shegel'man I.R., Romanov A.V. Nekotorye napravleniya modernizatsii dempfirovushchikh ustroystv krupnogabaritnykh konteynerov [Some directions of modernization of damping devices for large containers]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*. 2012. No 3(21). P. 418–422 (In Russian).
5. Freyman E.S., Shchupanovskiy V.D., Kaloshin V.M. *Osnovy bezopasnosti perevozki radioaktivnykh veshchestv [Fundamentals of safety of transportation of radioactive substances]*. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1986. 176 p. (In Russian).
6. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. Safety Standard Series No TS-R-1*. Vienna. International Atomic Energy Agency. 2009. 159 p.
7. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Coutellier D., Morvan H. Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities – Part A: Experimental investigations. *Compos. Struct.* 2016. Vol. 149. P. 315–328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.058.
8. Reiterer A., Stanzl-Tschegg S.E. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain. *Mech. Mater.* 2001. Vol. 33. Iss. 12. P. 705–715. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00086-2.
9. Vural M., Ravichandran G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: Experiment and analysis. *Int. J. Solids Struct.* 2003. Vol. 40. Iss. 9. P. 2147–2170. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00057-X.
10. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2012. Vol. 48. Iss. 2. P. 101–107. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2010.00802.x>.
11. Gilbertson C.G., Bulleit W.M. Load duration effects in wood at high strain rates. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013. Vol. 25. Iss. 11. P. 1647–1654. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000708.
12. Zhao S., Zhao J.X., Han G.Z. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research. *Global Conference on Polymer and Composite Materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 20–23 May 2016. Hangzhou, China. 2016. Vol. 137. P. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/137/1/012036.
13. Tagarielli V.L., Deshpande V.S., Fleck N.A., Chen C. A constitutive model for transversely isotropic foams and its application to the indentation for balsa wood. *Int. J. Mech. Sci.* 2005. Vol. 47. P. 666–686. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2004.11.010.
14. Murray Y.D., Reid J.D., Faller R.K., Bielenberg B.W., Paulsen T.J. Evaluation of LS-DYNA wood material model 143. *Report No FHWA-HRT-04-096*. 2005. 152 p.
15. Eisenacher G., Wille F., Droste B., Neumann M. Development of a wood material model for impact limiters of transport packages. *WM2014 Conference*. 2–6 March 2014. Phoenix, Arizona, USA. 2014. P. 1–10. DOI: 10.13140/2.1.2470.7845.
16. Adalian C., Morlier P. "WOOD MODEL" for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2002. Vol. 60. Iss. 1. P. 433–439. DOI: 10.1007/s00107-002-0333-x.
17. Li P., Guo Y.B., Shim V.P.W. A constitutive model for transversely isotropic material with anisotropic hardening. *Int. J. Solids Struct.* 2018. Vol. 138. P. 40–49. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.12.026.
18. Manual for LS-DYNA wood material model 143. *Publication No FHWA-HRT-04-097*. 2007. 166 p.
19. Bragov A., Gonov M., Konstantinov A., Lomunov A., Yuzhina T. Deformation and destruction at deformation rate of order  $10^3 \text{ s}^{-1}$  in wood of hardwood trees. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics*. Eds. B.E. Abali, I. Giorgio. Springer Nature Switzerland AG. 2020. P. 443–451. DOI: 10.1007/978-3-030-50460-1\_26.
20. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Imp. Eng.* 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G.
21. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications*. New York. Springer Science & Business Media. 2010. 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-7982-7.



## **INFLUENCE OF INCREASED TEMPERATURE ON THE DYNAMIC PROPERTIES OF ASPEN**

**Bragov A.M.<sup>1</sup>, Konstantinov A.Yu.<sup>1,2</sup>, Lomunov A.K.<sup>1</sup>, Yuzhina T.N.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University  
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Scientific and Educational Mathematical Center “Mathematics of Future Technologies”  
of National Research Lobachevsky State University  
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

As a damping material in the structures of containers for the transportation of hazardous materials, along with plastic metals, fiber-claydite concrete and synthetic foams, it is proposed to use wood of different species. Since containers are transported in different climate regimes, there is an urgent need to study the properties of wood at elevated temperatures. The paper presents the results of dynamic tests of aspen under uniaxial compression under conditions of temperature increased to +60°C. The tests were carried out according to the Kolsky method on a Hopkinson split-bar setup. To study the anisotropy of properties, aspen samples were made and tested by cutting samples along and across the direction of the grains. As a result of processing the experimental data, dynamic stress-strain curves were obtained. According to the experimental data, there are determined the stresses at which the integrity of the samples were violated. The mean values of the moduli of deformation in the active loading regions of stress-strain curves are also presented. The highest slope of the load sections and the highest breaking stresses were observed for the specimens when loaded along the grains, and the smallest values of these parameters were noted when loaded across the grains. For specimens loaded along grains at strain rates above 1500 s<sup>-1</sup>, after reaching the limiting stress values, a decrease (relaxation) of stresses is observed with increasing deformations. For specimens loaded across the grains, an almost horizontal section the diagrams of deforming or even with some strengthening is more typical. The effect of elevated temperature on the strength and deformation properties of aspen is estimated. There is a tendency towards some decrease in the diagrams at a temperature of +60 °C in comparison with the diagrams at room temperature. In this case, both the moduli in the loading and unloading sections and the limiting (breaking) stresses decrease. The obtained features of the behavior of aspen specimens at elevated temperatures should be taken into account when modeling deforming wood.

*Keywords:* wood, Kolsky method, compression, deformation diagram, temperature.