

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-3-269-282

## **ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ СЖИМАЕМОСТЬ БЕРЕЗЫ\***

© 2020 г. **Брагов А.М., Ломунов А.К., Южина Т.Н.**

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

lomunov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 14.09.2020*

Представлены результаты динамических испытаний на сжатие поперек волокон при комнатной температуре образцов березы воздушной влажности. Динамические испытания проведены на установке с разрезным стержнем Гопкинсона по методике Кольского при скорости деформации  $\sim 2000 \text{ с}^{-1}$ . Для оценки влияния вида напряженно-деформированного состояния на поведение материала, помимо образцов в форме таблеток (условие одноосного напряженного состояния), проведены испытания образцов в жесткой обойме, препятствующей радиальной раздате образца (условие одноосной деформации), а также испытания прямоугольных фрагментов доски. В последнем случае окружающий зону нагружения материал играет роль податливой ограничивающей обоймы. В образце при этом реализуется некоторое промежуточное напряженно-деформированное состояние. Для этих трех типов напряженно-деформированного состояния получены динамические диаграммы деформирования с регистрацией дополнительных циклов нагружения. Сравнение диаграмм деформирования показывает существенное влияние вида напряженно-деформированного состояния на поведение исследуемого материала. В случае свободной раздачи образца в радиальном направлении наблюдается отсутствие деформационного упрочнения в первом цикле нагружения. В последующих циклах упрочнение незначительно. Диаграммы деформирования таблеток в обойме и фрагментов доски характеризуются заметным увеличением модуля ветви упрочнения с ростом деформации. При этом можно отметить, что поведение материала при испытании фрагмента доски является промежуточным для случаев одноосного напряженного состояния и состояния одноосной деформации. С использованием полученных диаграмм определены некоторые механические характеристики материала. Полученные экспериментальные результаты могут служить основой для последующей идентификации модели деформирования и разрушения древесины.

*Ключевые слова:* береза, анизотропия, динамическое сжатие, многоцикловое нагружение.

---

\* Выполнено при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (проект 0729-2020-0054).

## **Введение**

Для перевозки опасных веществ применяются транспортные контейнеры, использующие в своем составе в качестве компонентов, демпфирующих ударные нагрузки, древесину. Для проведения достоверного численного анализа проектируемых конструкций таких контейнеров необходимы надежные математические модели, учитывающие сложную многокомпонентную структуру древесины. Чтобы получить соответствующие модели, необходимо широкомасштабное исследование анизотропии физико-механических свойств древесины при различных типах напряженно-деформированного состояния (НДС). В мире активно ведется разработка моделей деформирования и разрушения древесины, которые могут использоваться для моделирования поведения технически сложных конструкций, имеющих в своем составе элементы из древесины. Анализ литературы показал, что древесина является сложным натуральным полимерным композиционным материалом, обладающим пористостью и ярко выраженной анизотропией механических характеристик [1]. Отмечается также существенное влияние скорости деформации на деформационные и прочностные характеристики древесины.

Другой важной особенностью древесины является существенное отличие ее поведения в зависимости от вида напряженного состояния. Так, деформирование южной желтой сосны при растяжении и сдвиге носит хрупкий характер, в то время как диаграмма деформирования при сжатии имеет пластический участок [2].

В последние годы внимание ученых сосредоточено на исследовании влияния на механические свойства древесины ее плотности, влажности, структуры, угла вырезки и вида НДС [3–8]. В этих публикациях для ряда пород древесины были получены такие важнейшие характеристики, как динамические диаграммы деформирования, предельные прочностные и деформационные характеристики, энергия разрушения, и построены зависимости этих характеристик от скорости деформации.

Среди других легких материалов дерево обладает высокой способностью поглощать энергию, так как оно может разрушиться до 70–80% своей первоначальной высоты при сжатии [2–15]. При проектировании строительных объектов нагрузка обычно предполагается статической и поэтому требуются только квазистатические данные и значения прочности. Однако, если конструкции с элементами из древесины подвергаются ударным нагрузкам [9, 12], требуются зависимости динамических свойств древесины от скорости деформации. Поэтому при проектировании динамически нагруженных конструкций с древесиной необходимо учитывать ее динамические прочностные и деформационные характеристики.

В статье исследовано поведение березы при сжатии поперек волокон при комнатной температуре при различных типах НДС.

## **Материалы и образцы**

Для исследования динамических свойств березы были изготовлены образцы с вырезкой поперек волокон. Для этого из березовой доски воздушной влажности толщиной 10 мм с помощью алмазной коронки были вырезаны таблетки диаметром 20 мм, а также заготовлены березовые пластины размером 80×80×10 мм. При испытаниях древесины в условиях одноосной деформации образцы размещались между торцами мерных стержней в обойме, ограничивающей радиальную деформацию образца при его продольном сжатии. Как и мерные стержни, обойма оригинальной конфигурации [16] была изготовлена из высокопрочного алюминиевого сплава Д16Т.

## Метод исследования

Для испытаний образцов березы воздушной влажности использовалась установка [16, 17], в основу работы которой положен метод Кольского [18] с разрезным стержнем Гопкинсона (РСГ) в качестве основного измерительного инструмента (рис. 1).

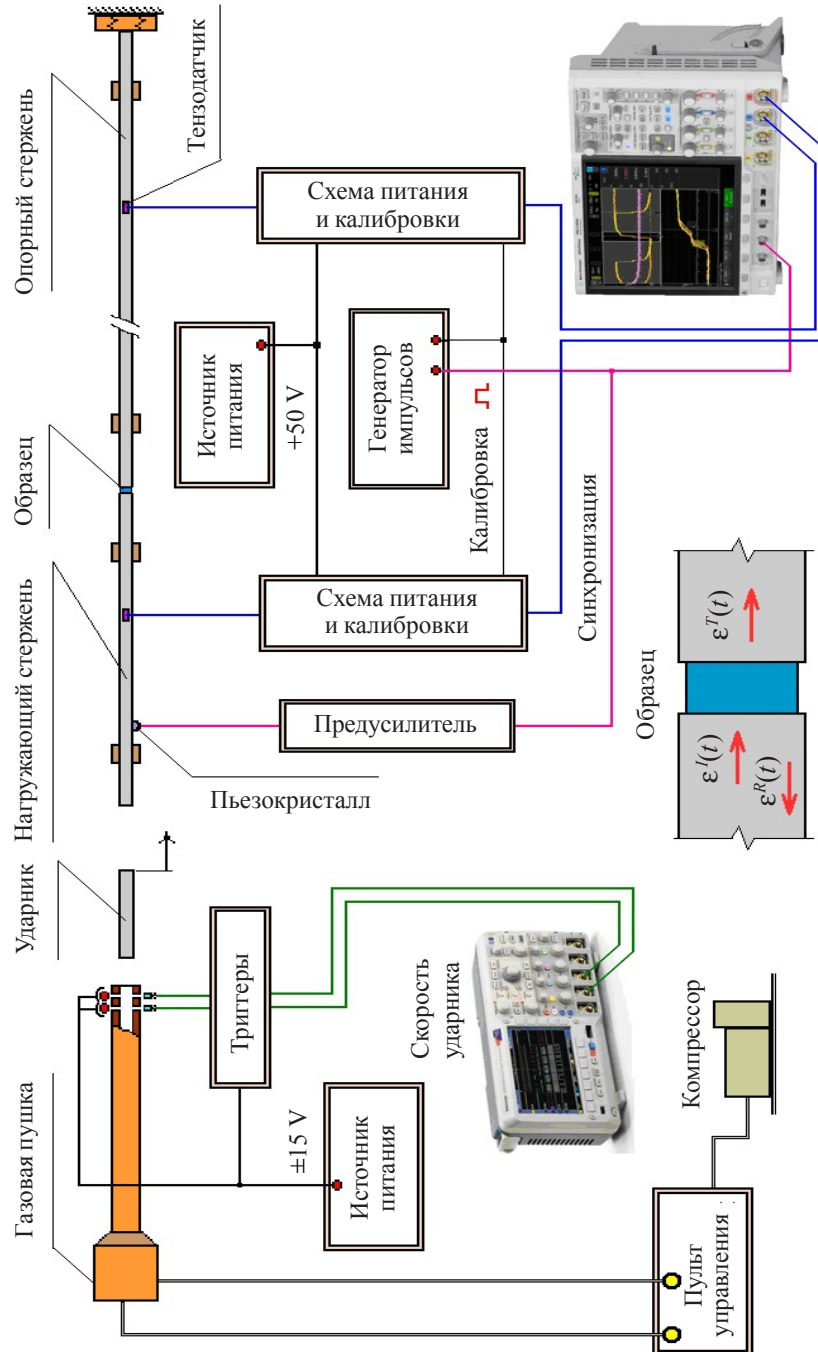


Рис. 1. Схема экспериментальной установки при испытаниях на сжатие

В основу метода Кольского положена одномерная теория распространения упругих волн в длинных тонких стержнях. Традиционно система для испытаний при одноосном сжатии состоит из двух длинных стержней (нагружающего и опорного) с достаточно высоким пределом текучести и тонкого образца в виде таблетки, расположенного между их торцами. С помощью компактной газовой пушки в нагружающем стержне возбуждается упругий импульс сжатия  $\varepsilon^I(t)$  с амплитудой, пропорциональной скорости ударника, который распространяется по стержню со скоростью  $C$ . При подходе к образцу этот импульс ввиду разности акустических импедансов  $\rho C$  материалов стержней и образца разделяется: часть импульса отражается от границы и распространяется обратно в нагружающий стержень волной растяжения  $\varepsilon^R(t)$ , а другая часть проходит через образец в опорный стержень волной сжатия  $\varepsilon^T(t)$ . Предполагая однородность НДС образца вдоль его оси (вследствие большой длительности нагружающего импульса по сравнению с временем пробега волны по длине образца), на основании этих импульсов по формулам метода Кольского можно определить параметрические зависимости развития напряжения  $\sigma(t)$ , деформации  $\varepsilon(t)$  и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}(t)$  в образце во время испытания:

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{A_s^0} \varepsilon^T(t), \quad \varepsilon_s(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \varepsilon^R(t) dt, \quad \dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C}{L_0} \varepsilon^R(t),$$

где  $E$  и  $A$  – соответственно модуль Юнга и площадь поперечного сечения стержней,  $L_0$  и  $A_0$  – исходные длина и площадь сечения образца.

После синхронизации исходных импульсов, исключив время, как параметр, можно построить диаграмму деформирования образца в виде зависимостей  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ .

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. 2а. 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 рис. 2б 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, то есть процесс разгрузки образца древесины имеет очень большую длительность.

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  $\rho C$  мерных стержней и образца. Отраженный импульс распространяется до нагружаемого ударником торца первого мерного стержня и отражается от этого свободного торца (поскольку контакта с ударником уже нет) вновь волной сжатия. Вторичная волна нагружает образец, значительная часть ее снова отражается и т.д. [19]. Таким образом, образец подвергается множеству циклов 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, полученная при более медленной развертке осциллографа (рис. 3).

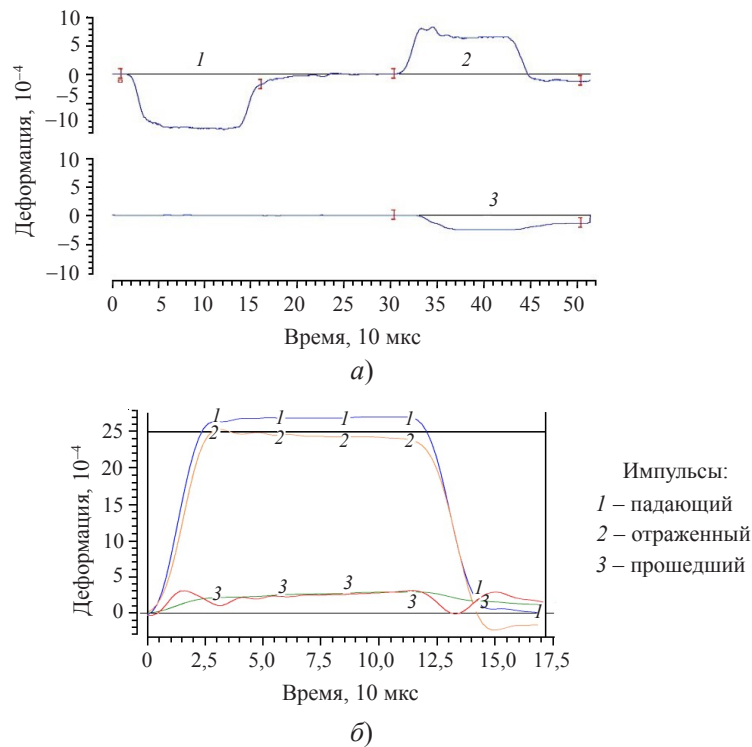


Рис. 2. Традиционная регистрация импульсов в мерных стержнях при испытаниях древесины

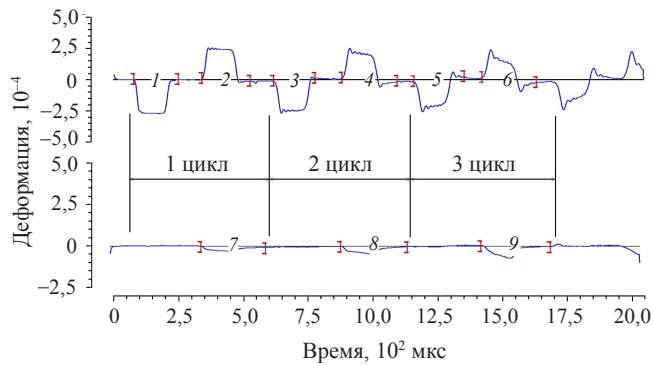


Рис. 3. Исходные импульсы деформаций при регистрации дополнительных циклов нагружения образца

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 относительно сохранивших свою целостность образцов.

Как было отмечено, 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  $\epsilon^T$ , которая может оказать влияние на процесс нагружения в последующих циклах и исказить регистрацию последующих циклов нагружения. 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. На рис. 4 представлена волновая картина импульсов в мерных стержнях при регистрации трех циклов нагружения [19].

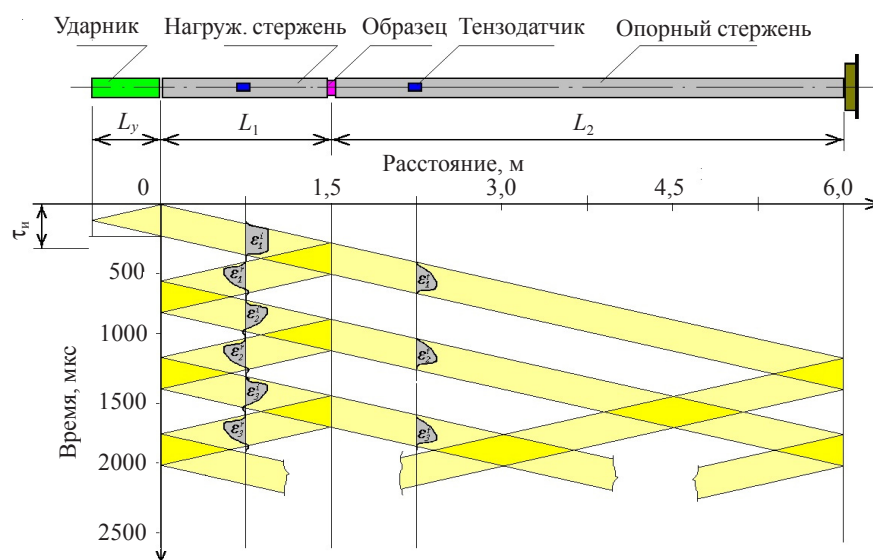


Рис. 4. Волновая картина импульсов в РСГ при регистрации трех циклов нагружения

Для реализации испытаний образцов в условиях объемного напряженного состояния и одноосной деформации испытуемый образец располагался в жесткой обойме [8, 20]. Необходимо отметить, что образец помещался в обойму с небольшим зазором между его боковой поверхностью и внутренней поверхностью обоймы, равным  $\sim 0,1$  мм, поэтому НДС, близкое к объемному, наступало только после выбора зазора. До выбора зазора поведение образца в обойме было аналогично поведению образца при испытаниях без ограничений его радиальной деформации, то есть в условиях одноосного напряженного состояния.

Кроме двух указанных типов испытаний при одноосном напряженном состоянии и одноосной деформации, проводился цикл испытаний при некотором промежуточном НДС, когда роль ограничивающей обоймы играл сам материал. При этом деревянная пластина размером  $80 \times 80 \times 10$  мм размещалась между торцами мерных стержней диаметром 20 мм и подвергалась динамическому сжатию. Такое локальное нагружение древесного массива подобно его нагружению в реальной конструк-

ции, 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.

### Результаты и обсуждение

Был проведен цикл динамических испытаний образцов березы при сжатии поперек волокон при нормальной температуре в условиях различных типов НДС. 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.

На рис. 5а 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.

Были также проведены испытания прямоугольных пластин, вырезанных из доски. Характерный вид таких фрагментов после испытания приведен на рис. 5б. 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.

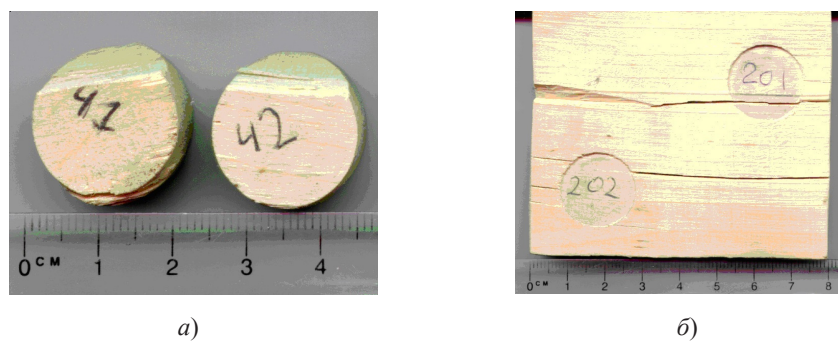


Рис. 5. Образцы березы после испытания: а) в форме таблеток, б) фрагмент доски

Как указано ранее, вследствие малой акустической жесткости  $\rho C$  древесины образец подвергается большому числу циклов нагружения с постепенно убывающей амплитудой, а его пластическая деформация достигает большой величины. Использование мерных стержней длиной 1 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  $\sigma(t)$ ,  $\epsilon(t)$  и  $\dot{\epsilon}(t)$ , а также диаграммы деформирования  $\sigma(\epsilon)$  с соответствующими историями изменения скорости деформации  $\dot{\epsilon}(\epsilon)$ .

На рис. 6 показан набор полученных усредненных диаграмм в результате испытаний образцов без обоймы при одноосном напряженном состоянии, а на рис. 7 показан аналогичный набор при сжатии в обойме при одноосной деформации.

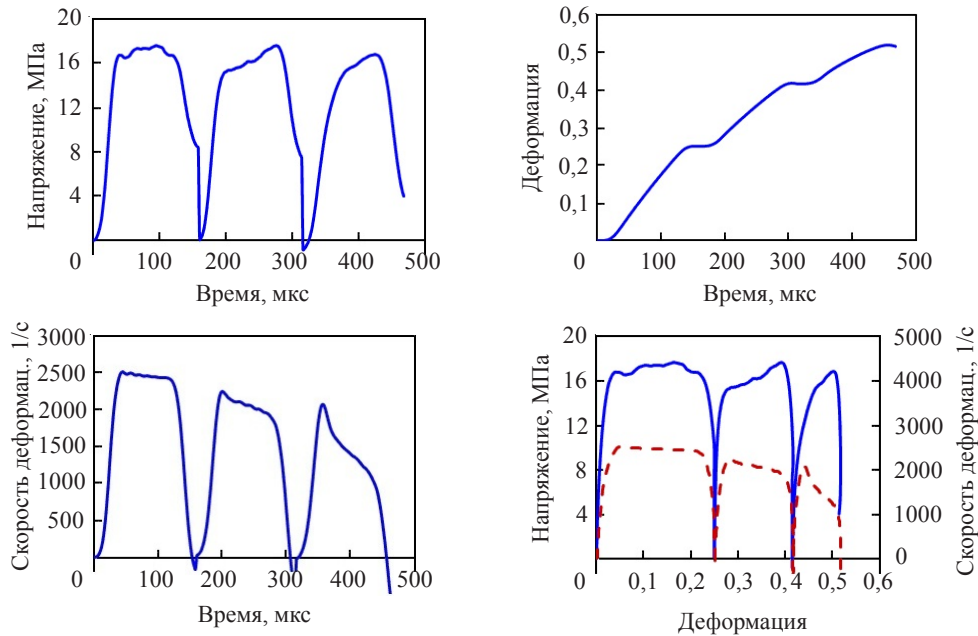


Рис. 6. Диаграммы деформирования березы при сжатии при одноосном напряженном состоянии (без обоймы)

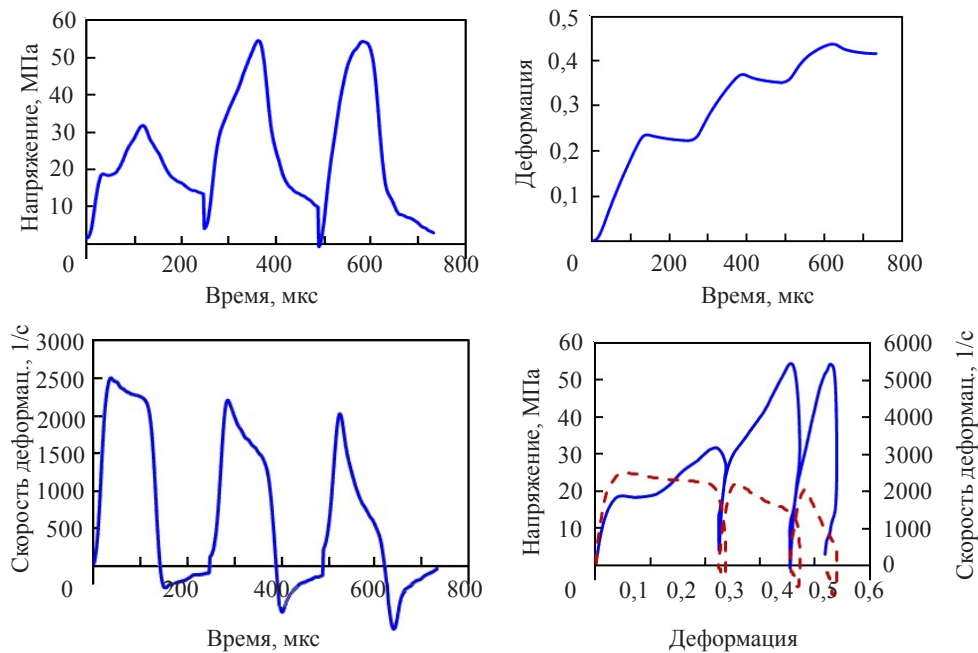


Рис. 7. Диаграммы деформирования березы при сжатии при одноосном деформированном состоянии (в обойме)



На рис. 8 показан аналогичный набор усредненных диаграмм, полученных при нагружении образца в виде фрагмента доски (комбинированное НДС).

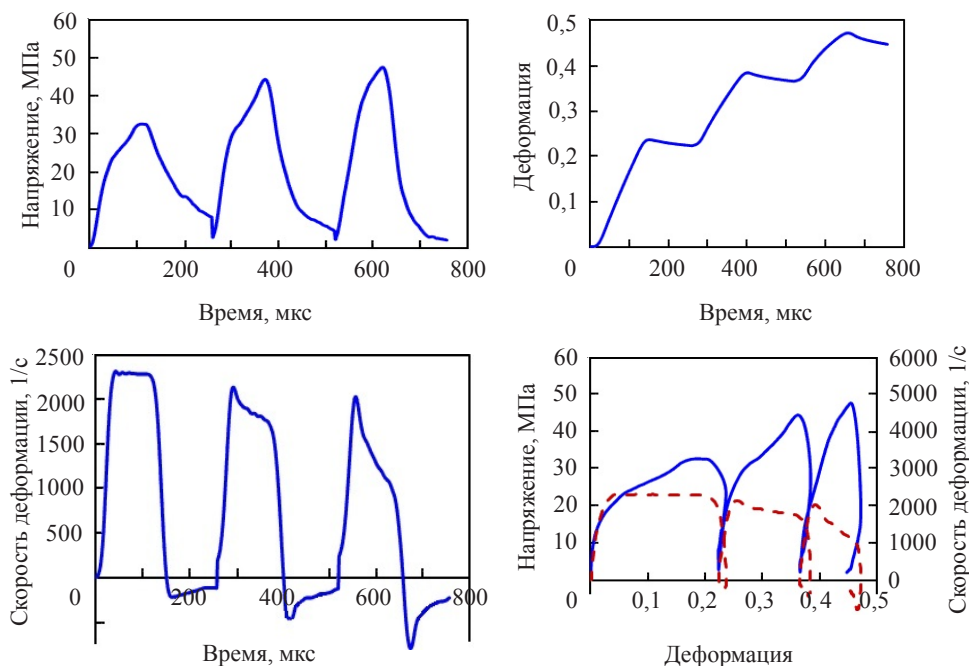


Рис. 8. Диаграммы деформирования березы при сжатии при комбинированном НДС (фрагмент доски)

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

Как видно, при сжатии березы поперек волокон в условии одноосного напряженного состояния амплитуда напряжения при повторных циклах уменьшается незначительно, то есть 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 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. 9 представлено сравнение диаграмм деформирования при трех исследованных типах НДС: 1 – одноосном напряженном состоянии, 2 – одноосном деформированном состоянии, 3 – комбинированном напряженно-деформированном состоянии. Штриховыми линиями в нижней части графиков показаны соответствующие кривые изменения скорости деформации.

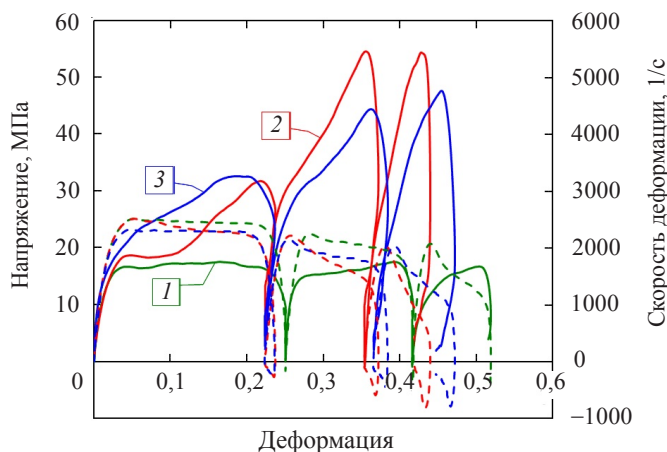


Рис. 9. Сравнение динамической сжимаемости березы при различных типах НДС

Хорошо видно, что при сжатии поперек волокон поведение березы в условии одноосного напряженного состояния (кривая 1) подобно поведению в условии 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 ( $\sim 0,1$  мм) между боковой поверхностью образца и внутренней поверхностью обоймы состояние одноосной деформации наступает только при достижении образцом деформации  $\sim 10\%$ , а до этой величины деформации поведение материала аналогично поведению в режиме 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 при комбинированном НДС (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 НДС, что должно быть учтено при идентификации модели древесины, используемой в слоистой защитной конструкции, подверженной динамическим нагрузкам.

### Заключение

С использованием метода Кольского проведены испытания образцов березы воздушной влажности на сжатие при скоростях деформации  $\sim 2000$  с<sup>-1</sup>. Для оценки влияния вида НДС на поведение материала, помимо образцов в форме таблеток,

проведены испытания прямоугольных фрагментов доски, а также образцов в жесткой обойме, препятствующей радиальной раздаче образца. Для оценки влияния истории нагружения на поведение березы при высокоскоростном деформировании проведены испытания с регистрацией дополнительных циклов нагружения. По результатам испытаний определены модули ветвей нагрузки и упрочнения, условный предел текучести и энергоемкость материала.

В случае свободной раздачи образца в радиальном направлении наблюдается отсутствие деформационного упрочнения в первом цикле нагружения. В последующих циклах упрочнение незначительно. Диаграммы деформирования таблеток в обойме и фрагментов доски характеризуются заметным увеличением модуля ветви упрочнения с ростом деформации. При этом можно отметить, что поведение материала в случае испытания фрагмента доски является промежуточным для случаев свободной раздачи образца в радиальном направлении и объемного напряженного состояния и одноосной деформации.

В случае испытаний образцов в форме таблеток влияние предварительного деформирования на величину модуля нагрузочной ветви незначительно. При этом отмечено снижение значения условного предела текучести в последующих циклах, что обусловлено, по-видимому, накоплением повреждений.

При испытаниях образцов в жесткой обойме отмечено увеличение модулей ветвей нагрузки и упрочнения в последующих циклах нагружения, что, вероятно, обусловлено ограничением радиальной раздачи образца. При этом наибольшее значение условного предела текучести наблюдалось во втором цикле нагружения.

Испытания фрагментов доски характеризовались уменьшением значений модулей ветвей нагрузки в последующих циклах нагружения, что может быть вызвано накоплением повреждений в волнах нагрузки-разгрузки во всем массиве фрагмента. Как и в случае испытаний образцов в жесткой обойме, наибольшее значение условного предела текучести наблюдалось во втором цикле нагружения.

Полученные экспериментальные результаты могут служить основой для последующей идентификации модели деформирования и разрушения древесины.

#### Список литературы

1. Buchar J., Severa L., Havlicek M., Rolc S. Response of wood to the explosive loading. *Journal de Physique IV France*. 2000. Vol. 10. P. 529–534. DOI: 10.1051/jp4:2000988.
2. 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. 155 p.
3. Widehammar S. Stress-strain relationships for spruce wood: Influence of strain rate, moisture content and loading direction. *Experimental Mechanics*. 2004. Vol. 44. No 1. P. 44–48. DOI: 10.1007/BF02427975.
4. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2011. Vol. 48. Iss. 2. P. 1–7. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2010.00802.x.
5. 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 (PCM 2016). 20–23 May 2016. Hangzhou, China. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 137. P. 1–10. DOI:10.1088/1757-899X/137/1/012036.
6. Gilbertson C.G. Dynamic properties of wood using the Split-Hopkinson Pressure Bar. *PHD Diss.* Michigan: Michigan Technological University, 2011.
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. Konstantinov A. Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N., Gray III G.T. Investigation of wood anisotropy under dynamic loading. *Problems of Strength and Plasticity*. 2018. Vol. 80. No 4. P. 555–565. DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-555-565.
9. Adalian C., Morlier P. “WOOD MODEL” for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2002. Vol. 60. Iss. 6. P. 433–439. DOI: 10.1007/s00107-002-0333-x.
10. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 510 p.
11. Diersch R., Weiss M., Dreier G. Investigation of the impact behaviour of wooden impact limiters. *Nuclear Engineering and Design*. 1994. Vol. 150. Iss. 2-3. P. 341–348. DOI: 10.1016/0029-5493(94)90153-8.
12. 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.
13. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *Journal de Physique IV France*. 1997. Vol. 7. No C3. P. 487–492. DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:1997384>.
14. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1986. Vol. 4. Iss. 3. P. 161–174. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(86\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0734-743X(86)90003-5).
15. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. *Анизотропия конструкционных материалов: Справочник*. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.
16. Bragov A.M., Kotov V.L., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Measurement of the dynamic characteristics of soft soils using the Kolsky method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2004. Vol. 45. No 4. P. 580–585.
17. 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. No 2. P. 321–330.
18. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society Section B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>.
19. Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Modification of the Kolsky method for studying properties of low-density materials under high-velocity cyclic strain. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. Vol. 42. No 6. P. 1090–1094. DOI: 10.1023/A:1012542601104.
20. Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Lomunov A.K. Analysis of the applicability of a modified Kolsky's method for dynamic tests of soils in a deformable casing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2000. Vol. 41. No 3. P. 519–525. DOI: 10.1007/BF02465305.

#### References

1. Buchar J., Severa L., Havlicek M., Rolic S. Response of wood to the explosive loading. *J. Phys. IV France*. 2000. Vol. 10. P. 529–534. DOI: 10.1051/jp4:2000988.
2. 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. 155 p.
3. Widehammar S. Stress-strain relationships for spruce wood: Influence of strain rate, moisture content and loading direction. *Exp. Mech*. 2004. Vol. 44. No 1. P. 44–48. DOI: 10.1007/BF02427975.
4. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2011. Vol. 48. Iss. 2. P. 1–7. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2010.00802.x.
5. 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 (PCM 2016). 20–23 May 2016. Hangzhou, China. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 137. P. 1–10. DOI:10.1088/1757-899X/137/1/012036.
6. Gilbertson C.G. Dynamic properties of wood using the Split-Hopkinson Pressure Bar. *PHD Diss.* Michigan. Michigan Technological University. 2011.

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. Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N., Gray III G.T. Investigation of wood anisotropy under dynamic loading. *Problems of Strength and Plasticity.* 2018. Vol. 80. No 4. P. 555–565. DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-555-565.
9. Adalian C., Morlier P. “WOOD MODEL” for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 2002. Vol. 60. Iss. 6. P. 433–439. DOI: 10.1007/s00107-002-0333-x.
10. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids: Structure and Properties.* Cambridge. Cambridge University Press. 1997. 510 p.
11. Diersch R., Weiss M., Dreier G. Investigation of the impact behaviour of wooden impact limiters. *Nucl. Eng. Des.* 1994. Vol. 150. Iss. 2-3. P. 341–348. DOI: 10.1016/0029-5493(94)90153-8.
12. 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.
13. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *J. Phys. IV France.* 1997. Vol. 7. No C3. P. 487–492. DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:1997384>.
14. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *Int. J. Impact Eng.* 1986. Vol. 4. Iss. 3. P. 161–174. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(86\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0734-743X(86)90003-5).
15. Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anizotropiya konstruktsionnykh materialov. Spravochnik. [Anisotropy of Structural Materials. Handbook].* Leningrad. Mashinostroenie Publ. 1980. 247 p. (In Russian).
16. Bragov A.M., Kotov V.L., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Measurement of the dynamic characteristics of soft soils using the Kolsky method. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2004. Vol. 45. No 4. P. 580–585.
17. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact Eng.* 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.
18. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society Section B.* 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>.
19. Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Modification of the Kolsky method for studying properties of low-density materials under high-velocity cyclic strain. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2001. Vol. 42. No 6. P. 1090–1094. DOI: 10.1023/A:1012542601104.
20. Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Lomunov A.K. Analysis of the applicability of a modified Kolsky's method for dynamic tests of soils in a deformable casing. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2000. Vol. 41. No 3. P. 519–525. DOI: 10.1007/BF02465305.

## DYNAMIC COMPRESSIBILITY OF BIRCH AT DIFFERENT TYPES OF STRESS-STRAINED STATE

**Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N.**

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

The results of dynamic tests for compression across the fibers at room temperature of birch samples with air humidity are presented. Dynamic tests were carried out on a setup with a split Hopkinson bar according to the Kolsky method at a strain rate of  $\sim 2000 \text{ s}^{-1}$ . To assess the effect of the type of stress-strain state on the behavior of the material, in addition to specimens in the form of cylinders with its free expansion during loading (uniaxial stress state condition), specimens were tested in a rigid casing that prevents the radial expansion of the specimen (uniaxial deformation condition), as well as local compressive tests of rectangular board fragments. In the latter case, the material surrounding the loading zone plays the role of a compliant confining casing. In this case, a certain

intermediate stress-strain state is realized in the sample. For these three types of stress-strain state, dynamic deformation diagrams were obtained with registration of additional loading cycles. Comparison of obtained deformation diagrams shows a significant effect of the type of stress-strain state on the behavior of the material under study. In the case of free expansion of the specimen in the radial direction, the absence of strain hardening is observed in the first loading cycle. In subsequent cycles, hardening is negligible. The deformation diagrams of specimens in the casing as well as board fragments are characterized by a noticeable increase in the modulus of the hardening branch with increasing deformation. In this case, it can be noted that the behavior of the material in the case of testing a piece of board is intermediate between the cases of uniaxial stress state and uniaxial strain state. Some mechanical characteristics of the material are determined using the diagrams obtained. The obtained experimental results can serve as the basis for the subsequent identification of the model of deformation and destruction of wood.

*Keywords:* birch, anisotropy, dynamic compression, multicyclic loading.