

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-43-51

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЛИПЫ И СОСНЫ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

© 2020 г.

**Ломунов А.К.¹, Южина Т.Н.²,
Крушка Л.³, Чен В.В.⁴**

¹*Научно-исследовательский институт механики*

Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

²*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

³*Военный университет технологий, Варшава, Польша*

⁴*Университет Пердью, Уэст-Лафайет, Индиана, США*

lomunov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 27.11.2019

Представлены результаты динамических испытаний при сжатии двух пород древесины: липы и сосны – при нагружении вдоль и поперек волокон. Динамические испытания проводились с использованием модифицированного метода Кольского с реализацией многоциклового нагружения образца в процессе одного испытания. В результате были получены диаграммы деформирования при одноосном напряженном состоянии с учетом дополнительных циклов нагружения. Использование режима многоциклового нагружения позволило получить значительно большую степень деформации образца, чем при традиционном одноцикловом нагружении. Для создания нагрузки использовалась газовая пушка. По результатам экспериментов получены динамические диаграммы деформирования, определены предельные прочностные и деформационные характеристики, зависимость энергии разрушения липы и сосны от угла вырезки образцов и скорости деформации. Наблюдается сильная анизотропия свойств испытанных материалов: наибольшую прочность имеют образцы при приложении нагрузки вдоль волокон, наименьшую – поперек волокон. Отмечено положительное влияние скорости деформации. Модуль нагрузочной ветви нелинеен и, как правило, меньше модуля разгрузочной ветви (при сохранении целостности образца). Характер деформирования и разрушения образцов сильно зависит от угла вырезки. При углах вырезки 90° по отношению к направлению волокон диаграмма деформирования после достижения некоторого порогового значения близка к идеально-пластической диаграмме. При углах вырезки 0° начальный участок диаграмм близок к линейному, то есть имеет место упругое деформирование. Однако после достижения некоторого значения (предела текучести) диаграмма становится нелинейной. Такой характер поведения имеет место в тех экспериментах, в которых происходит разрушение образцов. Для обеих пород древесины видно существенное

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-00808).

превышение энергопоглощения образцами, вырезанными и испытанными вдоль волокон, по сравнению с образцами, вырезанными и испытанными поперек волокон.

Ключевые слова: древесина, липа, сосна, диаграммы деформирования, скорость деформации, метод Кольского.

Введение

Древесина широко используется в качестве материала, демпфирующего интенсивные динамические нагрузки ударного или взрывного характера. Первый подробный обзор использования древесины для этих целей сделан Джонсоном [1], который отмечал, что динамические свойства древесины изучены недостаточно. В последние три десятилетия появилось достаточно много работ, в которых исследовались различные аспекты высокоскоростного деформирования и разрушения древесины и ее применения в контейнерах для перевозки радиоактивных материалов авиационным, автомобильным и железнодорожным транспортом [2]. Большой объем работ по исследованию динамических свойств древесины выполнил S. Reid с соавторами [3–5]. В этих работах были получены зависимости разрушающих напряжений и энергии разрушения от скорости удара. Отмечено, что динамические разрушающие напряжения в несколько раз превышают статические напряжения образцов, а прочность образцов, изготовленных вдоль волокон, на порядок выше, чем образцов, вырезанных поперек волокон.

В работах А.М. Брагова с сотрудниками [6–8] с использованием метода Кольского были получены динамические диаграммы березы, осины, секвойи при скоростях деформации $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ с различным направлением вырезки образцов относительно направления волокон. Показано, что диаграммы деформирования образцов с продольной вырезкой располагаются значительно выше, чем для образцов с поперечной вырезкой. Предельные характеристики деформации имеют противоположную направленность.

С.А. Новиковым с сотрудниками [9] был выполнен большой объем испытаний секвойи, березы, осины и сосны при различных углах вырезки, температурах от -30 до $65 \text{ }^\circ\text{C}$ и при влажностях 5, 20 и 30%, определена зависимость прочности от влажности и угла вырезки.

В последние годы значительно вырос интерес к исследованию влияния на механические свойства древесины влажности, плотности, угла вырезки, типа испытаний [10–18]. Диапазон скоростей деформаций в этих исследованиях составлял от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} .

Поскольку механические свойства древесины сильно зависят от места произрастания дерева, его возраста, от места вырезки и вида напряженно-деформированного состояния (НДС), то получаемые разными авторами результаты могут существенно отличаться друг от друга. Цель настоящей работы – провести подобные исследования влияния скорости деформации и вида НДС на механические свойства древесины.

Методика испытаний, материалы и образцы

В качестве методики динамических испытаний был использован метод Кольского при испытаниях на сжатие [19]. Схема установки представлена на рис. 1.

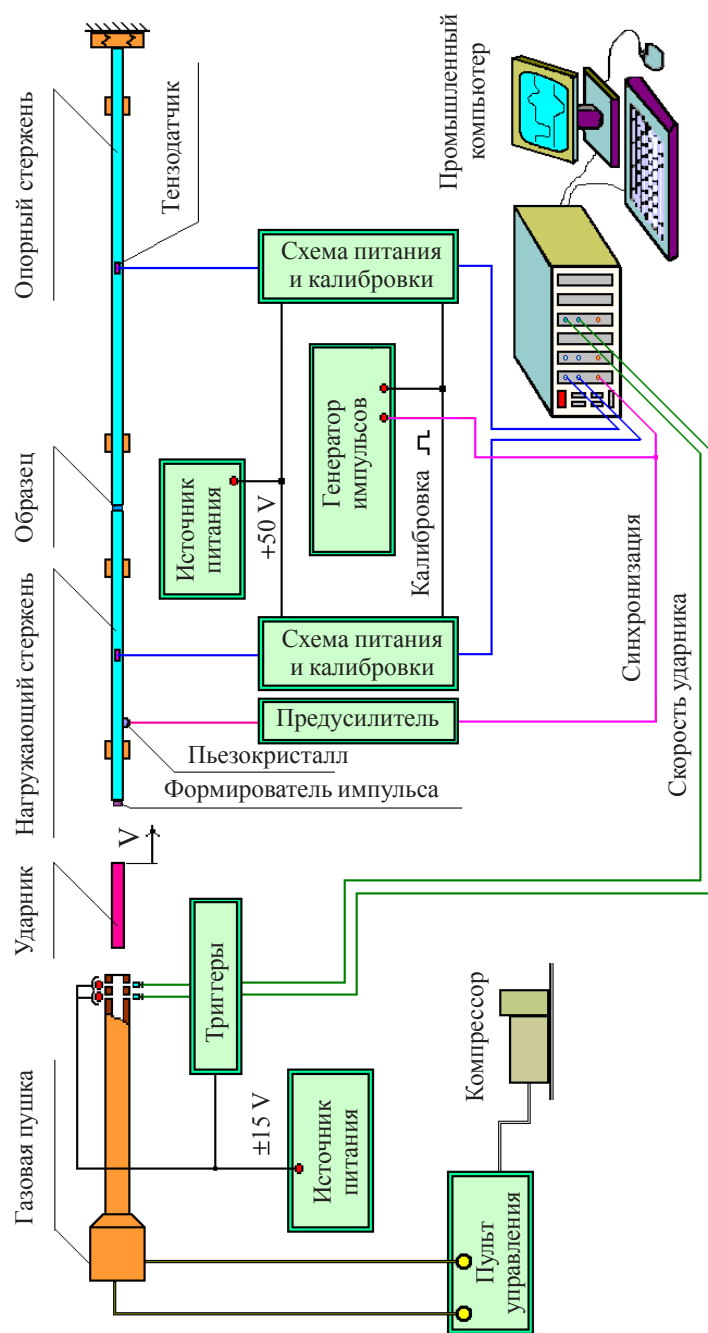


Рис. 1. Схема установки для испытаний при сжатии

Образец располагается между двумя длинными тонкими стержнями, материал которых имеет предел текучести значительно выше предела прочности образца. Импульс нагрузки в мерных стержнях создается ударом бойка, разогнанного в стволе газовой пушки. Упругие импульсы деформации в стержнях измеряются с помощью тензодатчиков, наклеенных на их боковых поверхностях, по формулам Кольского

вычисляются процессы развития напряжения, деформации и скорости деформации во времени. После исключения времени как параметра строится динамическая диаграмма деформирования при известном законе изменения скорости деформации.

Поскольку акустическая жесткость ρC древесины существенно меньше, чем мерных стержней, в экспериментах реализуется многоцикловое нагружение [20], позволяющее зарегистрировать несколько циклов нагрузки и получить диаграммы деформирования до значительных степеней деформации. Мерные стержни имеют различную длину: нагружающий стержень – 1 м, а опорный стержень – 3 м, что позволяет производить неискаженную регистрацию трех циклов нагружения в одном эксперименте.

Динамические испытания были проведены с образцами липы и сосны диаметром 20 мм и длиной 10 мм, вырезанными из массива древесины под углами 0 и 90° по отношению к оси ствола дерева (соответственно вдоль и поперек волокон). Оба материала имели влажность около 7%.

Результаты

С использованием описанной методики проведены динамические испытания сосны и липы, в результате которых были получены их динамические диаграммы деформирования, предельные прочностные и деформационные характеристики образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон. Были выбраны два режима испытаний по скорости деформации: без разрушения и с разрушением образцов. Динамические диаграммы деформирования сосны и липы при одноосном напряженном состоянии представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2–4 сплошными линиями показаны зависимости истинного напряжения в образце от его деформации $\sigma(\epsilon)$, а штриховыми и штрихпунктирными линиями – изменения скорости деформации $\dot{\epsilon}(\epsilon)$ (соответствующая ось расположена справа).

Из полученных диаграмм деформирования следует, что наибольший модуль нагрузочной ветви диаграммы и разрушающие напряжения имеют образцы, вырезанные вдоль волокон.

О выносливости древесины может свидетельствовать рис. 4, где представлены диаграммы пятикратного нагружения образца сосны при его незначительных повреждениях (кривые 1–5) и однократного нагружения аналогичного образца при его разрушении (кривая 6). Диаграммы расположены на оси деформации условно, чтобы было легче оценить влияние многократности нагружения на крутизну нагрузочных участков диаграмм. Средняя скорость деформации при повторных нагружениях составляла $\sim 600\text{--}800\text{ с}^{-1}$, а в случае разрушения образца скорость деформации была около 2200 с^{-1} . Наблюдается уменьшение крутизны нагрузочных участков диаграмм при повторных нагружениях в 2–3 раза, что связано с частичным разрушением образца в процессе каждого нагружения и нарушением плоскостности его торцов.

Энергоемкость испытанных пород при нагружении вдоль и поперек волокон, как важная характеристика демпфирующей способности древесины, была оценена путем вычисления площади под кривой $\sigma(\epsilon)$ (рис. 5).

Для обеих пород древесины видно существенное превышение энергопоглощения образцами, вырезанными и испытанными вдоль волокон, по сравнению с образцами, вырезанными и испытанными поперек волокон.

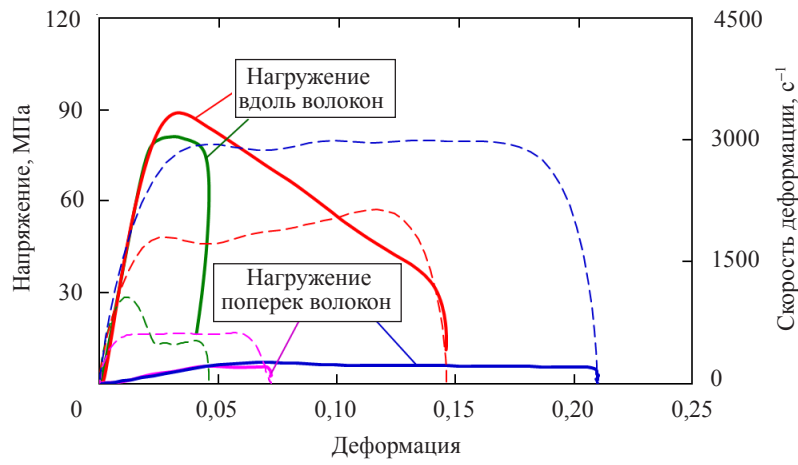


Рис. 2. Диаграммы деформирования сосны при нагружении вдоль и поперек волокон

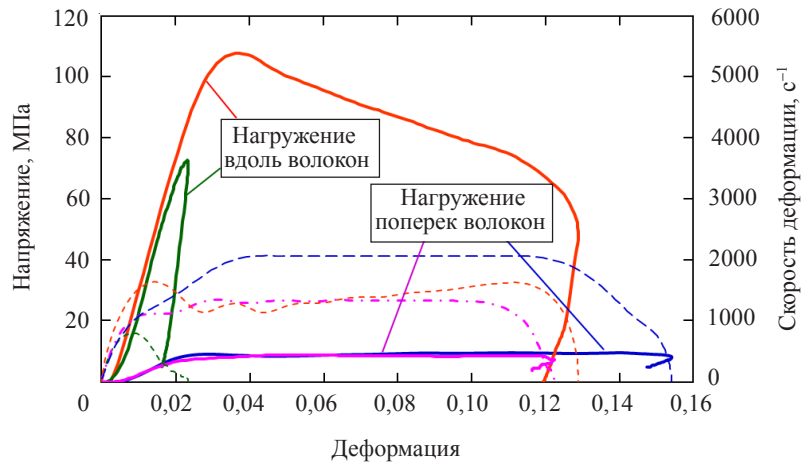


Рис. 3. Диаграммы деформирования липы при нагружении вдоль и поперек волокон

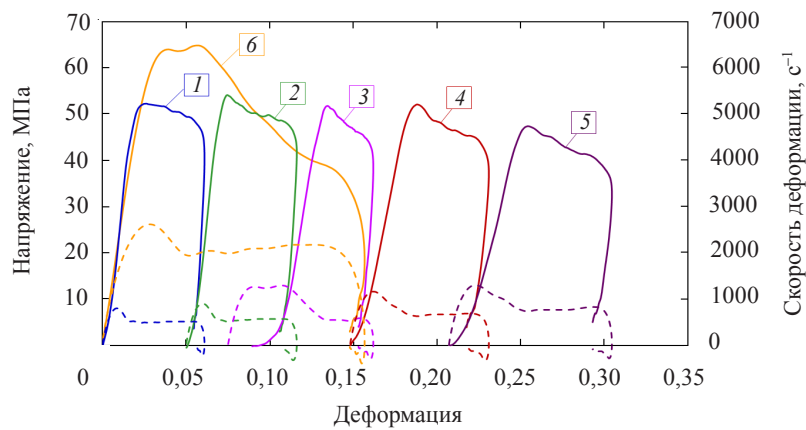
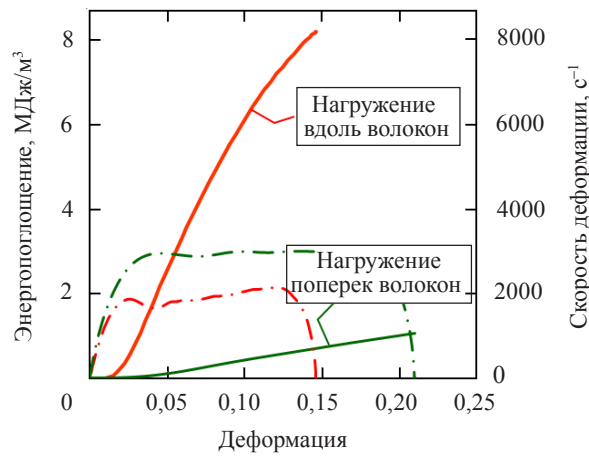
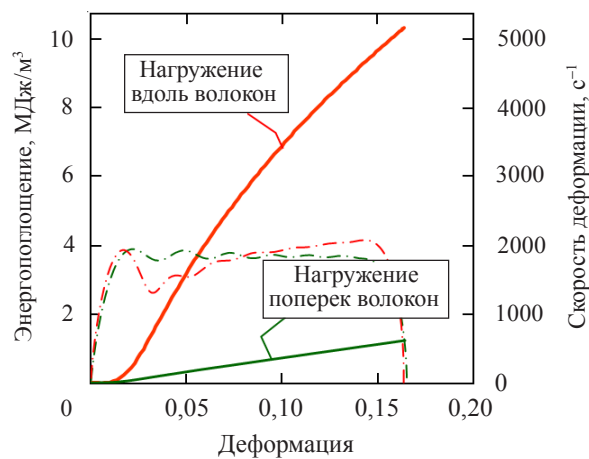


Рис. 4. Многократное нагружение вдоль волокон образца сосны при его незначительных повреждениях



а)



б)

Рис. 5. Энергопоглощение испытанных пород древесины:
а) образец сосны, б) образец липы

Заключение и выводы

Проведены динамические испытания липы и сосны. Наблюдается сильная анизотропия свойств испытанных материалов: наибольшую прочность имеют образцы при приложении нагрузки вдоль волокон, наименьшую – поперек волокон. Полученные значения динамической прочности оказались выше статической, то есть имеет место положительное влияние скорости деформации. Модуль нагрузочной ветви нелинеен и, как правило, меньше модуля разгрузочной ветви (при сохранении целостности образца). Характер деформирования образцов сильно зависит от угла вырезки. При углах вырезки 90° по отношению к направлению волокон диаграмма деформирования после достижения некоторого порогового значения близка к идеально-пластической диаграмме. При углах вырезки 0° начальный участок диаграмм близок к линейному, то есть имеет место упругое деформирование. Однако после достижения некоторого значения (предела текучести) диаграмма становится нелинейной. Такой характер поведения имеет место особенно в тех экспери-

ментах, в которых происходит разрушение образцов. Полученные характеристики можно использовать для идентификации модели поведения древесины, необходимой для численного моделирования нестационарных процессов удара и проникания ударников с различной формой головной части в многослойные преграды с межслойным наполнителем из древесины.

Список литературы

1. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1986. Vol. 4. No 3. P. 161–174.
2. Neumann M. *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis*. PhD thesis. Germany, Wuppertal: Bergische Universität, 2009.
3. Reid S.R., Reddy T.Y., Peng C. Dynamic compression of cellular structures and materials. In: N. Jones, T. Wierzbicki (Eds). *Structural Crashworthiness and Failure*. London–New York: Taylor & Francis Publ., 1993. P. 257–294.
4. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1997. Vol. 19. No 5-6. P. 531–570.
5. Harrigan J.J., Reid S.R., Tan P.J., Reddy T.Y. High rate crushing of wood along the grain. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. No 4-5. P. 521–544.
6. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *Journal de Physique IV*. 1997. Vol. 7. P. 487–492.
7. 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”*. Baltimore, Maryland. July 31–August 5, 2005. Melville, New York. 2006. P. 1511–1514.
8. Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Южина Т.Н., Грей III Дж.Т. Исследование анизотропии древесины при динамическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №4. С. 555–565.
9. Bol'shakov A.P., Gerdyukov N.N., Novikov S.A. et al. Damping properties of sequoia, birch, pine, and aspen under shock loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. Vol. 42. No 2. P. 1–10.
10. Adalian C., Morlier P. Modeling the behaviour of wood during the crash of a cask impact limiter. *PATRAM'98: Conference Proceedings*. Paris, France. 1998. Vol. 1. P. 261–268.
11. Eisenacher G., Scheidemann R., Neumann M., Wille F., Droste B. Crushing characteristics of spruce wood used in impact limiters of type B packages. *Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013*. August 18–23, 2013. San Francisco, USA. P. 1–10.
12. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge: University Press, 1997. 502 p.
13. Buchar J., Severa L., Havlicek M., Rolc S. Response of wood to the explosive loading. *Journal de Physique IV*. 2000. Vol. 9. P. 529–534.
14. Gilbertson C.G. *Dynamic Properties of Wood Using the Split – Hopkinson Pressure Bar*. PhD Diss. Michigan Technological University, 2011.
15. Diersch R., Weiss M., Dreier G. Investigation of the impact behaviour of wooden impact limiters. *Nuclear Engineering and Design*. 1994. Vol. 150. No 2-3. P. 341–348.
16. Riggio M., Sandak J., Sandak A., Babiński L. Analysis and prediction of selected mechanical/dynamic properties of wood after short and long-term waterlogging. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 444–454.
17. 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.
18. Backman A.C., Lindberg K.A.H. Difference in wood material responses for radial and tangential direction as measured by dynamic mechanical thermal analysis. *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. Iss. 15. P. 3777–3783.

19. 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.

20. 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.

References

1. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *Int. J. Imp. Eng.* 1986. Vol. 4. No 3. P. 161–174.

2. Neumann M. *Investigation of the Behavior of Shock-Absorbing Structural Parts of Transport Casks Holding Radioactive Substances in Terms of Design Testing and Risk Analysis*. PhD thesis. Germany, Wuppertal. Bergische Universität. 2009.

3. Reid S.R., Reddy T.Y., Peng C. Dynamic compression of cellular structures and materials. In: N. Jones, T. Wierzbicki (Eds). *Structural Crashworthiness and Failure*. London. New York. Taylor & Francis Publ. 1993. P. 257–294.

4. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *Int. J. Imp. Eng.* 1997. Vol. 19. No 5-6. P. 531–570.

5. Harrigan J.J., Reid S.R., Tan P.J., Reddy T.Y. High rate crushing of wood along the grain. *Int J. Mech. Sci.* 2005. Vol. 47. No 4-5. P. 521–544.

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

7. 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”*. Baltimore. Maryland. July 31–August 5, 2005. Melville. New York. 2006. P. 1511–1514.

8. Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N., Gray III G.T. Issledovanie anizotropii drevesiny pri dinamicheskom nagruzhenii [Investigation of wood anisotropy under dynamic loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 4. P. 555–565 (In Russian).

9. Bol'shakov 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.* 2001. Vol. 42. No 2. P. 202–210.

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

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

12. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge. Cambridge University Press. 1997. 502 p.

13. Buchar J., Severa L., Havlicek M., Rolc S. Response of wood to the explosive loading. *J. Phys. IV France*. 2000. Vol. 9. P. 529–534.

14. Gilbertson C.G. *Dynamic Properties of Wood Using the Split – Hopkinson Pressure Bar*. PhD. Diss. Michigan Technological University. 2011.

15. Diersch R., Weiss M., Dreier G. Investigation of the impact behaviour of wooden impact limiters. *Nucl. Eng. Des.* 1994. Vol. 150. No 2-3. P. 341–348.

16. Riggio M., Sandak J., Sandak A., Babiński L. Analysis and prediction of selected mechanical/dynamic properties of wood after short and long-term waterlogging. *Constr. Build. Mater.* 2014. Vol. 68. P. 444–454.

17. 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.

18. 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.* 2001. Vol. 36. Iss. 15. P. 3777–3783.

19. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Imp. Eng.* 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.

20. 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.

DEFORMING AND FRACTURE OF LINDEN AND PINE UNDER INTENSIVE DYNAMIC IMPACTS

Lomunov A.K.¹, Yuzhina T.N.², Kruszka L.³, Chen W.W.⁴

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

²*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

³*Military University of Technology, Warsaw, Poland*

⁴*Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA*

The paper presents the results of dynamic tests under compression of two wood species: linden and pine under loading along and across the fibers. Dynamic tests were carried out using the modified Kolsky method with the realization of multi-cycle loading of the sample during one test. As a result, strain diagrams were obtained for uniaxial stress state taking into account additional loading cycles. The use of the multi-cycle loading mode made it possible to obtain a significantly greater degree of the sample deformation than with traditional single-cycle loading. To create a pulse load, a gas gun was used. According to the experimental results, dynamic deformation diagrams were obtained, as well as ultimate strength and deformation characteristics, fracture energy for linden and pine were determined depending on the cutting angle of the samples and the strain rate. A strong anisotropy of the properties of the tested materials is observed: the samples have the greatest strength when a load is applied along the fibers, and the least – across the fibers. A positive effect of the strain rate is noted. The module of the load branch is non-linear and, as a rule, is smaller than the module of the unload branch (while maintaining the integrity of the sample). The nature of the deformation and fracture of the samples strongly depends on the angle of cutting-out. At cutting angle across the fibers, the deformation diagram after reaching a certain threshold value is close to an ideally plastic diagram. At cutting angle along the fibers, the initial portion of the diagrams is close to linear, i.e. elastic deformation takes place. However, after reaching a certain value (“yield strength”), the diagram becomes nonlinear. This kind of behavior takes place in those experiments in which the destruction of the samples occurs. For both wood species, there is a significant excess of energy absorption by samples cut and tested along the fibers, compared with samples cut and tested across the fibers.

Keywords: wood, linden, pine, deforming diagrams, strain rate, Kolsky method.