

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/15>

УДК 630\*812.3



## Трещинообразование натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth): эффект показателя внутреннего трения под влиянием внешних возмущений

Александр В. Руссу<sup>1</sup>, [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Владимир А. Шамаев<sup>1</sup> , [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Андрис Зимелис<sup>2</sup>, [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv)  <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

<sup>2</sup>Технический университет г. Рига, ул. Кипсала, 6а, Рига, LV-1048, Латвия

Получение информации о наличии трещин в исходном сырье, заготовках и изделиях из древесины необходимо для принятия решения о целях последующей ее обработки и эксплуатации. Способ диагностики трещин в древесине основан на измерении внутреннего трения. На подготовленные образцы натуральной и модифицированной прессованием древесины, выпиленные из стволовой части деревьев березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающих в Хлевенском Лесхозе, Липецкой обл. (52.184130, 39.110463, НУМ 157м), воздействовали в радиальном и тангенциальном направлениях ультразвуком (частота 24.5 кГц, экспозиция 0-20 минут, шаг 5 минут) и импульсным магнитным полем (напряженность – 0.3 Тл, экспозиция 0-2 минуты, шаг 0.5 минуты). Далее исследовали внутреннее трение образцов на экспериментальной установке методом измерения логарифмического декремента затухания на основе свободно-изгибных колебаний. При уровне значимости  $p=0.95$  определили абсолютные величины безразмерного коэффициента внутреннего трения  $Q^{-1}$ , как основного структурного параметра для образцов натуральной и модифицированной древесины: для влажности при наличии одной трещины  $Q^{-1}$  уменьшилось на 7.04% ( $D=0.08$ ), при наличии двух трещин – на 8.4% ( $D=0.15$ ), при наличии трех трещин – на 9.06% ( $D=0.15$ ); для ультразвука при наличии одной трещины  $Q^{-1}$  уменьшилось на 7.17% ( $D=0.05$ ), при наличии двух трещин – на 8.46% ( $D=0.05$ ), при наличии трех трещин – на 9.12% ( $D=0.09$ ); для импульсного магнитного поля при наличии одной трещины  $Q^{-1}$  уменьшилось на 7.14% ( $D=0.05$ ), при наличии двух трещин – на 8.39% ( $D=0.09$ ), при наличии трех трещин – на 9.02% ( $D=0.09$ ). При испытании образцов натуральной древесины и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) получили асимптотическое уравнение аппроксимации зависимости уменьшения  $Q^{-1}$  от количества трещин, с величиной аппроксимации  $R^2=0.994$ . Исследование зависимости внутреннего трения от процесса трещинообразования в различных породах древесины обеспечивает подготовку следующего этапа - построение прототипа системы неразрушающего контроля дефектов.

**Ключевые слова:** внутреннее трение древесины, диагностика трещин в древесине, натуральная и модифицированная древесина, береза повислая, *Betula pendula* Roth, ультразвук, импульсное магнитное поле

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Руссу, А. В. Трещинообразование натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth): эффект показателя внутреннего трения под влиянием внешних возмущений / А. В. Руссу, В. А. Шамаев, А. Зимелис // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 219–235. – Библиогр.: с. 231–234 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/15>.

Поступила 04.09.2023 Пересмотрена 12.11.2023. Принята 16.11.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023

Article

## Crack formation in natural and pressure-modified silver birch (*Betula pendula* Roth) wood: the effect of the internal friction index under the influence of external disturbances

Alexander V. Russu<sup>1</sup>, [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Vladimir A. Shamaev<sup>1</sup> ✉, [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Andris Ziemelis, [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv)  <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

<sup>2</sup>Technische Universitat Riga, Kipsalas iela, 6a, Centra rajons, LV-1048, Riga, Latvia

### Abstract

Obtaining information about the presence of cracks in raw materials, blanks and wood products is necessary to make a decision on the purposes of its subsequent processing and operation. The method for diagnosing cracks in wood is based on measuring internal friction. For prepared samples of natural and modified wood, sawn from the stem part of drooping birch (*Betula pendula* Roth) trees growing in Khlevensky Forestry, Lipetsk region. (52.184130, 39.110463, ASL 157m), exposed to radial and tangential directions with ultrasound (frequency 24.5 kHz, exposure 0-20 minutes, step 5 minutes) and pulsed magnetic field (strength - 0.3 T, exposure 0-2 minutes, step 0.5 minutes). Next, the internal friction of the samples was studied on an experimental setup by measuring the logarithmic damping decrement based on free-bending vibrations. The absolute values of the dimensionless coefficient of internal friction  $Q^{-1}$ , as the main structural parameter for samples of natural and modified wood, were obtained at a significance level of  $p=0.95$ : for humidity, in the presence of one crack,  $Q^{-1}$  decreased by 7.04% ( $D=0.08$ ), in the presence of two cracks - by 8.4% ( $D=0.15$ ), in the presence of three cracks - by 9.06% ( $D=0.15$ ); for ultrasound in the presence of one crack  $Q^{-1}$  decreased by 7.17% ( $D=0.05$ ), in the presence of two cracks - by 8.46% ( $D=0.05$ ), in the presence of three cracks - by 9.12% ( $D=0.09$ ); for a pulsed magnetic field in the presence of one crack  $Q^{-1}$  decreased by 7.14% ( $D=0.05$ ), in the presence of two cracks - by 8.39% ( $D=0.09$ ), in the presence of three cracks - by 9.02% ( $D=0.09$ ). When testing the samples of natural wood and pressure-modified drooping birch (*Betula pendula* Roth) wood, we obtained an asymptotic equation was obtained for approximating the dependence of the decrease in  $Q^{-1}$  on the number of cracks, with the approximation value  $R^2=0.994$ . The study of the dependence of internal friction on the process of crack formation in various types of wood provides preparation for the next stage - the construction of a prototype system for non-destructive testing of defects.

**Keywords:** internal friction of wood, diagnostics of cracks in wood, natural and modified wood, drooping birch (*Betula pendula* Roth), ultrasound, pulsed magnetic field

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Russu A. V., Shamaev V. A., Ziemelis A. (2023). Crack formation in natural and pressure-modified silver birch (*Betula pendula* Roth) wood: the effect of the internal friction index under the influence of external disturbances. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 219-235 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/15>.

*Received* 04.09.2023. *Revised* 12.11.2023. *Accepted* 16.11.2023. *Published online* 30.11.2023.

### Введение

Внутреннее трение вызвано силами сопротивления, которые возникают при столкновении частиц вещества в процессе движения друг относительно друга. Это связано с взаимодействием молекул и атомов между собой, а также их колебательными и поворотными движениями. Например, при движении физического тела внутри газовой или жидкой среды возникает внутреннее трение, которое известно как вязкость. По этой причине возникают локальный разогрев тела и потери энергии в виде диссипативных процессов.

Авторы экспериментировали с образцами натуральной и модифицированной древесины, применяя специально разработанный прибор, который формирует затухающие изгибные колебания, вызывающие внутреннее трение в материале.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что метод внутреннего трения может рассматриваться как структурно чувствительный метод для выявления трещин в древесине.

Хорошо известный факт, что некоторые трещины в древесине достаточно компактны и закрыты, а видимым образом проявляются только как тонкие слабозаметные линии, не очень глубокие, сильно схожие с древесными волокнами. Это осложняет процесс их диагностики. Применяя установку внутреннего трения, удалось идентифицировать как крупные, так и менее заметные трещины. Также было замечено, что внутреннее трение в древесине зависит от ее состава и структуры.

Данные исследования могут быть полезны для разработки новых методов неразрушающего контроля, а также для оценки механических свойств древесины. Например, применение механической спектроскопии тел на основе метода внутреннего трения поможет выявить трещины в древесине до их возникновения, чтобы предотвратить разрушение материала.

Появление трещин в древесине причиняет ей вред, который приводит к разрушительным последствиям. Во-первых, трещины снижают прочность материала, уменьшая его надежность и делая невозможным его использование в различных конструкциях. Во-вторых, трещины могут стать каналами проникновения влаги в древесину, а значит, также способствуют разрушению материала, добавок провоцируя процессы гниения или плесени. Пространство трещин может стать местом обитания термитов или древоточцев, которые наносят огромный урон материалу, делая его негодным для дальнейшего использования. Такие внешние факторы как температура и влажность приводят к уширению трещин, поэтому также способствуют разрушению древесины. Кроме того, наличие трещин в древесине может резко снижать эстетическое свойства материала, который используется в отделке или декоративных целях, например, при производстве мебели и полов. По этой причине выбор качественной древесины, без трещин крайне необходим для последующей ее сохранности, эксплуатации и увеличения срока службы [1].

В некоторых случаях вред, причиняемый трещинами, может быть обращен в пользу, то есть трещины в древесине могут иметь различное применение. Например, декоративное применение: трещины могут придать древесине уникальный и неповторимый внешний вид, обогащая её текстуру и структуру. Такие доски могут использоваться для создания мебели, дверей, подоконников, рам и других элементов интерьера. Трещины в древесине помогают обеспечить решение эстетических задач - выделить контуры и формы различных деталей, делая их более видимыми и привлекательными по аналогии с кракелюром [2]. Трещины могут быть заполнены специальными смолами или эпоксидными смолами, создавая интересные эффекты и обеспечивая дополнительную прочность изделию.

Трещины могут быть выделены и подчеркнуты при помощи специальных отделочных техник, создавая впечатление, что древесина уже длительное время использовалась и подверглась естественному износу, таким образом формируя эффект "старой" или "устаревшей" древесины. Заполнение небольших трещин в древесине различными материалами, такими как деревянные шпатлевки или эпоксидные смолы обеспечивает восстановление прочности и эстетического вида поврежденной древесины. В некоторых случаях трещины в древесине желательны для создания особенного звучания музыкального инструмента. В таких случаях, трещины могут быть профессионально очищены и зафиксированы для сохранения исключительного звукового эффекта. Кроме того, металлизация древесины оловом и висмутом при помощи микроволновой обработки позволила эффективно использовать трещины для повышения качества и потребительских свойств древесного композита [3]. И это лишь некоторые из возможных применений трещин в древесине. В зависимости от конкретных требований и творческого видения, возможны и другие варианты использования.

Образование трещин в древесине и композитах на ее основе вызвано разнообразными причинами. Прежде всего это связано с наследуемостью растрескивания [4]. Также при сушке древесины или композитов на ее основе может происходить усадка материала, что приводит к появлению трещин [5]. Древесина и композитные материалы на ее основе способны поглощать влагу из окружающей среды. При длительном воздействии влаги материал разбухает и сжимается, что приводит к образованию трещин [6–8]. Древесина и композиты на ее основе могут подвергаться механическим нагрузкам, таким как удары, сжатие, растяжение [9]. А также материалы могут оказаться под воздействием условий окружающей среды с учетом формирования малоциклового усталости – все это служит причиной образования трещин и последующего разрушения материала [10; 11]. Резкие изменения температуры также могут вызывать термические напряжения в древесине и композитах на ее основе, что приводит к образованию трещин. Для древесных композитов неправильное смешивание компонен-

тов, некачественные материалы или неправильная технология производства также могут привести к образованию трещин. Некоторые деревья имеют врожденные дефекты, такие как внутренние напряжения, содержание смолы и другие физические недостатки, которые приводят к образованию трещин. Кроме того, на образование трещин могут одновременно повлиять различные факторы, в комплексе. К примеру одновременное влияние механической нагрузки и влажности интенсифицирует процесс образования трещин в древесине.

Для описания трещин и процесса трещинообразования уже существует большой выбор различных моделей [12]. Это связано с тем обстоятельством, что для древесины характерен сложный микроструктурный состав и очень специфическая микромеханика взаимодействий [13].

В древесиноведении сложился определенный набор методов исследования трещин. Методики разрушающих методов исследования основаны на определении темпа высвобождаемой энергии деформации, а также уровня интенсивности напряжения [14]. В нашем случае интерес представляют неразрушающие методы контроля.

Самый простой из методов неразрушающего контроля, не требующий специального оборудования и дополнительной подготовки, является метод визуального контроля. Визуальный контроль состоит в определении состоянии внешнего вида древесины, в осмотре трещин, оценки их геометрических параметров и места расположения. Визуальное изучение трещин при поддержке метода скоростной фотосъемки помогает определить трещины на поверхности тела, при этом эти данные непосредственно служат для принятия решения о последующих мерах, если они необходимы [15;16].

Следует отметить, что метод визуальной оценки в сравнении с ультразвуковым или радиографическим методом наиболее дешевый [17]. Но в тоже время визуальная оценка имеет ограниченную область наблюдения того, что на поверхности и не эффективно для случая, если трещина глубоко внутри объекта, либо осмотр происходит в затемненных условиях и труднодоступных местах. Поэтому для трещин в глубине, а также малозаметные

трещины требуют наличия других более сложных методов исследования.

К более сложным методам исследования следует отнести акустические методы, отличительная особенность которых состоит в том, что ударным тестером оценивают звукоотражение и реверберацию в древесине для определения локализации и характера трещин [18]. Применение акустических методов позволяет производить скоростное обследование значительных объемов древесины с целью диагностики трещин, их геометрических особенностей на ранних этапах их образования [19; 20]. Однако акустические методы ограничены формой и размерами исследуемых образцов древесины и локальной чувствительностью к трещинам, располагающимся на значительной глубине. Кроме того, внешние шумы увеличивают ошибочность получаемых данных. Решением проблемы является использование дорогостоящего оборудования.

Еще один метод исследования трещин – это сканирование при помощи ультразвука, которое помогает оценить глубину нахождения трещин и их геометрические параметры [21]. Ультразвуковой дефектоскоп обеспечивает визуализирование трещин при помощи пучка звуковой волны. С помощью данного метода в короткие сроки диагностируют трещины и их параметры в материале с высокой точностью, не используя повреждение объекта при проведении исследования. Данный метод может быть применен в работе в режиме реального времени. Однако при таком типе диагностики трещин появляются свои трудности – значительно усложняется процедура интерпретации, то есть для качественного применения метода требуются определенные навыки и опыт. Кроме того, проникающая способность ультразвука ограничена определенной глубиной, следовательно, и сам метод ограничен определенной областью сканирования. Также качество сканирования тесно взаимосвязано с состоянием поверхности исследуемого объекта. Ввиду того, что используемое оборудование может быть достаточно дорогим данный метод не всегда доступен для некоторых предприятий или организаций.

Метод термографии основан на другом физическом принципе: применение высокочувстви-

тельной инфракрасной камеры позволяет диагностировать трещины, поскольку величина температуры внутри трещины отличается от температуры внешней древесины. Это также неразрушающий метод контроля, который очень ценен для диагностики скрытых трещин [22]. Метод обладает большой производительностью и высокой точностью, но сравнительно небольшой глубиной проникновения, а его эффективность тесно связана с величиной разницы температур между трещиной и поверхностью древесины, что не всегда осуществимо. На конечный результат диагностики также могут накладываться искажения такие внешние факторы как температура и влажность, и такое свойство объекта как неровность поверхности.

Метод рентгеновской диагностики основан на применении пучков рентгеновских лучей для диагностики трещин в древесине [23]. Данный метод позволяет диагностировать видимые и малозаметные трещины, их локализацию и размеры как для малых объектов, так и для больших. Но наиболее существенные недостатки метода – дорогостоящее оборудование и работа с источником ионизирующей радиации, причиняющей вред здоровью. В этом случае необходимы особые меры предосторожности и дополнительные средства для защиты операторов. Эффективность рентгеновской диагностики зависит от большой плотности древесины и содержания металлических включений, которые уменьшают результативность обнаружения и оценки трещин.

Таким образом, каждый из упомянутых методов обладает преимуществами и недостатками в работе, по этой причине используют комбинацию из нескольких методов, и разработка новых неразрушающих методов диагностики трещин в древесине представляет большой практический интерес.

Существует еще одна группа методов неразрушающего изучения материалов для получения информации о свойствах и выявления дефектов структуры – это методы исследования внутреннего трения.

В основу метода внутреннего трения положен принцип возбуждения механических затухающих колебаний в объекте. Данный метод может быть использован в процессе подготовки материала

и его эксплуатации, поскольку обеспечивает обнаружение микротрещин и дефектов в теле с высокой точностью в режиме реального времени и при этом не требуется дорогостоящее оборудование.

Представляет практический интерес наиболее распространенная разновидность метода внутреннего трения – метод изгибных свободнозатухающих колебаний при котором величина внутреннего трения определяется по логарифмическому декременту затухания. Метод изгибных колебаний допускает масштабирование и корректировку для учета воздействия влажности и температуры. В процессе эксплуатации установки определения внутреннего трения для повышения эффективности интерпретации результатов оператор может быть снабжен пополняемой базой соответствующих данных для корректной оценки трещин и повреждений.

Еще одна разновидность методов внутреннего трения получила название – резонансные, поскольку они основаны на измерении частоты собственных колебаний материала при возбуждении внешней силой. Для оценки внутреннего трения учитывают изменение резонансной частоты и логарифмического декремента затухания. Резонансные методы обычно используют при частотах колебаний порядка нескольких сотен килогерц. В следующем мегагерцовом диапазоне частот используют импульсный ультразвуковой метод, который основан на измерении ослабления амплитуды ультразвукового импульса при его прохождении от одного конца образца до противоположного.

Однако общий недостаток всех резонансных методов исследования внутреннего трения состоит в ограниченности частотного диапазона измерения внутреннего трения на одном и том же образце. А применение ультразвука для определения внутреннего трения обладает еще одним недостатком – в этом случае происходит диффузионное рассеяние на неоднородностях структуры материала. По этой причине представляется перспективным развитие метода внутреннего трения для исследования древесины и композитов на ее основе, используя свободно затухающие, например, изгибные колебания.

Цель работы – исследовать теоретическую и эмпирическую взаимосвязь эффектов влажности,

ультразвука, импульсного магнитного поля с показателем внутреннего трения для натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth), обладающей дефектами трещин.

### Материалы и методы

Работа является теоретико-эмпирическим исследованием.

#### *Предмет и объект исследования*

Объектом исследования явились образцы натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth). Заготовки для получения образцов производились в Хлевенском Лесхозе Липецкой обл. (52.184130, 39.110463, НУМ 157м).

Предмет исследования – явление внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) под влиянием влажности, ультразвука и импульсного магнитного поля при отсутствии и наличии трещин в натуральной и модифицированной древесине.

Сырьем для получения модифицированной древесины марки «Дестам», которая представляет собой модифицированную прессованием древесину березы повислой (*Betula pendula* Roth) является отобранный лесоматериал березы диаметром 190мм и длиной 1м, без гнили, затем заготовки пропитывают, прессуют, высушивают и фрезеруют до необходимых размеров [24; 25]. Образцы натуральной древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) и модифицированной прессованием древесины марки «Дестам» (табл. 1) для испытания должны иметь прямоугольную форму и быть одинакового размера 500х42х2,5мм.

При подготовке образцов натуральной и модифицированной прессованием древесины для проведения эксперимента осуществляли контроль качества. Не допускались образцы с трещинами, сучками, гнилью и другими дефектами.

Для проведения эксперимента вырезали образцы следующих геометрических размеров: длина 500 мм (свободная длина 400 мм), ширина 42 мм, толщина 2,5 мм. Образцы предварительно взвешивали, и определяли их плотность. Минимальное количество образцов должно быть не менее 3 шт.

Эксперимент проводили с образцами древесины влажностью 12%.

Таблица 1

Некоторые механические свойства используемых в исследовании образцов

Table 1

Mechanical properties types of wood, used this study

Материал образца Sample material	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>   Impact strength, kJ/m <sup>2</sup>	
		Влажность Moisture	
		12%	30%
Натуральная древесина березы повислой ( <i>B. pendula</i> Roth) Birch	550	9,3	7,8
Модифицированная древесина марки «Дестам»   Destam (birch modified)	800	10,2	9,2

Источник: Леонтьев Л. Л. Древесиноведение и лесное товароведение: учеб. для вузов / Л. Л. Леонтьев. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 416 с. - ISBN 978-5-507-44386-4. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (дата обращения: 01.09.2023).

Source: Leontiev L.L. Wood science and forest goods management: a textbook for universities. - 4<sup>th</sup> ed., stereotypical. - St. Petersburg : Lan, 2022. - 416 p. - ISBN 978-5-507-44386-4. - URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (01.09.2023).

### *Теоретические предпосылки*

Для оценки внутреннего трения  $Q^{-1}$  в древесине образцов использован метод логарифмического декремента затухания на основе свободноизгибных колебаний.

В работе за основу взято измерение двух последовательных амплитуд колебаний. При определении внутреннего трения методом свободно затухающих изгибных колебаний используют соотношение

$$Q^{-1} = \delta / \pi = \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{A_n}{A_{n+1}} \right), \quad (1)$$

где  $Q^{-1}$  – внутреннее трение,

$\delta$  – логарифмический декремент затухания,

$A_n$  и  $A_{n+1}$  – амплитуды колебаний соседних периодов колебаний.

Величина внутреннего трения и логарифмический декремент затухания могут быть равноценно использованы для описания экспериментальных зависимостей, получаемых методом свободноизгибных колебаний.

Величина логарифмического декремента затухания  $\delta$  зависит от таких факторов, как направление действия напряжений относительно волокон (вдоль или поперек), породы древесины, микро- и макроструктуры, влажности, температуры, наличия дефектов.

### *– Дизайн эксперимента или сбор данных*

Температура и влажность рабочего помещения 22 °С и 68%, что удовлетворяет требованиям для проведения эксперимента

Для каждого материала подготавливают бездефектные образцы и образцы с дефектами трещин в количестве – 1, 2, 3 трещины, получаемые расколом. Внешний вид показан на рис. 1. Для повторяемости результатов используется не менее 3 одинаковых образцов для каждого типа исследуемого материала.

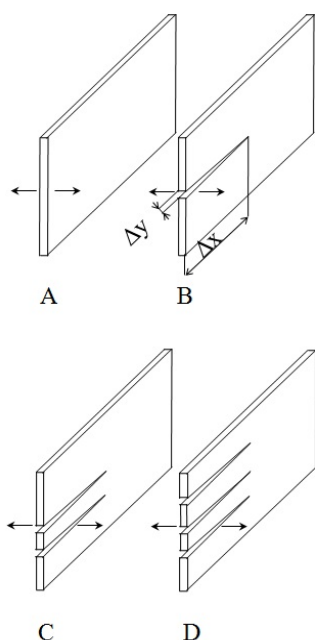


Рисунок 1. Внешний вид образцов:

A – без дефектов, B - с одной трещиной, C - с двумя трещинами, D - с тремя трещинами

Figure 1. Appearance of samples:

A - without defects, B - with one crack, C - with two cracks, D - with three cracks

Глубина каждой трещины  $\Delta x=50$  мм, ширина трещины  $\Delta y=0,5$  мм.

Перед испытанием образцов производят их соответствующую обработку для достижения заданного уровня влажности (экспозиция 0, 10, 20, 30, 40%), отдельно при влажности 10% производят ультразвуковую обработку (экспозиция 0, 5, 10, 15, 20 мин), также при влажности 10% производят обработку импульсным магнитным полем (экспозиция 0; 0,5; 1; 1,5; 2 мин). Внешний вид и параметры установок приведены на рис. 2 и 3, и в табл. 2 и 3 соответственно.



Рисунок 2. Установка ультразвуковой обработки:

1 – образец; 2 – ванна;

3 – ультразвуковой излучатель

Figure 2. Ultrasonic treatment unit:

1 – sample; 2 – bath; 3 – ultrasonic emitter

Источник: собственная фотография авторов

Source: own photo

Таблица 2

Технические характеристики ультразвуковой ванны

Table 2

Specifications of ultrasonic cleaner

Наименование   Name	Ед. измер.   Unit meas.	Значение   Meaning
Модель   Model		УЗК 1,3   USK 1,3
Размеры рабочей емкости   Working container dimensions	м   m	0,12x0,11x0,1
Рабочий объем   Working volume	м <sup>3</sup>   m <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>-3</sup>
Рабочая частота   Operating frequency	кГц   kHz	24,0 ± 7,5%



Ультразвуковая мощность   Ultrasonic power	Вт   W	80
Напряжение питания   Supply voltage	В   V Гц   Hz	220 50
Установка времени таймера   Timer setting	с   s	1-900 на энкопере   on encoder
Температура жидкости   Liquid temperature	С°	20-105
Панель управления   Control panel		аналоговая   analog
Корпус   Housing		нержавеющая сталь   stainless steel

Источник: ООО «Спецмаш», РФ  
Source: LLC Spetsmash, RF

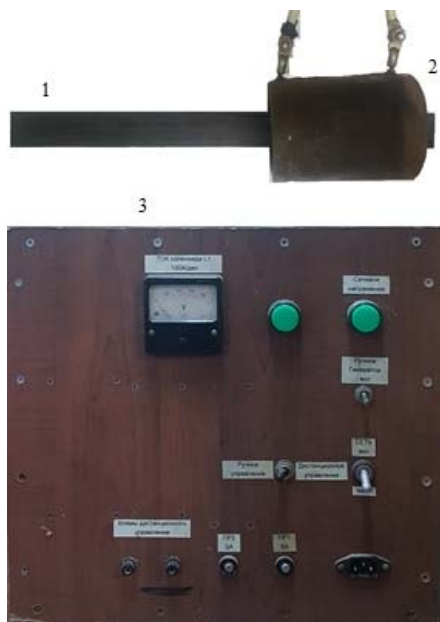


Рисунок 3. Установка импульсно-магнитной обработки: 1 – образец; 2 – соленоид; 3 – панель управления

Figure 3. Installation of pulsed magnetic processing: 1 – sample; 2 – solenoid; 3 – control panel

Источник: собственная фотография авторов  
Source: own photo

Таблица 3

Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля

Table 3

Generator Specifications pulsed magnetic field

Наименование   Name	Ед. измер.   Unit meas.	Значение   Meaning
Размер заготовок   Work piece size	м   m	0,05x0,05x0,1
Количество заготовок   Number of blanks	шт.   PCS	1
Максимальная индукция магнитного поля   Maximum magnetic field induction	Тл   T	0,3
Сила тока в импульсе   Pulse current	кА   kA	2
Число импульсов при обработке   Number of pulses during processing		3000/6000
Частота подачи импульсов   Pulse frequency	Гц   Hz	100
Длительность импульса   Pulse duration	10 <sup>-6</sup> с   s	10
Форма импульса   Pulse shape		треугольная   triangular
Длительность обработки образцов   Sample processing time	с   s	30/60
Индуктивность соленоида   Solenoid inductance	10 <sup>-6</sup> Гн.   10 <sup>-6</sup> H	5-10
Плотность намотки соленоида   Solenoid winding density	витков/метр   turns/meter	180
Напряжение однофазной питающей сети   Single-phase mains voltage	В   V	220
Потребляемая мощность генератором   Power consumption of the generator	Вт   W	1000
Габариты генератора   Generator dimensions	м   m	0,41x0,41x0,23
Масса генератора   Generator weight	кг   kg	15

Источник: ВГЛТУ, Лаборатория физико-механических измерений древесины, РФ

Source: VSUFT, Laboratory of Physical and Mechanical Measurements of Wood, RF

Образцы по одному закрепляют в испытательном устройстве, чтобы они могли свободно колебаться и обеспечивать безопасность и точность

результатов. Внешний вид испытательного устройства показан на рис. 4.



Рисунок 4. Установка для измерения амплитуды изгибных колебаний:

1 - персональный компьютер, 2 - стабилизатор напряжения, 3 - штатив, 4 - электромагнит, 5 - цифровой динамометр, 6 - образец древесины, 7 - трехпозиционная оснастка, 8 - трансформатор, 9 - реостат, 10 - амперметр, 11 - защитное заземление, 12 - рабочий стол

Figure 4. Installation for measuring the amplitude of flexural vibrations:

1 - personal computer, 2 - voltage stabilizer, 3 - tripod, 4 - electromagnet, 5 - digital dynamometer, 6 - wood sample, 7 - three-position equipment, 8 - transformer, 9 - rheostat, 10 - ammeter, 11 - protective earth, 12 - desktop

Источник: собственная фотография автора  
Source: own photo

Возбуждение изгибных затухающих колебаний обеспечивают при помощи электромагнита (рис. 4, поз. 4), который воздействует на фольгу из сплава с большой коэрцитивной силой (пермаллой), закрепленной на свободном конце исследуемого образца (рис. 4, поз. 6). Величина амплитуды колебаний измеряется тензодатчиком цифрового динамометра (рис. 4, поз. 5) и задается регулировкой величиной электрического тока в обмотках электромагнита реостатом (рис. 4, поз. 9).

Измерение амплитуды и частоты колебаний. С помощью цифрового динамометра производится измерение амплитуды колебаний и времени, затраченное на несколько полных колебаний каждого образца (рис. 4, поз. 5). Результаты по шине данных, связывающую измерительную систему с ком-

пьютером (рис. 4, поз. 1), выводятся на экран монитора и могут быть представлены в виде соответствующих таблиц и графиков.

Расчет коэффициента внутреннего трения  $Q^{-1}$  производят с использованием формулы (1).

– Анализ данных (Data analysis)

Для оценки степени изменчивости данных используется общеизвестная статистическая характеристика – величина дисперсии  $D$ .

Для определения достоверности аппроксимации используют коэффициент детерминации  $R^2$  (R-SQUARED):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^b - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

где  $N$  – общее количество экспериментальных точек,  $y_i^b$  – теоретическое значение величины внутреннего трения,  $y_i$  – экспериментальное значение величины внутреннего трения,  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение величины внутреннего трения.

Чем ближе значение  $R^2$  к единице, тем лучше выбранная функция модели соответствует фактическим данным наблюдения.

Все расчеты проведены в программе Excel 2003.

### Результаты и обсуждение

На рис. 5, 6 и 7 приведены графики испытаний различных образцов натуральной и модифицированной прессованием древесины для выявления зависимости внутреннего трения от количества одинаковых трещин. Для наглядности экспериментальные точки соединены соответствующими аппроксимирующими линиями: для бездефектных случаев – сплошными, для дефектных – прерывистыми.

Экспериментальные данные показали, что в условиях влияния влажности в среднем  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину 7,04 % ( $D=0,08$ ), для двух трещин – на 8,4 % ( $D=0,15$ ), для трех – на 9,06 % ( $D=0,15$ ).

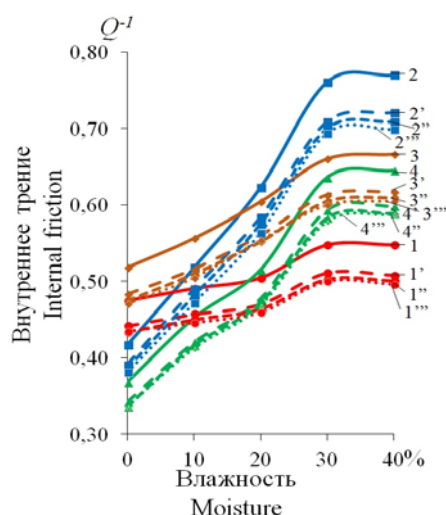


Рисунок 5. Влияние влажности древесины на внутреннее трение: 1 – «Дестам», радиальное направление, без дефектов, 1' – «Дестам», радиальное направление, одна трещина, 1'' – «Дестам», радиальное направление, две трещины, 1''' – «Дестам», радиальное направление, три трещины, 2 – «Дестам», тангенциальное направление, без дефектов, 2' – «Дестам», тангенциальное направление, одна трещина, 2'' – «Дестам», тангенциальное направление, две трещины, 2''' – «Дестам», тангенциальное направление, три трещины, 3 – натуральная береза, радиальное направление, без дефектов, 3' – натуральная береза, радиальное направление, одна трещина, 3'' – натуральная береза, радиальное направление, две трещины, 3''' – натуральная береза, радиальное направление, три трещины 4 – натуральная береза, тангенциальное направление, без дефектов, 4' – натуральная береза, тангенциальное направление, одна трещина, 4'' – натуральная береза, тангенциальное направление, две трещины, 4''' – натуральная береза, тангенциальное направление, три трещины

Figure 5. Influence of wood moisture on internal friction: 1 - "Destam", radial direction, no defects, 1' - "Destam", radial direction, one crack, 1'' - "Destam", radial direction, two cracks, 1''' - "Destam", radial direction, three cracks, 2 - "Destam", tangential direction, without defects, 2' - "Destam", tangential direction, one crack, 2'' - "Destam", tangential direction, two cracks, 2''' – Destam, tangential direction, three cracks, 3 – natural birch, radial direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' natural birch, tangential, three cracks

Источник: собственные экспериментальные данные авторов / Source: authors' own experimental data

В условиях влияния ультразвука в среднем  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину 7,17 % ( $D=0,05$ ), для двух трещин – на 8,46 % ( $D=0,05$ ), для трех – на 9,12 % ( $D=0,09$ ).

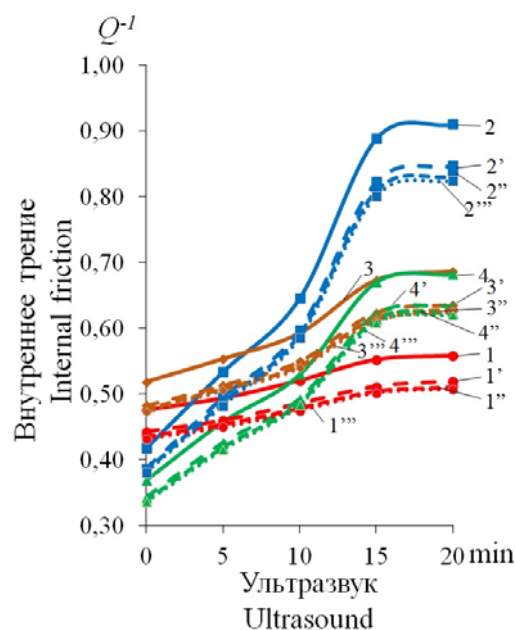


Рисунок 6. Влияние ультразвуковой обработки древесины на внутреннее трение: 1 – «Дестам», радиальное направление, без дефектов, 1' – «Дестам», радиальное направление, одна трещина, 1'' – «Дестам», радиальное направление, две трещины, 1''' – «Дестам», радиальное направление, три трещины, 2 – «Дестам», тангенциальное направление, без дефектов, 2' – «Дестам», тангенциальное направление, одна трещина, 2'' – «Дестам», тангенциальное направление, две трещины, 2''' – «Дестам», тангенциальное направление, три трещины, 3 – натуральная береза, радиальное направление, без дефектов, 3' – натуральная береза, радиальное направление, одна трещина, 3'' – натуральная береза, радиальное направление, две трещины, 3''' – натуральная береза, радиальное направление, три трещины 4 – натуральная береза, тангенциальное направление, без дефектов, 4' – натуральная береза, тангенциальное направление, одна трещина, 4'' – натуральная береза, тангенциальное направление, две трещины, 4''' – натуральная береза, тангенциальное направление, три трещины

Figure 6. Influence of ultrasonic wood treatment on internal friction: 1 - "Destam", radial direction, no defects, 1' - "Destam", radial direction, one crack, 1'' - "Destam", radial direction, two cracks, 1''' - "Destam", radial direction, three cracks, 2 - "Destam", tangential direction, without defects, 2' - "Destam", tangential direction, one crack, 2'' - "Destam", tangential direction, two cracks, 2''' – Destam, tangential direction, three cracks, 3 – natural birch, radial direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' – natural birch, tangential, three cracks

direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' natural birch, tangential, three cracks

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

В условиях влияния импульсного магнитного поля  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину 7,14% ( $D=0,05$ ), для двух трещин – на 8,39% ( $D=0,09$ ), для трех – на 9,02% ( $D=0,09$ ).

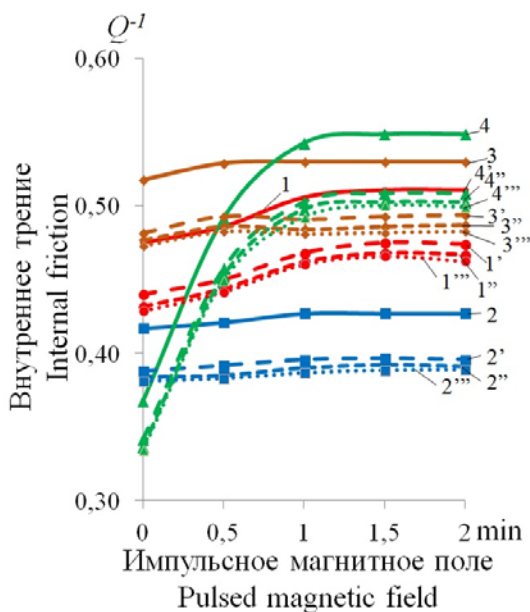


Рисунок 7. Влияние импульсной магнитной обработки древесины на внутреннее трение: 1 – «Дестам», радиальное направление, без дефектов, 1' – «Дестам», радиальное направление, одна трещина, 1'' – «Дестам», радиальное направление, две трещины, 1''' – «Дестам», радиальное направление, три трещины, 2 – «Дестам», тангенциальное направление, без дефектов, 2' – «Дестам», тангенциальное направление, одна трещина, 2'' – «Дестам», тангенциальное направление, две трещины, 2''' – «Дестам», тангенциальное направление, три трещины, 3 – натуральная береза, радиальное направление, без дефектов, 3' – натуральная береза, радиальное направление, одна трещина, 3'' – натуральная береза, радиальное направление, две трещины, 3''' – натуральная береза, радиальное направление, три трещины 4 – натуральная береза, тангенциальное направление, без дефектов, 4' – натуральная береза, тангенциальное направление, одна трещина, 4'' – натуральная береза, тангенциальное направление, две трещины, 4''' – натураль-

ная береза, тангенциальное направление, три трещины

Figure 7. Influence of pulsed magnetic wood treatment on internal friction: 1 - "Destam", radial direction, no defects, 1' - "Destam", radial direction, one crack, 1'' - "Destam", radial direction, two cracks, 1''' - "Destam", radial direction, three cracks, 2 - "Destam", tangential direction, without defects, 2' - "Destam", tangential direction, one crack, 2'' - "Destam", tangential direction, two cracks, 2''' – Destam, tangential direction, three cracks, 3 – natural birch, radial direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' natural birch, tangential, three cracks

Источник: собственные экспериментальные данные авторов / Source: authors' own experimental data

Произведя усреднение по проценту отклонения для каждого дефектного варианта, получаем следующие значения: для одного дефекта снижение величины внутреннего трения  $Q^{-1}$  в среднем составляет – 7,12% ( $D=0,13$ ), для двух дефектов – 8,42% ( $D=0,11$ ), для трех дефектов – 9,07% ( $D=0,09$ ). Это можно отобразить соответствующим графиком асимптоты (рис. 8).

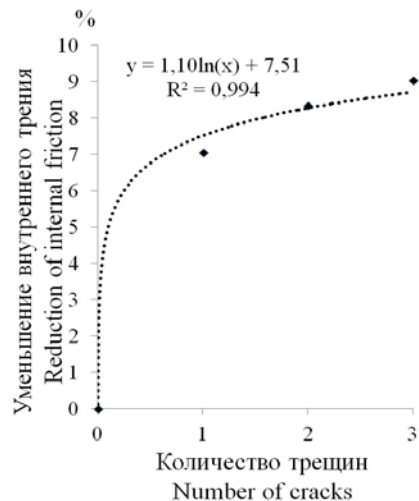


Рисунок 8. Асимптотическое уменьшение внутреннего трения в натуральной и модифицированной прессованной древесине в зависимости от количества трещин

Figure 8. Asymptotic decrease in internal friction in natural and modified wood depending on the number of cracks

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

На рис. 8 указано уравнение кривой асимптотического уменьшения внутреннего трения в зависимости от числа дефектов:

$$y = 1,10 \ln(x) + 7,51, \quad (3)$$

где  $x$  – количество трещин в образце,  
 $y$  – проценты уменьшения  $Q^{-1}$ ,

Уравнение (3) обеспечивает высокую степень аппроксимации  $R^2=0,994$ . Следовательно, данное уравнение с достаточной точностью позволяет прогнозировать величину уменьшения внутреннего трения в зависимости от числа трещин в образце.

### Выводы

Методом внутреннего трения на основе изгибных колебаний были определены величины внутреннего трения для натуральной и модифицированной прессованием древесины при отсутствии дефектов, а также для случаев с одним, двумя, тремя трещинами с учетом влияния влажности, ультразвукового поля и импульсного магнитного поля. Экспериментальные данные показали, что в среднем в условиях влияния влажности  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину

7,04%, для двух трещин – на 8,4%, для трех – на 9,06%, в условиях влияния ультразвука для одной трещины в образце на величину 7,17%, для двух трещин – на 8,46%, для трех – на 9,12%, в условиях влияния импульсного магнитного поля для одной трещины в образце на величину 7,14%, для двух трещин – на 8,39%, для трех – на 9,02%.

На основании средних значений величины уменьшения внутреннего трения в зависимости от числа трещин получено уравнение асимптоты  $y=1,10\ln(x)+7,51$  с высокой степенью аппроксимации  $R^2=0,994$ , позволяющее прогнозировать изменение величины внутреннего трения с учетом роста числа трещин в образце из натуральной или модифицированной прессованием древесины в радиальном и тангенциальном направлениях.

Представляет интерес дальнейшее исследование зависимости внутреннего трения от процесса трещинообразования в различных породах древесины, особенно обладающих большой плотностью, для построения прототипа системы дефектоскопии на основе измерения внутреннего трения.

### Список литературы

1. Dahle S., Pilko M., Žigon J., Zaplotnik R., Petrič M., Pavlič M. An open-source surface barrier discharge plasma pretreatment for reduced cracking of outdoor wood coatings. *Cellulose*. 2021; 28(12): 8055-8076. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04014-2>
2. Abdollahzadeh Jamalabadi M.Y. Optimal rectangular crack pattern based on constructal, fracture saturation, and energy minimization theories for painting on wood. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022; 160: 112242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112242>
3. Chai Yuan, Tao Xin, Liang Shanqing, Fu Feng Preparation and property characterization of crack-filled type microwave puffed wood based metal composites. 2021; 43: 118-125. DOI: <http://j.bjfu.edu.cn/article/doi/10.12171/j.1000-1522.20210209>
4. Zeltiņš P., Katrevičs J., Gailis A., Maaten T., Bāders E., Jansons Ā. Effect of Stem Diameter, Genetics, and Wood Properties on Stem Cracking in Norway Spruce. *Forests*. 2018; 9(9): 546. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090546>
5. Mezui E.N., Nziengui C.F.P., Pitti R.M., Ikogou S., Ango S.E., Talla P.K. Strain and cracks investigations on tropical green wood slices under natural drying: experimental and numerical approaches. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022; 81(1): 187-207. DOI: [10.1007/s00107-022-01881-9](https://doi.org/10.1007/s00107-022-01881-9)
6. Fu Z., Chen J., Zhang Y., Xie F., Lu Y. Review on Wood Deformation and Cracking during Moisture Loss. *Polymers*. 2023; 15(15): 3295. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15153295>
7. Botter-Kuisch H.P., Van den Bulcke J., Baetens J.M., Van Acker J. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks. *Wood Science and Technology*. 2020; 54(4): 1029-1049. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>

8. He J., She Y., Li M., Cai G., Hu B. Experimental Study on the Crack Evolution Pattern of Pine Wood with Different Moisture Content. *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2022; 10(6): 102-110. DOI: <https://doi.org/10.36347/sjet.2022.v10i06.002>
9. Christoforo A.L., Penteado L.D., Camargo M.V. de, Arroyo F.N., Santos H.F. dos, Dias A.M.P.G., Lahr F.A.R. Estimative of Wood Strength in the Tensile Perpendicular to the Grain by the Cracking Strength. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4201159>
10. Zhang R., Taylor A., Charalambides M., Balint D., Young C., Barbera D., Blades N. A Numerical Model for Predicting the Time for Crack Initiation in Wood Panel Paintings Under Low-Cycle Environmentally Induced Fatigue. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4295737>
11. Autengruber M., Lukacevic M., Gröstlinger C., Füssl J. Finite-element-based prediction of moisture-induced crack patterns for cross sections of solid wood and glued laminated timber exposed to a realistic climate condition. *Construction and Building Materials*. 2021; 271: 121775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121775>
12. Ostapska K., Malo K.A. Crack path tracking using DIC and XFEM modelling of mixed-mode fracture in wood. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021; 112: 102896. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102896>
13. Supriatna D., Yin B., Konopka D., Kaliske M. An anisotropic phase-field approach accounting for mixed fracture modes in wood structures within the Representative Crack Element framework. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022; 269: 108514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108514>
14. Zizhen G., Gong M., Li L., Mohammadi M. An exploratory study on mixed-mode fracture and strain distribution near a crack tip of adhesively-laminated wood specimens using the modified arcon fixture and digital image correlation. *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*. 2023: 111-118. DOI: <https://doi.org/10.52202/069179-0015>
15. Carlsson J., Isaksson P. Dynamic crack propagation in wood fibre composites analysed by high speed photography and a dynamic phase field model. *International Journal of Solids and Structures*. 2018; 144-145: 78-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.04.015>
16. Lin Y., Xu Z., Chen D., Ai Z., Qiu Y., Yuan Y. Wood Crack Detection Based on Data-Driven Semantic Segmentation Network. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2023; 10(6): 1510-1512. DOI: <https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123357>
17. Cao X., Li G. An Effective Method of Wood Crack Trace and Quantity Detection Based on Digital Image Processing Technology. 2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing: ICMLC 2021. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2021; 304-309. DOI: <https://doi.org/10.1145/3457682.3457728>
18. Huang C., Li M., Fang S., Zhao Y., Mao F. Research on the effect of wood surface cracks on propagation characteristics and energy attenuation of longitudinal acoustic emission. *Wood Research*. 2022; 67(5): 744-759. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.5.744759>
19. Tu J., Zhao D., Zhao J., Zhao Q. Experimental study on crack initiation and propagation of wood with LT-type crack using digital image correlation (DIC) technique and acoustic emission (AE). *Wood Science and Technology*. 2021; 55(6): 1577-1591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01252-8>
20. Guo Y., Zhu S., Chen Y., Liu D., Li D. Acoustic Emission-Based Study to Characterize the Crack Initiation Point of Wood Fiber/HDPE Composites. *Polymers*. 2019; 11(4): 701. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11040701>
21. Reinprecht L., Šupina P. Comparative evaluation of inspection techniques for impregnated wood utility poles: ultrasonic, drill-resistive, and CT-scanning assessments. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015; 73(6): 741-751. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0943-8>
22. Peng L., Wang H., Zhang H., Xin Z., Ke D., Lei Z., Ye Q. Study of the effect of hole defects on wood heat transfer based on infrared thermography. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023; 191: 108295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108295>

23. Руссу А.В., Шамаев В.А., Разиньков Е.М., Зимелис А. Исследование внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth). Лесотехнический Журнал. 2023; 13(1): 236-256. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>. Режим доступа <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814701>

24. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины: монография. 2-е издание, перераб. и доп. Воронеж: ВГЛТУ. 2022. 571 с. Режим доступа <https://elibrary.ru/item.asp?id=50026105>

25. Зарипов, Ш. Г. Систематизация факторов, влияющих на образование трещин в листовенных пиломатериалах при сушке // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018; 3(363): 127-136. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127. Режим доступа <https://elibrary.ru/item.asp?id=35018828>

### References

1. Dahle S., Pilko M., Žigon J., Zaplotnik R., Petrič M., Pavlič M. An open-source surface barrier discharge plasma pretreatment for reduced cracking of outdoor wood coatings. *Cellulose*. 2021; 28(12): 8055-8076. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04014-2>

2. Abdollahzadeh Jamalabadi M.Y. Optimal rectangular crack pattern based on constructal, fracture saturation, and energy minimization theories for painting on wood. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022; 160: 112242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112242>

3. Chai Yuan, Tao Xin, Liang Shanqing, Fu Feng Preparation and property characterization of crack-filled type microwave puffed wood based metal composites. 2021; 43: 118-125. DOI: <http://j.bjfu.edu.cn/cn/article/doi/10.12171/j.1000-1522.20210209>

4. Zeltiņš P., Katrevičs J., Gailis A., Maaten T., Bāders E., Jansons Ā. Effect of Stem Diameter, Genetics, and Wood Properties on Stem Cracking in Norway Spruce. *Forests*. 2018; 9(9): 546. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090546>

5. Mezui E.N., Nziengui C.F.P., Pitti R.M., Ikogou S., Ango S.E., Talla P.K. Strain and cracks investigations on tropical green wood slices under natural drying: experimental and numerical approaches. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022; 81(1): 187-207. DOI: 10.1007/s00107-022-01881-9

6. Fu Z., Chen J., Zhang Y., Xie F., Lu Y. Review on Wood Deformation and Cracking during Moisture Loss. *Polymers*. 2023; 15(15): 3295. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15153295>

7. Botter-Kuisch H.P., Van den Bulcke J., Baetens J.M., Van Acker J. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks. *Wood Science and Technology*. 2020; 54(4): 1029-1049. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>

8. He J., She Y., Li M., Cai G., Hu B. Experimental Study on the Crack Evolution Pattern of Pine Wood with Different Moisture Content. *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2022; 10(6): 102-110. DOI: <https://doi.org/10.36347/sjet.2022.v10i06.002>

9. Christoforo A.L., Penteado L.D., Camargo M.V. de, Arroyo F.N., Santos H.F. dos, Dias A.M.P.G., Lahr F.A.R. Estimative of Wood Strength in the Tensile Perpendicular to the Grain by the Cracking Strength. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4201159>

10. Zhang R., Taylor A., Charalambides M., Balint D., Young C., Barbera D., Blades N. A Numerical Model for Predicting the Time for Crack Initiation in Wood Panel Paintings Under Low-Cycle Environmentally Induced Fatigue. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4295737>

11. Autengruber M., Lukacevic M., Gröstlinger C., Füssl J. Finite-element-based prediction of moisture-induced crack patterns for cross sections of solid wood and glued laminated timber exposed to a realistic climate condition. *Construction and Building Materials*. 2021; 271: 121775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121775>

12. Ostapska K., Malo K.A. Crack path tracking using DIC and XFEM modelling of mixed-mode fracture in wood. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021; 112: 102896. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102896>

13. Supriatna D., Yin B., Konopka D., Kaliske M. An anisotropic phase-field approach accounting for mixed fracture modes in wood structures within the Representative Crack Element framework. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022; 269: 108514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108514>
14. Zizhen G., Gong M., Li L., Mohammadi M. An exploratory study on mixed-mode fracture and strain distribution near a crack tip of adhesively-laminated wood specimens using the modified arcon fixture and digital image correlation. *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*. 2023: 111-118. DOI: <https://doi.org/10.52202/069179-0015>
15. Carlsson J., Isaksson P. Dynamic crack propagation in wood fibre composites analysed by high speed photography and a dynamic phase field model. *International Journal of Solids and Structures*. 2018; 144-145: 78-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.04.015>
16. Lin Y., Xu Z., Chen D., Ai Z., Qiu Y., Yuan Y. Wood Crack Detection Based on Data-Driven Semantic Segmentation Network. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2023; 10(6): 1510-1512. DOI: <https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123357>
17. Cao X., Li G. An Effective Method of Wood Crack Trace and Quantity Detection Based on Digital Image Processing Technology. 2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing: ICMLC 2021. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2021; 304-309. DOI: <https://doi.org/10.1145/3457682.3457728>
18. Huang C., Li M., Fang S., Zhao Y., Mao F. Research on the effect of wood surface cracks on propagation characteristics and energy attenuation of longitudinal acoustic emission. *Wood Research*. 2022; 67(5): 744-759. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.5.744759>
19. Tu J., Zhao D., Zhao J., Zhao Q. Experimental study on crack initiation and propagation of wood with LT-type crack using digital image correlation (DIC) technique and acoustic emission (AE). *Wood Science and Technology*. 2021; 55(6): 1577-1591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01252-8>
20. Guo Y., Zhu S., Chen Y., Liu D., Li D. Acoustic Emission-Based Study to Characterize the Crack Initiation Point of Wood Fiber/HDPE Composites. *Polymers*. 2019; 11(4): 701. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11040701>
21. Reinprecht L., Šupina P. Comparative evaluation of inspection techniques for impregnated wood utility poles: ultrasonic, drill-resistive, and CT-scanning assessments. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015; 73(6): 741-751. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0943-8>
22. Peng L., Wang H., Zhang H., Xin Z., Ke D., Lei Z., Ye Q. Study of the effect of hole defects on wood heat transfer based on infrared thermography. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023; 191: 108295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108295>
23. Russu A.V., Shamaev V.A., Razinkov E.M., Ziemelis A. Internal friction investigation of the natural and compressed birch (*Betula pendula* Roth) wood. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*. 2023; 13, 1 (49), 236-256 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>. Access mode <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814701>
24. Shamaev V.A., Nickulina N.S., Medvedev I.N. *Wood modification: monograph*. 2nd edition, revised. and additional Voronezh: VGLTU. 2022. 571 p. (in Russian). Access mode <https://elibrary.ru/item.asp?id=50026105>
25. Zaripov Sh.G. Systematization of Factors Affecting the Cracking of Larch Lumber during Wood Drying. *Lesnoy zhurnal [Forestry journal]*, 2018; 3: 127–136 (in Russian). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127. Access mode <https://elibrary.ru/item.asp?id=35018828>

### Сведения об авторах

*Руссу Александр Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru).



✉ *Шамаев Владимир Александрович* – доктор технических наук, профессор., ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)

*Зимелис Андрис* – доктор технических наук, Технический университет г.Рига, ул. Кипсала, 6а, Рига, Латвия, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv).

### Information about the authors

*Alexander V. Russu* – postgraduate, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F.Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru).

✉ *Vladimir A. Shamaev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru).

*Andris Ziemelis* – Doctor of Technical Sciences, Technische Universitat Riga, Kipsalasiela 6a, Centrarajons, Riga, Latvia, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv).

✉ Для контактов / Corresponding author