

УДК 630*811.112

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ ПОЛЕНЬЕВ

Темнова Е.Б.

*Марийский государственный технический университет,
Йошкар-Ола, Россия*

Представлены результаты поисковых экспериментов по применению неразрушающего способа сертификации резонансной древесины ели на поленьях, основанного на измерении скорости звука поперек полена.

Ключевые слова: поленья ели, резонансные свойства, параметры ультразвука.

Введение. Материалом для изготовления дек музыкальных инструментов традиционно служит резонансная древесина ели и березы. При этом все мастера-изготовители уникальных инструментов выбирали древесину по одним, только им известным признакам, но резонансная древесина должна обладать исключительными акустическими свойствами.

Теоретические основы. Акустические свойства древесины характеризуются акустической константой, или константой излучения Н.Н. Андреева [2]:

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} = \frac{c}{\rho} \quad (1)$$

где E – модуль упругости, ρ – плотность материала, c – скорость распространения звука в древесине. Чем больше значение K , тем лучше считается акустическая древесина.

За многие столетия в разработке и изготовлении музыкальных инструментов накоплен большой опыт, сформированы определённые традиции. Основным музыкальным инструментом, производимым из резонансной древесины, является скрипка. Историки считают, что развитие производства скрипок происходило в первой половине XVI века в северо-восточной части Италии. По историческим данным известно шесть различных скрипичных школ. Выдающимися масте-

рами знаменитой кремонской школы (А.Амати, А.Гварнери, Д.Гварнери, А.Страдивари) созданы образцы струнных музыкальных инструментов, до сих пор не превзойденные по своим достоинствам. Эти образцы получены в условиях единичного производства при ручной доводке каждого музыкального инструмента в отдельности. Дальнейшее совершенствование музыкальных инструментов в условиях массового производства и разделения труда во многом связано с развитием научной базы.

Наиболее подходящими материалами для дек считаются ель, сосна, пихта кавказская, кедр сибирский, клен. Из них наибольшее распространение получила резонансная ель [13]. Ныне резонансные породы древесины становятся уникальным природным сырьём. Стоимость сертифицированных заготовок на мировом рынке достигает 1,0 – 1,5 тыс. \$/м³. Мастеров отличало очень бережное отношение к качественной древесине. Если древесина была с хорошими акустическими свойствами, то ее могли использовать даже с дефектами. Итальянские мастера скрипок открыли, что конструкция инструмента должна подчиняться качеству древесины, которое является решающим фактором, а не наоборот [3].

Гармонию факторного анализа приходится искать путем анализа весьма

тонкой "игры" сил и достаточно противоречивых тенденций, а это обуславливает необходимость более глубокого проникновения в суть проблемы резонансных свойств. Анализ [1, 4, 6-8, 10, 12, 14, 15] показывает, что существующие способы определения резонансной древесины основываются на анализе косвенных признаков разрушающимися способами. Исследования, основанные на прямых способах неразрушающей диагностики древесины, довольно таки сложны и немногочисленны и требуют дальнейшей проработки.

Способы отбора. Существуют способы отбора резонансного материала, основанные на косвенных признаках и основанные на инструментальной диагностике образцов.

В начале XX века российские производители музыкальных инструментов озаботились поиском резонансной древесины на территории России. Профессор Лесного института Н.А.Филиппов по результатам экспедиции заключил: «Из русской ели можно получить резонансный лес, по качеству не уступающий заграничному» [5].

Различные виды ели произрастают практически на всей территории России. В качестве резонансной используются ель, отобранная преимущественно в Архангельской и Вологодской областях. Ель северных районов России обладает лучшими физико-механическими свойствами. Одно из главных ее преимуществ - это малые годовые слои, обеспечивающие высокий модуль упругости, что определяет пригодность древесины как резонансной с высокими акустическими свойствами.

Лучшие резонансные свойства ели формируются в более суровых климатических (особенно горных) условиях и густых насаждениях. Есть сведения о том, что содержание в почве серебра также благоприятно влияет на получение такой древесины. Мастера, изготавливаю-

щие музыкальные инструменты, считают следующее.

Резонансная ель должна иметь несколько отличительных признаков: быть абсолютно вертикальной; иметь симметричную, узкую и островершинную крону; ствол с цилиндрической поверхностью и бессучковой зоной не менее 5-6 метров. У резонансной ели не должно быть также видимых пороков и повреждений. Дополнительно, по мнению некоторых французских мастеров, кора у резонансной ели должна быть серого цвета и состоять из достаточно малых и гладких чешуек.

Есть и другие мнения мастеров о внешних признаках резонансной ели - это отсутствие сучков, смоляных карманов, свилеватости и прочих пороков - обязательное условие качественной резонансной древесины. Древесина ели обычно белая со слабым желтоватым оттенком. На открытом воздухе с течением времени сильно она желтеет. Резонансная еловая древесина очень хорошо строгаются и циклюется по слою. Срез получается чистым, глянцево-белым. После шлифовки поверхность бархатистая со слабым матовым блеском.

Свойства. Важным показателем качества древесины, применяемой для изготовления музыкальных инструментов, являются макроструктурные показатели. По действующему стандарту на лесоматериалы для выработки резонансных пиломатериалов ширина годичного слоя допускается до 4 мм, а доля поздней древесины - до 30 %. Мнения исследователей об оптимальных значениях этих показателей для древесины с лучшими акустическими свойствами различны. По разным источникам ширина годичного слоя варьируется в пределах 1,5...2,5 мм, доля поздней древесины - 18...36 %.

Как отмечает Н. С. Нестеров [7], российские мастера по особенностям макроструктуры различают три сорта резонансной древесины ели: струистую, пламенистую и краснослойную. Струистая древе-

сина имеет слегка волнообразный сдвиг древесных волокон. Пламенистая напоминает язычки пламени и отличается красивым узорчатым видом. Она немного уступает струистой. В краснослойной древесине зона поздней части годичного кольца резко отличается своим красным цветом от бледно-желтой ранней части.

Также одним из параметров резонансной ели является плотность. На плотность древесины влияет много факторов. Например, влажность, месторасположение образца в стволе, густота насаждений, различные условия роста дерева и др.

Древесина ели с малой плотностью обладает высокими резонансными свойст-

вами и широко используется в музыкальной промышленности (табл.1).

Диагностика. Прямыми способами диагностики или отбора резонансного материала являются способы, основанные на измерениях его плотности и модуля упругости, скорости ультразвука, потерь энергии на внутреннее трение (диссипации) и декремента колебаний. По результатам измерений можно определить акустические и вязкоупругие характеристики древесины, сделать выводы о возможности применения изучаемого образца древесины для изготовления музыкальных инструментов.

Таблица 1. Примерные свойства чистых (без пороков) образцов древесины резонансной ели при влажности 12 %

Показатель и размерность	Значения
Плотность, кг/м ³	445
Предел прочности вдоль волокон: при сжатии, Мн/м ² (кгс/см ²):	44,5 (445)
при статическом изгибе, Мн/м ² (кгс/см ²):	79,5 (795)
при растяжении, Мн/м ² (кгс/см ²):	103,0(1030)
при скалывании радиальном, Мн/м ² (кгс/см ²):	6,9 (69)
при скалывании тангенциальном, Мн/м ² (кгс/см ²):	6,8 (68)
Ударная вязкость, кдж/м ² (кгс·м/см ²)	39 (0,40)
Твёрдость, торцовая, Мн/м ² (кгс/см ²)	26,0 (260)
Твёрдость, боковая, Мн/м ² (кгс/см ²)	18,0 (180)

Для определения модуля упругости используется формула, выраженная через скорость звука [11] у виде формулы

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho_{12}}} \quad (2)$$

где C - скорость звука, м/с; ρ_{12} – плотность древесины при влажности 12 %, кг/м³.

Отсюда модуль упругости [11] будет исчисляться по выражению

$$E = C^2 \cdot \rho_{12}, \quad (3)$$

Для определения скорости звука используется импульсно-звуковой метод, который выражается через формулу [11] в виде отношения

$$C = \frac{l}{\tau} \quad (4)$$

где t - время распространения упругой продольной волны по длине образца l .

Акустическая константа будет вычисляться по формуле [11] вида

$$K = C/\rho \quad (5)$$

Плотность древесины зависит от ее влажности и вычисляется по формуле [11]:

$$c_w = 0,946 \cdot c_{12} \sqrt{\frac{100 + W}{100 + 0,5W}}, \text{ при } W = 0 \dots 30 \% ; \quad (6)$$

$$c_w = 0,823 \cdot c_{12} \cdot (1 + 0,01W), \text{ при } W \text{ свыше } 30 \%$$

где W – влажность древесины, %.

Основной способ определения потери энергии на внутреннее трение древесины заключается в электромагнитном возбуждении продольных или поперечных колебаний. Данный метод определения акустических параметров является разрушающим, так как требует получения строгих размеров образца.

Существует метод «Саппельтон-проба», который применяется не только для определения резонансной древесины, но и для выявления внутренних пороков, стволовых вредителей и санитарного состояния деревьев на корню. Он основывается на акустическом отклике при простукивании материала и требует исключительно тонкого слуха мастера.

Частично разрушающий способ, основанный на методе измерения скорости звука, описан в патенте МарГТУ [9].

Неразрушающий способ. Рассмотрим неразрушающий способ определения

резонансной древесины, основанный на измерении скорости звука. Способ применяется на кряжах из древесины ели, расколотых на радиальные поленья перед выпилкой из последних резонансных дощечек.

Нами был получен новый российский патент [16] на испытание древесины поленьев.

При дискретном перемещении вдоль продольной оси полена 6 (рис.1) вдоль линий 7 и 8 относительно опорной поверхности 1 выполняется как минимум три измерения с использованием одной пары, состоящей из датчика 3 и приемника 4 ультразвуковых колебаний. Датчик и приемник устанавливаются на стойках 2 поперечно продольной оси. Измерения проводятся по краям и в середине вдоль продольной оси полена, что позволяет повысить точность измерений.

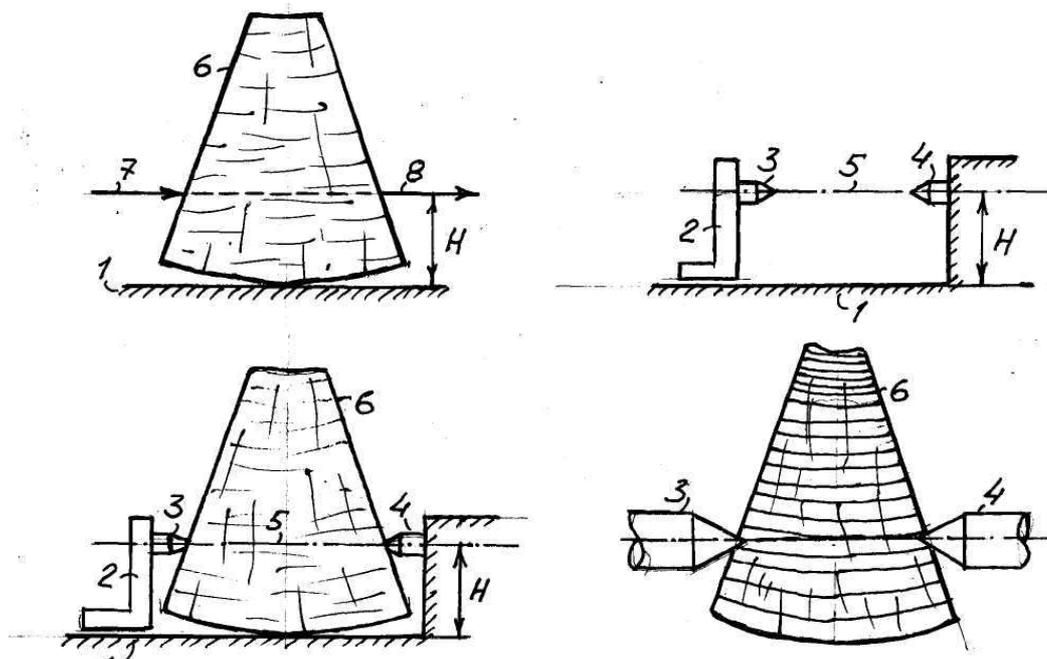


Рис. 1. Схема ультразвукового испытания полена

Для повышения производительности измерений выполняются, по крайней мере, три измерения с использованием трех пар датчиков и приемников ультразвуковых колебаний при неподвижном полене. Измерения проводят по краям и в середине полена с переключением каждой пары датчик- приемник на один ультразвуковой прибор.

Сущность предложенного способа заключается в том, что измерения ультразвуковым прибором проводятся непосредственно на поленья заготовленной резонансной древесины. Причем это производится без разрушения полена, без предварительной механической или иной обработки, что значительно повышает оперативность и снижает трудоемкость испытаний.

Сущность технического решения заключается также в том, что в ходе ультразвуковых испытаний применяются наконечники датчика и приемника конусной формы. Важным является тот факт, что объект измерений при повторных наблюдениях не меняется геометрически. При этом небольшое углубление наконечников датчика и приемника ультразвуковых колебаний в древесину только повышает точность измерений за счет улучшения контакта.

Кроме того, конические наконечники можно ориентировать в зону ранней древесины (много годичных слоев или одногодичного слоя), что повышает точность оценки качества резонансных свойств у древесины полена по значениям скорости ультразвука.

Скорость ультразвука измеряется в тангенциальном направлении годичных слоев. Согласно данным проведенных экспериментов, тангенциальное направление древесины как анизотропного материала, оказывается наименее вариabельным.

По сравнению с радиальным и продольным направлениями волокон, разброс значений скорости ультразвука при повторных измерениях по тангенциальному направлению является наименьшим.

Поэтому при нескольких измерениях вдоль полена (например, ели) получаются значения скорости ультразвука с наименьшим разбросом измеренных значений параметра.

При использовании конусных насадок на датчике и приемнике возникает необходимость в вычислении времени прохождения УЗК в насадках для правильного определения времени прохождения волны в образце.

Общее время прохождения ультразвуковых колебаний состоит из времени прохождения в каждой из конусных насадок (длинной-13,2 см и короткой - 8,2 см) и времени прохождения в образцах. Для сравнения использовались два вида образцов: 1 – оргстекло МД-19-0-1, 2 – деревянный брусок.

Использовалась следующая формула:

$$T_{\text{КД}}^{\text{III}} = T_{\text{БК}} + T_{0\text{К}}^{\text{II}} + T_{0\text{Д}}^{\text{II}} \quad (7)$$

где $T_{\text{КД}}^{\text{III}}$ - время при коротком насадке на излучателе и длинной насадке на приемнике;

$T_{\text{БК}}$ - время прохождения УЗК без конусных насадок;

$T_{0\text{К}}^{\text{II}}$ - время прохождения УЗК в короткой конусной насадке;

$T_{0\text{Д}}^{\text{II}}$ - время прохождения УЗК в длинной конусной насадке.

Так как конусные насадки изготовлены из определенного материала и имеют габаритные размеры, то можно найти время прохождения УЗК в них, по формуле:

$$T_0 = T_{\text{К}}^{\text{II}} - T_{\text{БК}}, \quad (8)$$

где T_0 – время прохождения УЗК в конусной насадке;

$T_{\text{К}}^{\text{II}}$ - время прохождения УЗК в образце с конусной насадкой на излучателе;

Результаты испытаний полена представлены в табл. 2.

Разница в показаниях примерно на 1,5 мкс происходит из-за углубления конусных насадок в образец из древесины. Делая выводы из выше сказанного, можно

принять поправочный коэффициент, равный времени прохождения УЗК в конусных насадках.

Следовательно, для получения времени прохождения УЗК в любом образце можно вычислить по формуле:

$$T_{БК} = T_{КД}^{III} - (T_{0К}^{II} + T_{0Д}^{II}) \quad (9)$$

где $T_{0К}^{II}$ и $T_{0Д}^{II}$ можно взять в табл. 2.

Таблица 2. Показания времени прохождения УЗК в конусных насадках, мкс

Насадки	МД-19-0-1	Древесина	Разница
Излучатель короткий	15,55	17,43	1,88
Приемник короткий	15,84	17,40	1,56
Излучатель длинный	24,31	26,28	1,95
Приемник длинный	24,19	25,28	1,09

Предлагаемое техническое решение по патенту [16] обладает существенными отличиями, новизной и положительным эффектом.

Такие исследования проводятся впервые и приоритет очевиден по предыдущим заявкам коллектива авторов на предполагаемые изобретения по способам ультразвукового испытания древесины. Предлагаемый способ ориентирован для точной сертификации резонансной древесины на поленьях, высушенных долгое время в естественных условиях. Значительный экономический эффект от применения предлагаемого способа будет при сертификации резонансной древесины в виде поленьев, отправляемых на экспорт.

Заключение. На основе предварительных (поисковых) экспериментов можно сформулировать следующие научные выводы и рекомендации производству:

1. предложенный метод испытаний основан на высокой стабильности измеренных значений скорости ультразвука в тангенциальном направлении анизотропии древесины, по сравнению с продольным и радиальным направлениями анизотропии;

2. поленья можно заготавливать из тех частей различных форм и типов чурочков и кряжей, которые могут стать резонансными;

3. предлагаемый способ по нашему патенту позволяет на заводах музыкальных инструментов, у поставщиков резонансной древесины сертифицировать с высокой производительностью поленья, высушенные после расколки резонансных кряжей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алексеев И.А., Полубояринов О.И., Лесное товароведение с основами древесиноведения. – Учебное пособие, Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 457 с.
2. Андреев, Н.Н. О дереве для музыкальных инструментов/ Н.Н. Андреев// Сб. тр./ НИИМП. - М. - Л., 1937. - Вып. 1. - С. 11-18.
3. Артамонов, С.С. Замечания инженера о механизмах звучания инструментов скрипичного семейства/ С.С. Артамонов // Музыкальная академия. - 1996. - №3. - С. 121-124.
4. Витачек Е.Ф. Очерки по истории изготовления смычковых инструментов. – М.:Музыка. – 1964. -341 с.
5. Звездкина Г.О. Разработка акустической теории формирования положительных музыкально-акустических свойств щипковых инструментов //Техническая акустика. - С.-Петербург: Известия Восточноевропейской ассоциации акустиков. - 1992. - Т. 1, вып. 2. - С. 67-72.
6. Нестеров Н.С. О резонансном лесном материале для струнных инструментов // Русское лесное дело. – 1982. – 1. – С.13-16.

7. Нестеров Н.С. О резонансном лесном материале для струнных инструментов // Русское лесное дело. – 1982. – 17. – С.758-772.
8. Нестеров Н.С. О резонансном лесном материале для струнных инструментов // Русское лесное дело. – 1982. – 2. – С.57-62.
9. Пат. 2194385 Российская Федерация, МПК⁷ А 01 G 23/00, G 01 N 33/46. Способ испытания древесины растущих деревьев / Мазуркин П.М., Колесникова А.А. (РФ); заявитель и патентообладатель Марийск. гос. тех. ун-т. - №2001112520/13; заявл. 07.05.01; опубл. 20.12.02, Бюл. № 35.
10. Полубояринов О.И. Плотность древесины. – М.: Лесн. пром-ть, 1976. – 159 с.
11. Уголев Б.Н., Испытания древесины и древесных материалов, М., 1965.
12. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: Учебник для лесотехнических вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп.: - М.: МГУЛ, 2001. – 340с.
13. Федюков В.И. Ель резонансная: отбор на корню, выращивание, сертификация: Научное издание. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 204 с.
14. Федюков В.И. Экспресс-диагностика и отбор резонансной древесины: Учебное пособие. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1995. – 112 с.
15. Шлычков С.В. Анализ механических колебаний гитарной деки // Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук – М., МГТУ им. Н.Э.Баумана, - 2003 – 20 с.
16. Пат. 2334984 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/46 (2006.01). Способ ультразвукового испытания поленьев резонансной древесины/ Мазуркин П.М., Темнова Е.Б. (РФ); заявитель и патентообладатель Марийск. гос. тех. ун-т. - №2006126506/12; заяв. 20.07.2006; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27. 0.65 п.л.

Статья опубликована при поддержке гранта 3.2.3/4603 МОН РФ

APPLICATION OF ULTRASOUND IN DEFINITION RESONANT PROPERTIES OF WOOD OF LOGS

Temnova E.B.

*Mari state technical university,
Yoshcar-Ola, Russia*

Results of search experiments on application of not destroying way of certification of resonant wood of fur-trees on the logs, based on measurement of speed of a sound across a log are submitted.

Key words: logs ate, resonant properties, parameters of ultrasound.