

5. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: Монография. – г. Брест; издательство БГТУ, 2003. – 252 с.
6. Никитин В.И. Моделирование и вычислительный эксперимент в строительно-технологических задачах: Учебное пособие. – Брест: БГТУ, 2001. – 167 с.
7. Никитин В.И., Болтрык М., Бацкель-Бжозовска Б. Влияние режимов обжига, содержания добавки песка и его грансостава на физико-механические свойства стеновой керамики//Вестник БГТУ. Строительство и архитектура.– 2003. №1.–с.56-61.
8. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с., ил.
9. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.:ДизайнПРО, 1997. – 640с.: ил.

УДК 624.05

**Найчук А.Я., Драган В.И., Петрукович А.Н.**

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ НА ДКБ-ОБРАЗЦАХ

С учётом того, что значительное число деревянных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых на сегодняшний день, имеют те или иные дефекты и повреждения, наличие которых в ряде случаев ставит под угрозу саму возможность дальнейшей безопасной эксплуатации подобных конструкций, остро встаёт вопрос оценки их несущей способности. Действительную несущую способность деревянных строительных конструкций с повреждениями и (или) дефектами можно определить с использованием механики разрушения на основании определения характеристик трещиностойкости материала (вязкости разрушения), которые характеризуют способность материала сопротивляться возникновению и распространению трещин. Одним из способов определения характеристик трещиностойкости являются экспериментальные исследования. Данная статья посвящена вопросу экспериментального определения вязкости разрушения  $K_{IC}$  для трещин нормального отрыва (разрушение тип I). [1]

В настоящее время разработано множество методов по определению вязкости разрушения изотропных материалов [2]. На основании значительного числа экспериментальных исследований и численного моделирования составлены таблицы значений коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для различных видов разрушения с учетом возможных вариаций параметров дефектов [3, 4]. Применение таких методов к изучению свойств анизотропных материалов требует ряда дополнительных уточнений и проверки.

При кратковременном действии статической нагрузки одним из эффективных методов определения вязкости разрушения древесины является метод калибровки податливости [5]. Данный метод основан на определении величины высвобождения упругой энергии на единицу приращения площади поверхности трещины  $A$  при её продвижении. В основу этого метода положена модель Гриффитса [2]. Правомерность применения этой модели подтверждается упругой работой древесины при растяжении поперёк и скалывании вдоль волокон вплоть до разрушения [6].

Согласно этому методу, скорость (интенсивность) высвобождения упругой энергии определяется уравнением

$$G = \frac{F_{max}^2}{2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial A}, \quad (1)$$

где  $F_{max}$  – нагрузка, соответствующая началу роста трещины;  $\lambda$  – податливость образца;  $\partial \lambda / \partial A$  – скорость изменения податливости по отношению к изменению площади поверхно-

сти трещины.

Зависимость между интенсивностью высвобождения упругой энергии и коэффициентами интенсивности напряжений определяется уравнением [2]

$$G_i = c_i \cdot K_i^2, \quad (2)$$

где  $c_i$  – коэффициенты, зависящие от упругих характеристик материала.

В случае нормального отрыва (разрушение тип I – растяжение поперёк волокон древесины) согласно зависимостей [2, 7]

$$c1 = \left( \frac{a_{11} \cdot a_{22}}{2} \right)^{1/2} \cdot \left[ \left( \frac{a_{22}}{a_{11}} \right)^{1/2} + \frac{2 \cdot a_{12} + a_{66}}{2 \cdot a_{11}} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $a_{11} = \frac{1}{E_x}$ ;  $a_{22} = \frac{1}{E_y}$ ;  $a_{12} = -\frac{\nu_{xy}}{E_y} = -\frac{\nu_{yx}}{E_x}$ ;

$a_{66} = \frac{1}{G_{xy}}$ ;  $E_x, E_y, E_z$  – модули упругости;  $G_{xy}$  – модуль

сдвига;  $\nu_{yx}, \nu_{xy}$  – коэффициенты поперечной деформации.

Основными допущениями данного метода являются: трещина имеет прямой фронт в вершине, нормальный к поверхности образца; трещина распространяется вдоль своего первоначального направления; упругие характеристики материала постоянны по всему объёму и не изменяются на протяжении всего испытания.

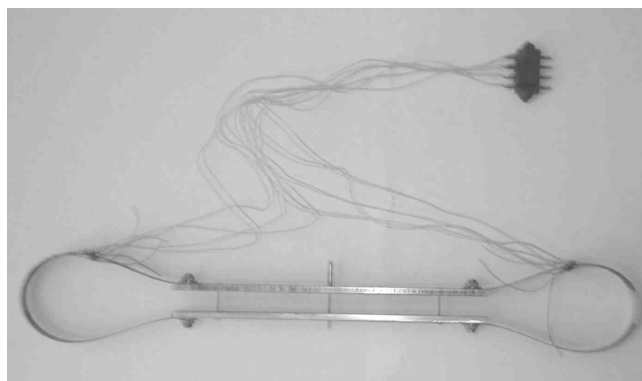


Рис. 1. Упругая скоба с датчиками электрического сопротивления для определения смещений берегов трещины.

**Найчук Анатолий Яковлевич**, к.т.н., директор Республиканского унитарного научно-исследовательского и опытно-конструкторского предприятия "Научно-технический центр".

Беларусь, РУНИиОКП, г. Брест, ул. Московская, 267/2.

**Петрукович Андрей Николаевич**, аспирант каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

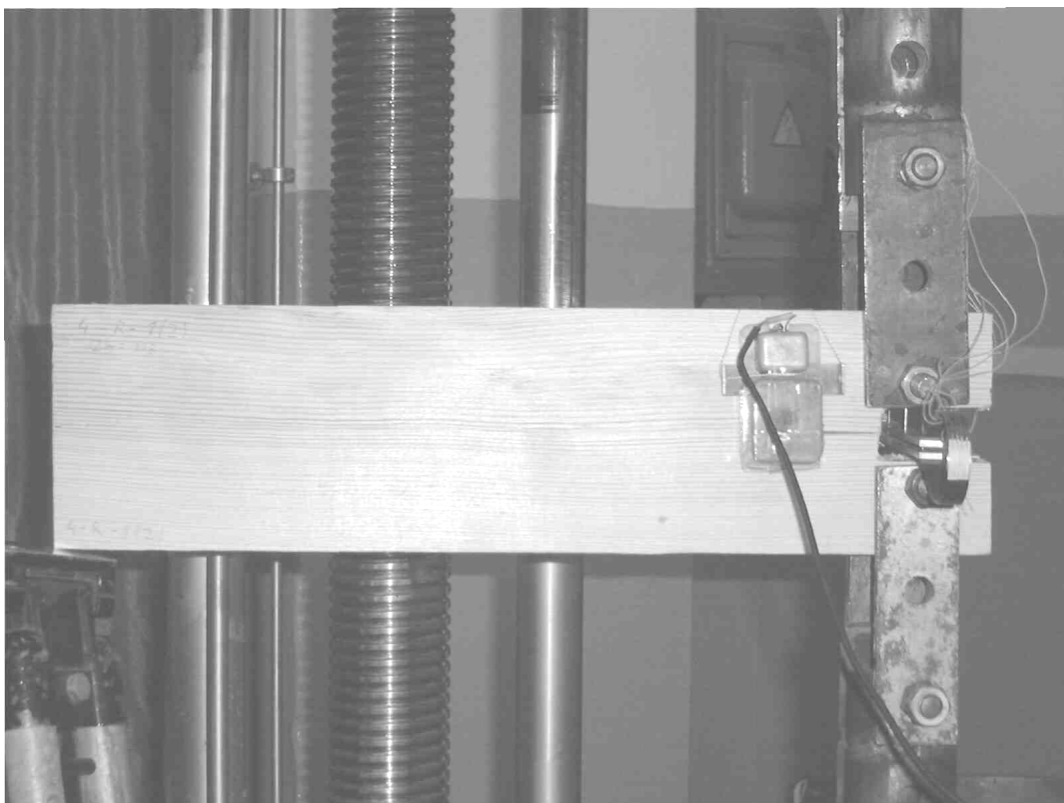


Рис. 2. Нагружение образца в испытательной машине ИР-5145-500-11.

То есть, для определения вязкости разрушения по методу калибровки податливости необходимо произвести испытания образцов и зафиксировать величину нагрузки, соответствующую началу трещины, длину трещины, упругие характеристики материала. Для этих целей должна быть использована соответствующая аппаратура и приспособления.

Для определения величины смятия точек приложения нагрузки трещины использовалась упругая скоба с наклеенными датчиками электрического сопротивления (тензорезисторами). Необходимо, чтобы упругая скоба обладала достаточной для определения указанного смещения трещины с заданной точностью (0,01 мм) чувствительностью, а выходной сигнал был с высокой степенью линейным в зависимости от смещения. Это является особенно важным при расшифровке диаграмм. Кроме того, скоба должна быть сконструирована таким образом, чтобы на протяжении всего времени испытаний обеспечивалась неизменяемость ее положения [5]. Наиболее простой в изготовлении и обладающей достаточной чувствительностью является скоба в виде двух консолей (рис. 1). Принимая во внимание то обстоятельство, что какой бы ни была чувствительность скобы, ее будет недостаточно для регистрации смещений с заданной точностью. Поэтому при проведении испытаний использовался усилитель электрических сигналов "ТОПАЗ-4-01".

В качестве нагружающего устройства использовалась испытательная машина ИР-5145-500-11 (рис. 2), позволяющая проводить испытания с заданной скоростью перемещения захватов (так называемый "жесткий" режим нагружения). Для данных исследований скорость нагружения составляла 0,5 мм в минуту, что позволило получить удобную для анализа диаграмму нагружения в координатах "нагрузка – смещение".

Для определения величины нагрузки использовалась электрическая мостовая измерительная схема. Рабочие датчики сопротивления были наклеены на металлический стержень, передающий усилие с захватов испытательной машины на образец.

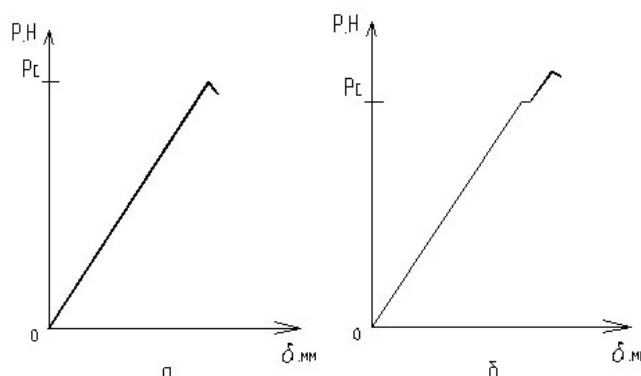


Рис. 3. Типичные диаграммы испытаний образцов в координатах "нагрузка  $P$  – смещение точек приложения нагрузки  $\delta$ ".

Для записи диаграмм использовался двухкоординатный потенциометр самопишущий ПДС-021, на который с усилителя поступали два сигнала. Первый, пропорциональный раскрытию трещины, – на координату "X", второй, пропорциональный усилию, приложенному к образцу, – на координату "Y".

По диаграммам нагружения в координатах "нагрузка – смещение" определяли момент старта трещины. Два возможных вида диаграмм представлены на рис. 3. Самый простой из них представлен на рис. 3, а; здесь почти линейная зависимость означает, что до точки излома имеет место преимущественно линейно упругое поведение материала (что характерно для древесины) при постоянной площади трещины, после чего происходит динамический рост трещины вплоть до момента полного разрушения. Критической для стагивания трещины является нагрузка  $P_c$ , в рассматриваемом случае совпадающая с максимальной. Опытное значение вязкости разрушения равно коэффициенту интенсивности напряжений  $K_I$ , соответствующему нагрузке  $P_c$ . Нагрузка  $P_c$  на диаграмме рис. 3, б, соответствующая горизонтальному участку, счи-

тается критической, и отражает эффект "скачка", или внутреннего роста трещины. Этот эффект возникает тогда, когда сначала трещина инициируется внутри и в процессе ее дальнейшего движения внутри материала происходит "ногтевидное" или "туннелеобразное" растрескивание (одно- или многошаговое), в то время как близкий к поверхности материал остается неповрежденным. Такое поведение материала может быть связано с сильным экранированием процесса разделения тела диссипативными процессами [1]. Особенно ярко этот эффект проявляется при разрушении такого материала как древесина, что объясняется сложной волокнистой структурой древесины.

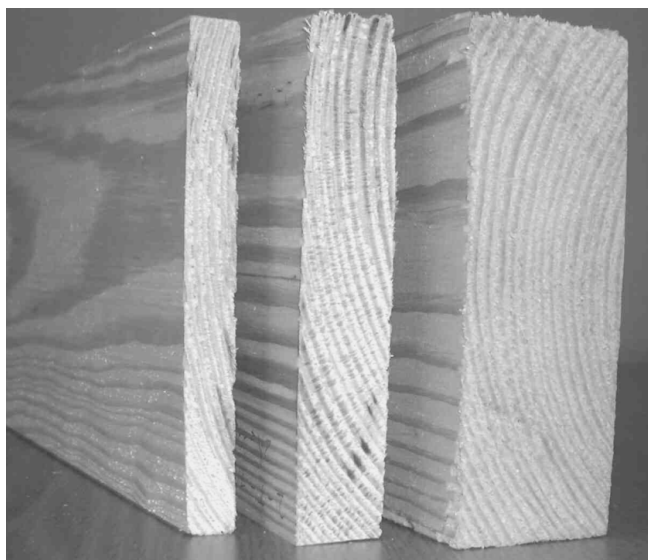


Рис. 4. ДКБ-образцы толщиной 10, 20 и 40 мм.

Для определения вязкости разрушения древесины были использованы образцы в виде двухконсольной балки (ДКБ-образцы), которые используют для определения трещиностойкости различных материалов [8]. Их преимущества в сравнении с другими типами образцов для определения вязкости разрушения материала  $K_{IC}$  при разрушении тип I (нормальный отрыв) очевидны. Испытания таких образцов позволяют определять параметры разрушения на стадии старта, движения и остановки трещины, а также многократно проводить испытания одного и того же образца. В сочетании с невысокой постоянной скоростью нагружения, использование подобных образцов дает возможность экспериментатору контролировать и наблюдать за стартом и ростом трещины. Из положительных качеств данного типа образцов следует отметить сравнительно невысокие значения критических нагрузок (максимальное значение достигало 1244,6 Н) и большие перемещения (до 2,885 мм), что облегчает контроль за ростом трещины и уменьшает погрешность измерений.

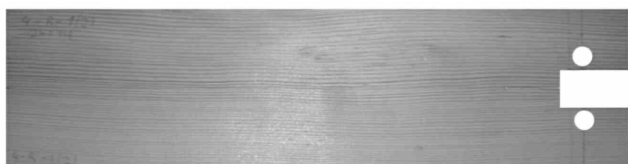


Рис. 5. Общий вид ДКБ-образца из древесины.

Целесообразность использования ДКБ-образцов обоснована рядом исследований, посвященных оценке трещиностойкости различных, главным образом, хрупких, материалов [9, 10]. Г.С. Волков предложил выполнять пазы на боковых поверхностях ДКБ-образцов по линии продвижения трещины для обеспечения ее распространения в первоначальном направлении.

Однако в случае исследования трещиностойкости древесины нет необходимости в выполнении таких пазов, так как трещина распространяется вдоль волокон. Используемые в настоящем исследовании образцы (рис. 5) изготовлены таким образом, что стартовавшая и подросшая на небольшую (до 0,2h) длину трещина распространяется в первоначальном (искусственно созданном) направлении. То есть – вдоль волокон.

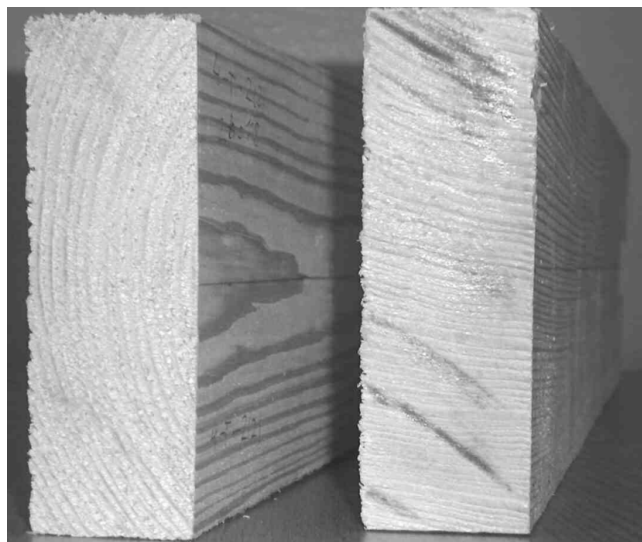


Рис. 6. ДКБ-образцы с радиальной и тангентальной распиловкой древесины.

Для определения вязкости разрушения  $K_{IC}$  использованы образцы различной толщины: 10, 20 40 и 60 мм (рис. 4). Также одним из варьируемых параметров является распиловка древесины. В исследовании использованы образцы с тангентальной, радиальной и смешанной распиловкой (рис. 6). Это позволяет определять  $K_{IC}$  при различном угле наклона годичных колец по отношению к плоскости трещины.

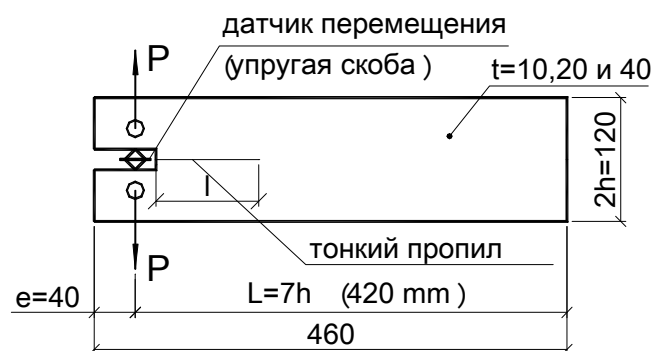


Рис. 7. Геометрические параметры ДКБ-образца для определения  $K_{IC}$ .

Одним из основных этапов является установление геометрических параметров образцов и трещин. Это связано с необходимостью получения достоверных экспериментальных данных, позволяющих определить такую физико-механическую характеристику древесины как вязкость разрушения.

Ю.А. Кашталян и другие исследователи выполнили ряд расчетов, на основании которых сделали вывод о том, что наиболее удобные для инженерных расчетов КИН зависимости могут быть получены практически (экспериментально) на образцах, для которых  $l/h \geq 1,2$  [9]. А полученные ими зависимости справедливы для соотношений  $2 \leq l/h \leq 10$ .

Для установления геометрических параметров ДКБ-образца, позволяющих получить объективные эксперимен-

тальные данные и в то же время обеспечивающих рациональный расход материала и удобство при проведении экспериментальных исследований, был выполнен численный расчет ДКБ-образцов по методу конечных элементов (МКЭ) с использованием ЭВМ. С учетом результатов расчета по МКЭ была изготовлена пробная серия образцов, по результатам испытаний которых были приняты геометрические параметры, указанные на рис. 7. Общая длина образца от точки приложения нагрузки до его грани была принята равной  $7h$ . Длина пропила принималась кратной полувысоте образца  $h$  (высоте консоли), и была равна  $1h - 5,5h$ , с шагом  $0,5h$ , а в некоторых случаях –  $0,25h$ .

Таким образом, использование ДКБ – образцов для определения вязкости разрушения древесины является целесообразным ввиду возможности проведения нескольких нагружений одного и того же образца с различной длиной трещины. Это позволяет установить значение характеристики разрушения, избегая погрешностей, обусловленных возможным различием свойств древесины в разных образцах.

Для достаточно полной оценки величины трещиностойкости древесины с учетом значительной неоднородности ее структуры и анизотропии свойств необходим комплекс исследований образцов с различной ориентацией трещины по отношению к годичным кольцам. Это возможно лишь при условии тщательного отбора материала для изготовления образцов и проведения испытаний.

Испытание образцов осуществляется на разрывных машинах, обеспечивающих жесткий режим нагружения, то есть с постоянной скоростью перемещения захватов. Это дает возможность остановить испытание в момент старта трещины.

Характер диаграмм (рис. 3) нагружения указывает на то, что величина раскрытия трещины прямо пропорциональна приложенной нагрузке. Это дает право использовать принци-

пы линейной механики разрушения для определения вязкости разрушения древесины.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хеллан К. Введение в механику разрушения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 364 с., ил.
2. Механика хрупкого разрушения. Г.П. Черепанов – М.: издательство "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1974 – 640 с.
3. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 1 : Пер. с англ./ Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с., ил.
4. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 2 : Пер. с англ./ Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с., ил.
5. Экспериментальные исследования и расчет строительных конструкций: Сборник научных трудов. – М.: ЦНИИ-Промзданий, 1992. – 192 с.
6. Конструкции из дерева и пластмасс. / Под ред. Карлсена Г.Г. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.
7. Разрушение. Разрушение неметаллов и композитных материалов. Том 7. Часть 1. Под ред. Г. Либовица. – М.:
8. ГОСТ 25.506 – 85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определенные характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Издательство стандартов, 1985 – 61 с.
9. Влияние длины трещины и температуры на результаты измерений коэффициента интенсивности напряжений на ДКБ-образцах. Ю.А. Кашталян, В.М. Гороп, И.В. Орыняк. - Проблемы прочности. 1985, №11, с. 46-49. Библ. 11.
10. Г.С. Волков. Методика определения трещиностойкости хрупких материалов на стадии остановки трещины. - Проблемы прочности. 1989, №9, с. 121-124. Библ. 13.

УДК 624.05

*Найчук А.Я., Петрукович А.Н.*

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ПОДАТЛИВОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

Современные конструкционные материалы имеют, как правило, сложное и неоднородное строение. Так, к примеру, стали представляют собой многокомпонентные сплавы, поликристаллические агрегаты с межкристаллическими прослойками и различными зёрнами. Еще более сложны современные композиционные материалы, армированные волокнами или жесткими включениями. На их фоне особым по своей сложно организованной структуре материалов предстает природный композит – древесина. Зависимость механических свойств материала от его структуры проявляется для древесины уже на макроуровне, в то время как для стали подобная зависимость может быть выявлена лишь на микроуровне с учетом технологии изготовления и обработки.

Наличие в древесине чередующихся слоев раннего и позднего роста (годичных колец), отличающихся строением клеток и, как следствие, физико-механическими характеристиками, приводит к условному ее рассмотрению как трансверсально-изотропного тела. В этом случае механическая модель материала обладает круговой симметрией относительно одной из основных осей. Для древесины направление оси поперечной симметрии совпадает с направлением волокон. В плоскости, перпендикулярной направлению волокон, механические свойства различны в тангенциальном и радиальном направлениях.

Полученные на сегодняшний день данные о прочности древесины обнаруживают зависимость прочностных характеристик, в том числе и характеристик трещиностойкости древесины, от формы и размеров образцов, то есть мы располагаем, строго говоря, данными по прочности образцов, а не материала [1]. Для получения устойчивых сравнительных характеристик древесины используются специальные стандартные образцы.

Трещиностойкость древесины так же, как и ее основные прочностные и упругие характеристики, различна для образцов тангенциальной и радиальной распиловки. Этому есть не одно объяснение. Во-первых: трещина в большинстве случаев распространяется вдоль волокон. В некоторых случаях она может перерезать ближайшее волокно, а иногда и не одно, что связано с наличием локальных неоднородностей структуры и видом напряженно-деформированного состояния (рис. 1). Во-вторых: при распространении трещины в тангенциальной плоскости, ее продвижению сопротивляются в основном слои раннего роста древесины, прочность которых гораздо меньше прочности слоев позднего роста. Различие механических свойств слоев раннего и позднего роста древесины связано с тем, что стенки поздних трахеидов толще, чем стенки ранних трахеидов, которые выполняют в растущем дереве проводящую функцию [2]. Такое различие легко заметить на микрофотографии поперечного среза границы годичного кольца (рис. 2).