



## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.017

**В.И. Комаров, Е.С. Носкова, Е.В. Дьякова**

Архангельский государственный технический университет

Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, член международного научного общества EUROMESCH. Имеет более 400 печатных работ в области исследования свойств деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.  
Тел.: (8182) 21-61-82



Носкова Елена Сергеевна родилась в 1977 г., окончила в 2005 г. Архангельский государственный технический университет, стажер-исследователь кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства. Имеет около 10 печатных работ в области исследования свойств деформативности и прочности бумаги и картона.  
Тел.: (8182) 65-00-92



Дьякова Елена Валентиновна родилась в 1977 г., окончила в 1999 г. Архангельский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства. Имеет более 20 печатных работ в области исследования свойств полуфабрикатов для производства тарного картона.  
Тел.: (8182) 65-00-92

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ  
НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА  
ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ СТРУКТУРЫ БУМАГИ  
И КАРТОНА ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ РАСТЯГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ**

Разработана методика получения единой диаграммы механического состояния целлюлозно-бумажных материалов; на примере бумаги для гофрирования показано, что разрушение происходит преимущественно по смешанному механизму, т.е. подтверждена необходимость использования двух критериев разрушения (хрупкого и вязкого).

*Ключевые слова:* механика разрушения, трещиностойкость, двухкритериальная диаграмма механического состояния, хрупкий, вязкий, флютинг.

Волокнистые целлюлозно-бумажные материалы относятся к капиллярно-пористым вязкоупругим телам. В структуре подобных материалов трещины или трещиноподобные дефекты либо присутствуют изначально и являются следствием технологии их получения, либо возникают в процессах переработки или потребления. Для изучения влияния трещиноподобных дефектов (как на микро-, так и на макроуровне) с точки зрения целостности различных материалов используют положения механики разрушения [7].

Теоретические подходы, реализуемые в механике разрушения при оценке качества бумаги и картона, в настоящее время используются недостаточно.

Инициирование и развитие трещин в структуре бумаги или картона под воздействием внешних полей напряжений различного характера рассматривают в качестве первоочередных явлений, вызывающих разрушение этих материалов и во многом обуславливающих эффективность технологий их получения и переработки, а также потребительские свойства готовой продукции [2, 4].

В основе механики разрушения лежат модели разрушения твердых тел, которые можно условно разбить на две группы. Первая связана с исследованием прочности дефектных тел (с трещинами) и основана на понятиях и методах линейной и нелинейной механики разрушения. К ней относятся однофазные модели, в которых элемент среды при разрушении сразу переходит из сплошного состояния в разрушенное. Наиболее известна из этой группы модель Гриффита – Ирвина. Вторая группа связана с поиском объяснений временной зависимости прочности как путем учета молекулярных процессов (физики прочности), так и за счет развития феноменологических теорий (реологии разрушения). К этой группе относятся более сложные двухфазные модели, согласно которым разрушение элемента структуры состоит из двух последовательных фаз: перехода элемента в некоторое промежуточное состояние и окончательное его разрушение.

При анализе условий распространения имеющихся в твердом теле дефектов в механике трещин обычно используют следующие основные подходы: макромеханический, или феноменологический, базирующийся на представлениях механики сплошной среды; микромеханический, учитывающий реальные физические и химические процессы, протекающие в материалах на атомном, молекулярном, надмолекулярном или фазовом уровнях. Одна из главных задач развития теории прочности – объединение этих подходов [1].

Линейная механика разрушения, или механика развития магистральных трещин, рассматривает и описывает хрупкое разрушение, происходящее в результате роста трещины при отсутствии заметных пластических деформаций у ее вершины. При этом закономерности поведения твердого тела с трещиной могут быть проанализированы с помощью коэффициентов интенсивности напряжений.

Модели нелинейной механики разрушения предполагают наличие в структуре материала достаточно развитой пластической зоны перед вершиной трещины. Для обычных сплошных тел «критический» линейный размер пластической зоны у вершины трещины составляет порядка 20 % ее исходной длины. Кроме того, существует некоторая промежуточная область, где линейную и нелинейную механику разрушения можно применять с той или иной степенью приближения.

Использование и развитие основных подходов и критериев линейной и нелинейной механики разрушения применительно к волокнистым целлюлозно-бумажным материалам требует учета того, что данные материалы,

как было отмечено выше, являются пористыми, полидискретными телами и проявляют преимущественно вязкоупругий характер разрушения.

Одно из важнейших свойств, характеризующих устойчивость материала к инициированию и росту трещин как случайно образующихся, так и специально нанесенных – трещиностойкость [5, 3].

С начала 90-х гг. прошлого века трещиностойкость бумаги и картона оценивают в основном с использованием инвариантного интеграла ( $J$ -интеграла), являющегося одним из энергетических критериев роста трещины в нелинейно-упругой области [1, 10]. Адаптированная методика испытаний образцов с искусственно инициированными дефектами (трещинами) и расчета  $J$ -интеграла регламентирована стандартом SCAN-P77:95 [11].

Вместе с тем, имеющиеся данные и учет особенностей структуры и механического состояния бумаги и картона при докритических нагрузках свидетельствуют, что использование только одного критерия разрушения недостаточно [8]. Основанием для данного заключения является ярко выраженная анизотропия структуры бумаги и картона, обусловленная различной степенью ориентации волокон, и вариация композиционного состава этих материалов. Вследствие этого характер разрушения может изменяться от хрупкого к вязкому, но в большинстве случаев остается переходным (квазихрупким)\*. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения изменений структуры волокнистого целлюлозно-бумажного материала по двум критериям с непрерывным переходом из одного в другой, т.е. определения соотношений энергетических затрат на обратимые и необратимые явления деформирования.

В нелинейной механике разрушения применительно к традиционным материалам (металлы, полимеры и др.) хрупкое и вязкое разрушение предложено характеризовать единой диаграммой механического состояния. Ее строят на основе дискретного перехода от одного состояния к другому, но в то же время допускается и непрерывный переход. Процесс деформирования структуры материала в этом случае представляется либо соответствующей зависимостью, либо точкой, отражающей интенсивность напряженного состояния в пространстве напряжений.

---

\*Материал называют идеально хрупким, если при достижении критических условий его элементы, прилегающие к поверхностям трещины, сразу переходят из сплошного состояния в разрушенное. Материал называют нехрупким (вязким), если при его нагружении разрушение элементов, прилегающих к поверхностям трещины, происходит в два этапа. Вначале (при нагрузках, меньше критических) элементы материала переходят из сплошного в некоторое промежуточное состояние, характеризующееся локальным нарушением сплошности (например вследствие множественного растрескивания матрицы и отслаивания ее от наполнителя в волокнистых композиционных материалах). На втором этапе элементы материала при достижении критических условий переходят из промежуточного в полностью разрушенное состояние.

Аналогичный двухкритериальный подход используют для описания состояний материалов ограниченных размеров с трещинами, находящимися под нагрузкой. При этом хрупкое состояние тела с трещиной рассматривают как предельное при достижении критической величины коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ . Вязкое состояние тела без трещины наступает, когда разрушающее напряжение  $\sigma$  (или параметр нагрузки  $P$ ) также достигает предельной величины, равной пределу прочности  $\sigma_p$  [8].

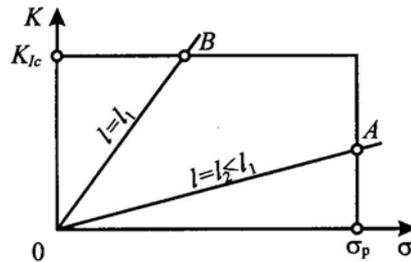


Рис. 1. Двухкритериальная диаграмма механического состояния тела с трещиной

Приведенная на рис. 1 диаграмма иллюстрирует два крайних случая. По оси абсцисс откладывают параметр нагрузки (или номинальное напряжение в полном сечении), по оси ординат – коэффициент интенсивности напряжений  $K$ .

Если выполняется условие хрупкого разрушения, то справедливо уравнение

$$K(\sigma, l)/K_{Ic} = 1, \quad (1)$$

где  $l$  – длина трещины.

Несущая способность образца, определяемая разрушающим напряжением, в данном случае невысока, а пластическая зона в вершине трещины имеет малые размеры.

При уменьшении длины трещины наблюдается рост разрушающего напряжения и увеличение размера пластической зоны. В случае, когда  $l = 0$ , пластическая зона охватывает сечение образца целиком, и разрушение произойдет в условиях общей текучести при напряжении, равном пределу прочности  $\sigma_p$ . Представим критерий разрушения следующим уравнением:

$$\sigma(l)/\sigma_p = 1. \quad (2)$$

Предельная поверхность на диаграмме представляет границу прямоугольника (рис. 1). Если напряженное состояние в образце таково, что характеризующая его точка  $(\sigma, K)$  оказывается внутри построенного прямоугольника, то разрушение не происходит. Попадание на предельную поверхность соответствует предельно равновесному состоянию [6].

Рост  $K$  с увеличением внешней нагрузки при различных длинах трещины ( $l = \text{const}$ ) изображен на рис. 1 лучами, выходящими из начала координат. Угловой коэффициент этих лучей возрастает при увеличении длины трещины  $l$ . При больших длинах трещины линии нагрузки пересекают горизонтальную линию  $K_{Ic}B$  прямоугольника, и разрушение происходит как у хрупких материалов; при малых длинах трещины точка пересечения попадает на вертикальную линию  $\sigma_pA$ , и разрушение становится вязким, происходящим в условиях общей текучести.

В реальных материалах всегда присутствуют смешанные виды разрушения, поэтому предельную поверхность изображают сглаженной кривой (рис. 2).

Следует отметить, что разработка многих теоретических аспектов нелинейной механики разрушения даже применительно к сплошным телам, например металлам и композитам, до настоящего времени не завершена и требуется проведение дальнейших исследований. Еще в большей степени это касается волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Данных об использовании двухкритериальных диаграмм механического поведения бумаги и картона для теоретического анализа их вязкоупругого состояния не обнаружено. Также отсутствуют сведения и о прикладном значении этой методики.

Таким образом, проведение экспериментальных исследований и рассмотрение единых диаграмм механического состояния применительно, прежде всего, к тароупаковочным видам бумаги и картона позволят, с нашей точки зрения, определить условия перехода от хрупкого к вязкому разрушению при различных уровнях нагрузки и в зависимости от других факторов.

В качестве примера рассмотрим двухкритериальные диаграммы механического состояния, полученные для образцов флютинга массой  $112 \text{ г/м}^2$  в машинном (МД) и поперечном (СД) направлениях (рис. 3). Композиция по волокну данного образца состоит из 60 % нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы и 40 % сульфатной целлюлозы высокого выхода.

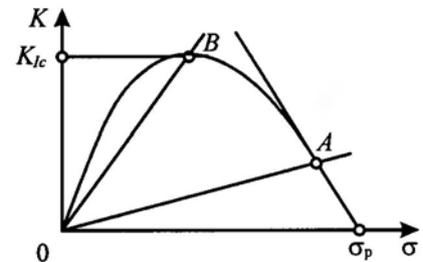


Рис. 2. Рост коэффициентов интенсивности напряжений  $K$  с ростом параметра нагрузки  $P$

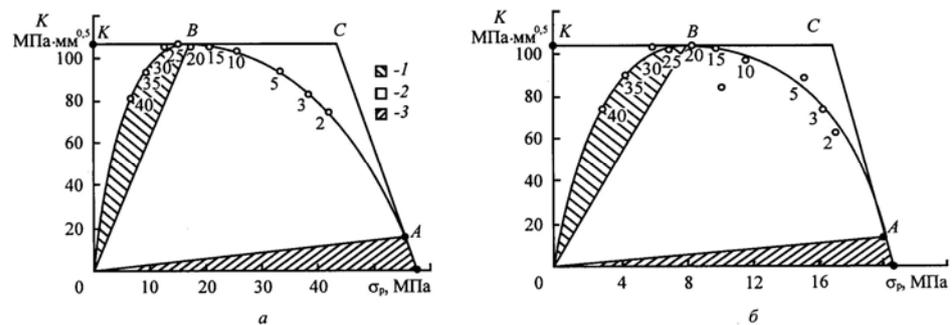


Рис. 3. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений и разрушающего напряжения бумаги для гофрирования от размера центрального надреза:  $a$  – машинное направление;  $b$  – поперечное направление (□ – хрупкое разрушение; □ – смешанное разрушение; □ – вязкое разрушение)

Образцы подвергали одноосному статическому растяжению до разрушения с получением зависимостей «напряжение–деформация» ( $\sigma$ – $\varepsilon$ ). Для моделирования механического поведения флютинга использовали образцы шириной 50 мм с центральным надрезом, длину которого варьировали от 2 до 40 мм. В качестве критерия хрупкого разрушения использовали максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений, рассчитанное по экспериментальным данным с помощью следующего уравнения [9]:

$$K = \sigma \sqrt{\pi l Y}, \quad (3)$$

где  $Y$  – поправочный коэффициент, учитывающий фактор формы дефекта.

Коэффициент  $Y$  для образцов с центральным плоским надрезом можно рассчитать по уравнению Ирвина:

$$Y = \left[ \frac{2b}{\pi l} \left( \operatorname{tg} \frac{\pi l}{2b} + 0,1 \sin \frac{\pi l}{b} \right) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

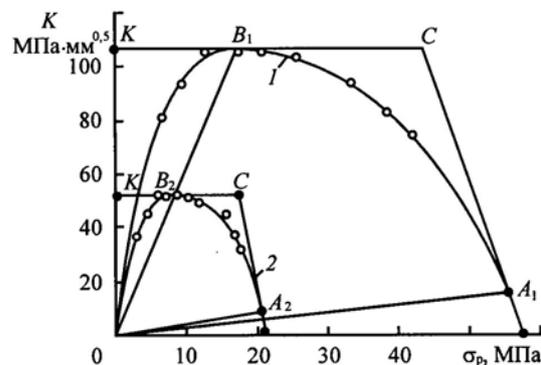
где  $b$  – ширина образца, мм.

Образцы с длиной надреза 1 мм и менее разрушались практически во всех случаях не по месту расположения дефекта. Это позволило предположить, что поведение структуры таких образцов соответствует механизму вязкого разрушения. При этом в качестве критерия вязкого разрушения материала использовали разрушающее напряжение  $\sigma_p$ .

Экспериментальные кривые преобразовывали в диаграммы механического поведения, представленные на рис. 3. Луч  $OB$ , соответствующий границе хрупкого поведения материала, связывает начало координат и максимум экспериментальной кривой. Луч  $OA$ , показывающий границу преимущественно вязкого поведения, проходит через точку, в которой экспериментальная кривая теряет линейность (отклоняется от касательной).

Таким образом, с использованием теоретического и методического подходов нелинейной механики разрушения выделены области перехода от хрупкого к вязкому разрушению. Применительно к исследованным образцам флютинга установлено, что хрупкий механизм разрушения наблюдается при длине центрального надреза более 20 мм (что составляет 40 % от общей ширины образца), вязкий – менее 2 мм. При этом, несмотря на существенные отличия в значениях  $K_{Ic}$  и  $\sigma_p$  для образцов в машинном и поперечном направлениях, границы области перехода от хрупкого разрушения к вязкому очень близки.

Рис. 4. Двухпараметрические диаграммы механического поведения образцов флютинга в машинном (1) и поперечном (2) направлениях



Механизм разрушения	Вклад механизма разрушения в направлении	
	MD	CD
Хрупкий	462/10,5	99/12,3
Вязкий	3490/79,4	640/78,9
Смешанный	442/10,0	72/8,9

Примечание. В числителе приведены данные в абсолютных единицах ( $\text{МПа}^2 \cdot \text{мм}^{0,5}$ ), в знаменателе – в относительных (%).

Использование диаграммы механического поведения позволяет оценить вклад каждого типа разрушения (хрупкого, вязкого и смешанного) в процентах от общей площади под экспериментальной кривой или в условных абсолютных единицах площади соответствующих областей.

При совмещении диаграмм в одной системе координат (рис. 4) обнаружено, что углы наклона лучей  $OB_1$  и  $OB_2$ ,  $OA_1$  и  $OA_2$ , для образцов флютинга в машинном и поперечном направлениях практически совпадают, а соответствующие области подобны.

Из этого следует, что относительный вклад хрупкого, вязкого и смешанного механизмов поведения структуры бумаги при разрушении не зависит от направления приложения нагрузки. Относительная доля хрупкого механизма составляет 10...12 %, вязкого – 8...10 %, смешанного – около 80 % (см. таблицу).

На двухпараметрических диаграммах вклад каждого механизма, выраженный в условных абсолютных единицах площади соответствующих областей, для образцов флютинга в машинном и поперечном направлениях значительно отличается (см. таблицу). Площадь области хрупкого механизма разрушения флютинга в поперечном направлении меньше, чем в машинном в 4,7 раза, вязкого – в 6,1 раза, смешанного – в 5,5 раза.

Расчетные значения вкладов механизмов разрушения, выраженные в условных абсолютных единицах площади соответствующих областей на экспериментальных диаграммах и значения площади под ними в целом можно рассматривать в качестве количественного двухпараметрического критерия разрушения.

Таким образом, показано, что методика построения и анализа двухкритериальных диаграмм механического поведения материала может быть использована для оценки свойств бумаги и картона. На примере бумаги для гофрирования установлено, что ее разрушение происходит преимущественно по смешанному механизму, следовательно, необходимо использовать два критерия разрушения – хрупкого и вязкого. Вместе с тем, необходимо дополнительно исследовать другие виды бумаги и картона с различными типами и размерами дефектов, а также оценить влияние основных технологических факторов на механизм разрушения целлюлозно-бумажных материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаевский, П.Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций [Текст] / П.Г. Бабаевский, С.Г. Кулик. – М.: Химия, 1991. – 336 с.

2. Дьякова, Е.В. Устойчивость к инициированию и росту трещин в структуре целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / Е.В. Дьякова, В.И. Комаров, Е.С. Носкова // Лесн. журн. – 2007. – № 1. – С.125–140. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Комаров, В.И. Вязкоупругость целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / В.И. Комаров // Лесн. журн. – 1997. – № 6. – С. 25–44. – (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Комаров, В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / В.И. Комаров. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. – 440 с.
5. Комаров, В.И.  $J$ -интеграл – характеристика структуры целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / В.И. Комаров // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 1997. – № 5.6. – С. 26–29.
6. Основы экспериментальной механики разрушения [Текст] / И.М. Керштейн [и др.] – М.: Изд-во МУ, 1989. – 140 с.
7. Пестриков, В.М. Механика разрушения на базе компьютерных технологий [Текст]: практикум / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 464 с.
8. Пестриков, В.М. Механика разрушения твердых тел [Текст]: курс лекций / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.
9. Irwin, G.R. – In: Handbuch der Physik. Berlin, Springer, 1958. – Bd. 6. – S. 551–590.
10. Niskanen, K. Papermaking Science and Technology. Paper Physics [Text]: book 16/K. Niskanen. – Printed by Gummerus Printing, Jyvaskyla, Finland 1998. – 324 p.
11. SCAN-P77:95. Papers and Boards. Fracture Toughness. Scandinavian pulp, paper and board. Testing Committee [Text]. – 8 p.

Поступила 25.12.08

*V.I. Komarov, E.S. Noskova, E.V. Djakova*  
Arkhangelsk State Technical University

### **Theoretical Aspects Use of Non-linear Destruction Mechanics for Analysis of Viscoelastic Behavior of Paper and Cardboard Structure when Applying Tensile Load**

The technique of producing common diagram for mechanical state of pulp-and-paper materials is developed. Taking paper for corrugation as an example it is shown that destruction takes place mainly according to mixed mechanism, i.e. the necessity of using two destruction criteria (fragile and viscous) is confirmed.

Keywords: destruction mechanics, fracture strength, double criterion diagram of mechanical state, fragile, viscous, fluting.

---