

УДК 676.017

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

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.



Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет более 300 печатных работ в области исследования свойств деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.



Носкова Елена Сергеевна родилась в 1977 г., окончила в 2005 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства. Имеет 1 печатную работу в области исследования свойств деформативности и прочности бумаги и картона.



УСТОЙЧИВОСТЬ К ИНИЦИИРОВАНИЮ И РОСТУ ТРЕЩИН В СТРУКТУРЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Показана возможность использования энергетической характеристики (J -интеграл) для оценки качества бумаги и картона; приведена методика испытания и процедура расчета величины J -интеграла для целлюлозно-бумажных материалов. Установлено влияние различных технологических факторов на трещиностойкость тарного картона.

Ключевые слова: механика разрушения, трещиностойкость, вязкость разрушения, коэффициент Пуассона, анизотропия, картон-лайнер

Для оценки качества полимерных и композитных материалов широко используют методы механики разрушения. Основополагающие постулаты механики разрушения гласят, что твердые тела всегда имеют дефекты

структуры, служащие источниками трещин, и разрушение этих тел является процессом развития трещин под действием приложенных нагрузок. Преимуществом механики разрушения перед традиционными методами оценки качества материала является использование количественных обобщенных критериев, связывающих критическое напряжение разрушения с длиной трещины, т.е. с дефектом структуры, обуславливающим разрушение [1].

Применение теории механики разрушения к бумаге и бумажным структурам вызывает интерес практиков. Это напрямую связано с проблемами обрывов при прохождении бумажного полотна через транспортную систему печатных и копировальных устройств, обрывов на КДМ и дефектов растрескивания наружных плоских слоев гофрированного картона при рилевке и фальцовке, наполнения и транспортирования бумажных мешков и т.д.

Структура бумаги, как и любого другого материала, содержит дефекты, которые являются причиной снижения разрушающего напряжения. В первом приближении к дефектам можно отнести трещины кромки полотна, складки кромки полотна, костру и узелки волокон в структуре, которые вызывают возникновение трещиноподобных дефектов при натяжении полотна бумаги в процессах прессования, сушки и каландрирования.

Одно из важнейших свойств материала в соответствии с положением механики разрушения – трещиностойкость, т.е. устойчивость к инициированию и росту трещин, случайно образующихся или специально нанесенных [8, 9].

Раскрытие и рост трещин происходит по одному из трех типов (рис. 1). При нормальных напряжениях возникает трещина типа I (отрыв), перемещение ее берегов (краев) происходит перпендикулярно плоскости трещины; при плоском сдвиге – трещина типа II (сдвиг), перемещение ее берегов происходит в плоскости трещины и перпендикулярно ее фронталь-

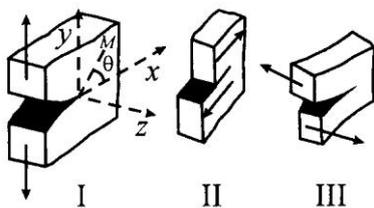


Рис. 1. Типы разрушения при различных видах напряженного состояния: I – нормальный отрыв при растяжении; II – скол при продольном сдвиге; III – раздир при поперечном сдвиге

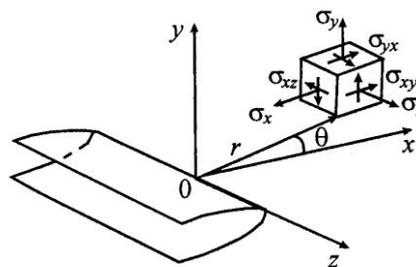


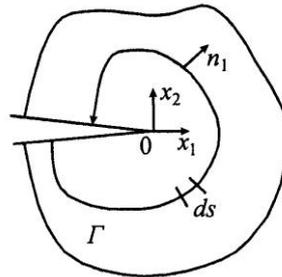
Рис. 2. Система координат и компонента напряжений у вершины трещины

ной линии; при антиплоском сдвиге – трещина типа III (срез или раздир), перемещение ее берегов совпадает с плоскостью трещины и параллельно ее направляющей кромке [3]. Система координат, принимаемая при рассмотрении роста трещины, представлена на рис. 2.

Для оценки процесса раскрытия трещины в структуре бумаги в работах [15, 17, 26], опубликованных в 1960–1979 гг., предложено использовать положения линейной упругой механики разрушения. Однако позднее было показано [21], что для практического применения этих положений размер образцов должен быть очень большим. Авторы [20] пришли к заключению, что при испытании на растяжение на краю образующейся в бумаге трещины имеют место пластические деформации, и сделали вывод – для оценки структуры бумаги, в которой образуются трещины вне линейно-упругой области, лучше использовать энергетическую характеристику – J -интеграл.

Параметр J – не зависящий от пути контурный интеграл [14]. Он представляет собой обобщенную энергетическую характеристику, оценивающую поток энергии через произвольный замкнутый контур, окружающий вершину трещины (рис. 3).

Рис. 3. Определение поведения траектории для определения J -интеграла



J -интеграл определяется выражением

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds \right),$$

где Γ – произвольный замкнутый контур, окружающий вершину надреза (трещины), вдоль которого осуществляется интегрирование в направлении против часовой стрелки;

W – энергия деформации единицы объема материала;

\vec{T} – вектор напряжений, действующих на границе области, ограниченной контуром Γ , $T_i = \sigma_{ij} n_j$;

σ_{ij} – компоненты напряжений;

n_i – внешняя нормаль к контуру Γ ;

\vec{u} – вектор перемещений на контуре Γ ;

ds – малый элемент контура Γ .

Энергию деформации единицы объема материала рассчитывают по уравнению:

$$W = W(x, y) = W(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} .$$

Целлюлозно-бумажные материалы, как и большинство реальных материалов, являются вязкоупругими. Для качественного и количественного описания такого материала пользуются механическими моделями, составленными путем различного комбинирования идеально упругого и вязкого элемента. Таким образом, $J_1 = J_1^{уп} + J_1^{вп}$. Пластический компонент $J_1^{вп}$ не принимают в расчет при низких нагрузках, но его вклад в разрушение при высоких нагрузках является доминирующим [28].

В механике разрушения показано [1], что трещина получает возможность распространяться в том случае, когда параметр J достигнет или превысит критическую величину J_C :

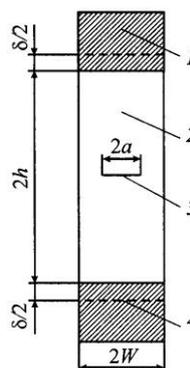
$$J \geq J_C .$$

Левая часть этого неравенства определяется численными методами, чаще с помощью метода конечных элементов. В методе конечных элементов сплошное тело, имеющее бесконечное число степеней свободы, разбивают на элементы ограниченной протяженности и, используя характеристики отдельных элементов, описывают поведение системы в целом [14].

Правая часть неравенства – основная характеристика трещиностойкости, которая определяется экспериментально. В настоящее время существуют стандартные методики проведения испытаний, к которым можно отнести испытания на компактное напряженное состояние и на трещиностойкость при трехточечном изгибе. Однако следует иметь в виду, что эти стандартные методики разработаны лишь для металлов и сплавов [19].

Растущий интерес у производителей бумаги и картона к показателю трещиностойкости как характеристике качества структуры целлюлозно-бумажных материалов привел к разработке фирмой «Lorentzen & Wettre» прибора для определения J_{IC} [25].

Рис. 4. Образец для испытаний на трещиностойкость: 1 – участок образца, закрепляемый в зажиме разрывной машины; 2 – участок образца, подвергаемый нагружению; 3 – надрез; 4 – удлинение образца при испытании



В 1995 г. в скандинавских странах введен в действие стандарт SCAN-P77:95, в котором приведена методика испытаний и процедура расчета величины J -интеграла [24]. На кафедре технологии ЦБП АГТУ в лабора-

тории физики бумаги разработан алгоритм расчета характеристик вязкости разрушения по данному стандарту [16].

В стандарте на определение трещиностойкости бумаги и картона приняты следующие определения: *трещиностойкость* J_{IC}^b – прирост совершенной работы на прирост длины надреза в испытуемом образце, содержащем надрез, когда испытуемый образец растягивается до удлинения, равного критическому; *индекс трещиностойкости* J_{IC}^w – трещиностойкость, отнесенная к массе 1 м^2 ; *удлинение* δ – увеличение длины испытуемого образца; *критическое удлинение* δ_c – удлинение при максимальной силе, т.е. деформация разрушения.

Для определения трещиностойкости бумаги и картона проводят две серии испытаний на растяжение с постоянной скоростью 100 мм/мин и при расстоянии между зажимами разрывной машины 100 мм . В первой серии испытывают образцы шириной 15 мм , во второй – шириной 50 мм с надрезом в центре длиной 20 мм перпендикулярно продольной оси образца (рис. 4).

Затем устанавливают связь между величиной J -интеграла и удлинением. По экспериментальным данным испытаний на трещиностойкость находят критическое удлинение. Трещиностойкость определяется как величина J -интеграла при среднем критическом удлинении (рис. 5).

По результатам испытаний на растяжение образцов шириной 15 мм , вырезанных в машинном (MD) и поперечном машинном (CD)

Рис. 5. Определение величины J -интеграла при среднем критическом удлинении δ_c

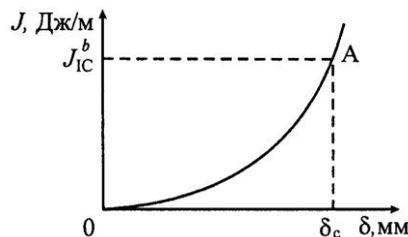


Рис. 6. Принцип вычисления величин характеристик при испытании на растяжение: δ_N – номинальное удлинение; c – максимальный наклон касательной; $\bar{\delta}_T$ – среднее удлинение при разрыве (4 – отброшенная кривая)



направлениях, из производственного материала или из лабораторных отливок, строят типичную среднюю кривую «нагрузка – удлинение», по которой рассчитывают параметры материала.

На рис. 6 показан принцип расчета параметров материала на основании экспериментальных данных на растяжение. Перед построением средней

кривой отбрасывают выпадающие кривые (кривая 4), которые имеют удлинение при разрыве меньше, чем 90 % среднего удлинения. Все расчеты выполняют при нулевом удлинении каждой кривой, т. е. в точке, где касательная к кривой с наклоном, равным максимальному, пересекает ось удлинения δ . Для оставшихся кривых определяют минимальное (номинальное) удлинение δ_N (кривая 1), рассчитывают среднее удлинение при разрыве $\bar{\delta}_T$. Номинальное усилие F_N определяют по средней кривой как усилие при номинальном удлинении δ_N . Кроме того, для средней кривой определяют максимальный наклон c путем проведения прямой линейной регрессии по ряду величин «сила – удлинение» с шагом увеличения удлинения 0,1 мм. Линейная регрессия должна содержать, по крайней мере, 10 значений «сила – удлинение».

Далее рассчитывают работу удлинения, определяемую как площадь U под кривой от нулевого δ_0 до номинального $\square \delta_N$ удлинения:

$$U = \int_0^{\delta_N} F(\delta) d\delta,$$

и переходят к расчету параметров материала:

$$p = \frac{F_N \left(\frac{F_N}{c} - \delta_N \right)}{U - F_N \delta_N + \frac{F_N^2}{2c}} - 1; \quad k = \frac{\delta_N - \frac{F_N}{c}}{\left(\frac{F_N}{c} \right)^p}.$$

Степень анизотропии для жесткости при растяжении $A(E)$ находят по уравнению

$$A(E) = \frac{E_{MD}^b}{E_{CD}^b}.$$

Рассчитывают параметр α при испытании образцов материала в машинном и поперечном машинном направлениях:

$$\alpha_{MD} = 0,293 \sqrt{\frac{1}{A(E)}}; \quad \alpha_{CD} = 0,293 \sqrt{A(E)}.$$

Для лабораторных отливок $\alpha = 0,293$.

Параметр материала Φ определяют согласно уравнению

$$\Phi = \frac{kl^{p-1} (2 - \alpha) (\alpha^2 - \alpha + 1)^{\frac{p-1}{2}}}{2 \cdot 0,914^p}.$$

Безразмерные функции f_1 и f_2 рассчитывают по уравнениям

$$f_1 = 0,5617 \left(\frac{E_1^b}{E_2^b} \right)^{-0,19}; \quad f_2 = 0,5 + 0,512 \operatorname{tgh}(0,206 p).$$

В дальнейших расчетах используют результаты испытаний образцов с надрезами. Для каждого испытуемого образца регистрируют кривую «на-

грузка – удлинение» (рис. 7), по которой определяют нулевое δ_0 и критическое δ_c удлинение.

Для каждого испытуемого образца рассчитывают критическое напряжение σ_c^b путем решения следующего уравнения:

$$\frac{\delta_c}{2} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_2^b} \sigma_c^b h + \Phi h \left(\frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_2^b} \sigma_c^b \right)^p,$$

где $\nu_{12}\nu_{21} = 0,293^2$ – произведение коэффициентов Пуассона в машинном и поперечном машинному направлениях.

Рассчитывают параметр β по уравнению

$$\beta = \frac{h(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{E_2^b} \sigma_c^b$$

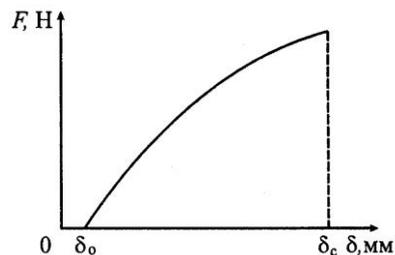
и его среднюю величину $\bar{\beta}$.

Относительное напряжение σ_0^b находят как

$$\sigma_0^b = \varepsilon_0 \frac{E_2^b}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})},$$

где ε_0 – относительная деформация для бумаги, принимают $\varepsilon_0 = 0,003$.

Рис. 7. Кривая нагрузка – удлинение для образца, испытываемого на трещиностойкость



Далее рассчитывают трещиностойкость

$$J_{IC}^b = \frac{\bar{\beta}^2 E_2^b}{h(1 - \nu_{12}\nu_{21})} f_1 + \frac{2ph}{p+1} \Phi \sigma_0^b \varepsilon_0^p \left(\frac{\bar{\beta}}{\varepsilon_0 h} \right)^{p+1} f_2$$

и индекс трещиностойкости (Дж·м/кг):

$$J_{IC}^w = \frac{1000 J_{IC}^b}{w}.$$

Расчеты с использованием вышеприведенного алгоритма выполняют на ЭВМ. Результаты вычислений могут быть распечатаны на принтере или выведены в файл в формате *rtf*.

Ошибка в определении трещиностойкости складывается из ошибки определения средней кривой нагрузка – удлинение и ошибки критического удлинения. Принимают, что ошибка кривой $F - \delta$ незначительна. Ошибку трещиностойкости определяют следующим образом:

1) приблизительно рассчитывают изменение трещиностойкости по уравнению

$$V_J = 4 \left(\frac{\bar{\beta} E_2^b}{h(1 - \nu_{12}\nu_{21})} f_1 + \frac{ph}{\bar{\beta}} \Phi \sigma_0^b(\varepsilon_0)^p \left(\frac{\bar{\beta}}{\varepsilon_0 h} \right)^{p+1} f_2 \right)^2 V_\beta;$$

2) рассчитывают коэффициент вариации трещиностойкости (%) по уравнению

$$CV_J = 100 \frac{\sqrt{V_J}}{J_{IC}}.$$

В обсуждаемой выше методике большим приближением является принятие величины коэффициента Пуассона для всех видов испытуемых материалов равным 0,293. В работе [7] предложена методика, позволяющая рассчитывать коэффициент Пуассона для полимерных материалов. В работе [11] показана возможность использования данной методики при испытаниях на растяжение целлюлозно-бумажных материалов.

Известно, что под воздействием одноосного растяжения при разрушении полимерного материала одновременно происходят крейзование и образование полосы сдвига [2]. При деформировании целлюлозно-бумажных материалов наблюдается и пластическая деформация, которая, как можно предположить, также определяется этими механизмами разрушения структуры. Поэтому качественная оценка их вкладов в пластическую составляющую деформации, а значит, и в прочность вообще, представляется важной для интерпретации процессов деформации и разрушения.

Исходным уравнением предлагаемой методики является соотношение

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right) / \left(\frac{\Delta L}{L} \right) = 1 - 2\nu, \quad (1)$$

где ΔV – объемная деформация;

V – исходный объем деформируемой части образца;

ΔL – продольная деформация;

L – исходная длина рабочей части образца;

ν – коэффициент Пуассона.

Известно, что левая часть уравнения (1) определяет вклад крейзования в пластическую деформацию образца [2]. Если левая часть равна 1, то единственным механизмом является крейзование ($\nu = 0$), а при ее равенстве нулю вся пластическая деформация обусловлена сдвиговой вынужденной эластичностью ($\nu = 0,5$). При промежуточных значениях соотношение, стоящее в левой части уравнения (1), равно относительной доле крейзования в пластической деформации. Таким образом, это уравнение позволяет однозначно дифференцировать вклады крейзования и сдвиговой вынужденной эластичности при условии известности ν .

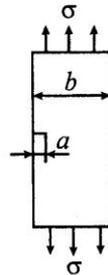
Испытанию подвергают образец с надрезом. По мере увеличения длины надреза a в структуре образца происходит изменение напряженного

состояния: первоначальное плосконапряженное состояние переходит в плоскодеформированное, для которого нормальное напряжение в поперечном направлении не равно 0. Важной характеристикой такого перехода является соотношение a/b , которое в случае полимерного материала равно 0,1. Возрастание a/b вызывает значительное снижение прочности материала (рис. 8).

Плоское напряженное состояние характеризуется тем, что в твердом теле в сечении с трещиной действуют только компоненты напряжений σ_x , σ_y , и σ_{xy} (см. рис. 2), а компоненты напряжений $\sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$, т. е. все компоненты напряжений действуют в одной плоскости (xy). При этом смещение точек твердого тела в области вершины трещины происходит во всех трех направлениях. Следовательно, при плоском напряженном состоянии деформированное состояние твердого тела в окрестностях вершины трещины является объемным.

Плоское деформированное состояние характеризуется тем, что смещение точек твердого тела и вершины трещины происходит только в направлении осей x и y , в направлении оси z оно затруднено, т. е. деформация совершается только в одной плоскости (xy). При этом в области вершины трещины компоненты напряжений действуют во всех трех направлениях,

Рис. 8. Образец для испытаний:
 a – длина надреза, b – ширина образца



т. е. при плоской деформации напряженное состояние является трехмерным (объемным) [10].

Определяем необходимый для дальнейших расчетов коэффициент Пуассона:

$$\frac{\omega_{p1}}{\omega_{p2}} = \left(\frac{1-\nu}{1-2\nu} \right)^2, \quad (2)$$

где ω_{p1} и ω_{p2} – плотности энергии деформации соответственно в плосконапряженном и плоскодеформированном состояниях,

$$\omega_{p1} = \frac{\sigma_1^2}{2E}; \quad \omega_{p2} = \frac{\sigma_2^2}{2E}; \quad (3)$$

σ_1 и σ_2 – напряжение разрушения соответственно при плосконапряженном и плоскодеформированном состояниях;

E – модуль Юнга.

Из уравнений (2), (3) при условии $E = \text{const}$ можно получить зависимость

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \left(\frac{1-\nu}{1-2\nu} \right)^2. \quad (4)$$

Величина $\sigma_2 = \text{const}$ и равна асимптотическим значениям σ_p^a . Тогда, определив σ_p при $a = 0$ (т. е. σ_1), можно по уравнению (4) вычислить ν .

Таким образом, определение величины J -интеграла при испытании целлюлозно-бумажного материала дает возможность получить информацию о размерах трещины, которая вызовет разрушение (при известном типе нагрузки), а также о величине критической нагрузки (если известен размер дефектов), что позволяет корректировать параметры процессов производства. Авторы работы [27] отмечают, что трещиностойкость, т.е. сопротивление материала развитию трещин, является таким же фундаментальным свойством материала, как и модуль упругости.

На кафедре технологии ЦБП АГТУ в течение ряда лет ведется работа по оценке влияния технологических факторов на деформативность и прочность тароупаковочных материалов.

Сравнительные данные трещиностойкости картонов-лайнеров массой 150 г/м^2 четырех крупнейших отечественных производителей представлены в табл. 1 [18].

Трещиностойкость картона сильно зависит от межволоконных сил связи и собственной прочности волокон, используемых в композиции. Известно, что способность вторичных волокон к размолу и образованию межволоконных сил связи ограничена вследствие ороговения их поверхности. Определение собственной прочности волокон (нулевой разрывной длины) показало, что у картона Караваевской бумажной фабрики, производимого из

Таблица 1

Трещиностойкость картона-лайнера

Характеристика	Значение характеристики картона различных производителей			
	АЦБК	КЦБК	КБФ	СЛПК
Трещиностойкость, кДж/м:				
в направлении MD	3290	2230	1750	2960/2880
« CD	970	890	760	1060/1020
Индекс трещиностойкости, кДж/м:				
в направлении MD	21,9	14,9	11,7	19,7/19,2
« CD	6,5	6,0	5,1	7,1/6,8
Коэффициент анизотропии:				
для трещиностойкости	3,39	2,51	2,30	2,79/2,82
для индекса трещиностойкости	3,37	2,48	2,29	2,77/2,82

Примечания. 1. АЦБК – Архангельский ЦБК, КЦБК – Котласский ЦБК, КБФ – Караваевская бумажная фабрика, СЛПК – Сыктывкарский ЛПК. 2. В числи-

теле приведены данные для обычного картона-лайнера, в знаменателе – для картона с белым покровным слоем.

макулатурных волокон, эта характеристика в среднем на 30 % ниже, чем у крафт-лайнера, изготавливаемого на АЦБК. Поэтому находит объяснение тот факт, что самую низкую трещиностойкость как в машинном, так и в поперечном машинному направлении имеет картон, изготовленный из макулатуры (КБФ), самую высокую – из хвойной сульфатной целлюлозы высокого выхода с содержанием лиственной полуцеллюлозы в композиции массы до 20 % (АЦБК).

Сыктывкарский картон в направлении, поперечном машинному, имеет наибольшие значения трещиностойкости, в машинном направлении уступает только картону АЦБК. Определяющей особенностью технологии производства картона на СЛПК является использование в композиции небеленой и беленой сульфатной лиственной и хвойной целлюлозы нормального выхода.

Испытания картонов различных производителей показали, что картон с повышенными характеристиками жесткости должен обладать и соответствующим уровнем трещиностойкости для снижения обрывов на машине, а также во избежание растрескивания в процессах рилевки и биговки. Трещиностойкость картона с различной массой 1 м^2 представлена в табл. 2.

Наиболее простой способ придания гофрокартону требуемой жесткости – увеличение массы 1 м^2 картона для плоских слоев. Однако возможность его использования ограничена, с одной стороны, увеличением расхода полуфабрикатов, а с другой – наличием верхнего предела массы 1 м^2 , который регламентируется затруднениями при рилевании гофрокартона и появлением трещин по линиям рилевки при сгибании [5, 6]. Помимо этого в последнее время наметилась тенденция к производству материала пониженной массы 1 м^2 , в том числе и тарного картона. При этом следует учитывать на-

Таблица 2

Рекомендуемый уровень трещиностойкости для крафт-лайнера

Масса 1 м^2 , г	J_{IC} , кДж/м	
	MD	CD
125	2500...2800	800...900
140	2900...3200	900...1000
150	3000...3300	1000...1200
175	4500...5000	1100...1300
200	5000...5500	1600...1800

Таблица 3

Влияние анизотропии на трещиностойкость крафт-лайнера

Масса 1 м^2 , г	Угол вырезки, град	K	J_{IC} , кДж/м	J_{IC}^w , кДж·м/г
125	MD	3,9	2160	17,28

150	15	2,6	1995	15,96
	30	1,8	1672	13,38
	45	1,1	1165	9,32
	60	0,6	1085	8,68
	75	0,3	904	7,23
	CD	0,3	373	2,99
	MD	3,7	2392	15,95
	15	2,8	3169	21,13
175	30	2,0	2265	15,10
	45	1,0	1974	13,17
	60	0,6	1626	10,85
	75	0,4	1402	9,35
	CD	0,3	447	2,98
	MD	3,5	2499	14,28
	15	2,5	3858	22,05
	30	1,7	2997	17,13
	45	1,0	2227	12,73
	60	0,6	1962	11,22
	75	0,4	1750	10,00
	CD	0,3	495	2,83

грузки, испытываемые гофрированным картоном в процессе эксплуатации. В противном случае снижение массы 1 м^2 может привести к нежелательным воздействиям на упаковываемую продукцию при ее транспортировке и хранении.

Степень анизотропии структуры материала в сильной степени влияет на трещиностойкость. Для оценки влияния анизотропии структуры на трещиностойкость испытывали крафт-лайнер АЦБК массой 1 м^2 : 125, 150 и 175 г. Образцы для испытаний вырезали под разными углами относительно машинного направления полотна (табл. 3)[4].

Коэффициент анизотропии K может быть вычислен как отношение величины характеристики, определенной в заданном направлении (MD или под заданным углом к MD), к величине трансверсальной характеристики по отношению к заданному направлению:

$$K = \frac{Y_i}{Y_{i+90^\circ}},$$

где Y – заданная характеристика;

i – угол по отношению к направлению MD;

$i + 90^\circ$ – направление испытания трансверсального образца.

Данные табл. 3 подтверждают теоретические представления о снижении механических свойств бумаги и картона при увеличении отклонения угла вырезки образцов от машинного направления вне зависимости от массы 1 м^2 .

Известно, что плоские слои гофрированного картона в процессе эксплуатации ящиков подвергаются большим деформациям в поперечном направлении, это объясняется условиями его получения на гофроагрегате. По-

этому производителям картона-лайнера необходимо стремиться к снижению анизотропии материала.

В последнее время в бумажной промышленности наблюдается устойчивая тенденция роста потребления вторичного волокнистого материала (макулатура) для производства гофрокартона. Из работ [22, 23] следует, что вторичный волокнистый материал является крайне неоднородной полидисперсной системой, состоящей из волокон с различной длиной и толщиной, полученных различными способами из различных пород древесины. Предлагается бумажную массу из вторичного материала условно делить на коротковолокнистую и длиноволокнистую фракции.

Длинноволокнистая фракция характеризуется заметно большей средней длиной волокна, низкой степенью помола и потенциально высокими прочностными свойствами. Коротковолокнистая фракция представляет собой обрывки и фрагменты сильноороговевших волокон, которые имеют высокую степень помола, небольшую среднюю длину, недостаточные бумагообразующие свойства и особое свойство – укорочение в процессе размола вследствие повышенной хрупкости. Совместный размол коротко- и длиноволокнистой фракций приводит к еще большему измельчению коротких и недостаточной обработке длинных волокон. Приготовленная таким образом бумажная масса характеризуется невысокими бумагообразующими свойствами, что в первую очередь проявляется в понижении способности к обезвоживанию и образованию межволоконных сил связи. Таким образом, уменьшаются скорость бумагоделательной машины и механическая прочность материала.

Для реализации селективной обработки коротко- и длиноволокнистой фракций вторичного волокна с целью повышения бумагообразующих свойств необходимо фракционирование, т. е. получение двух волокнистых фракций с разными свойствами. После фракционирования коротковолокнист

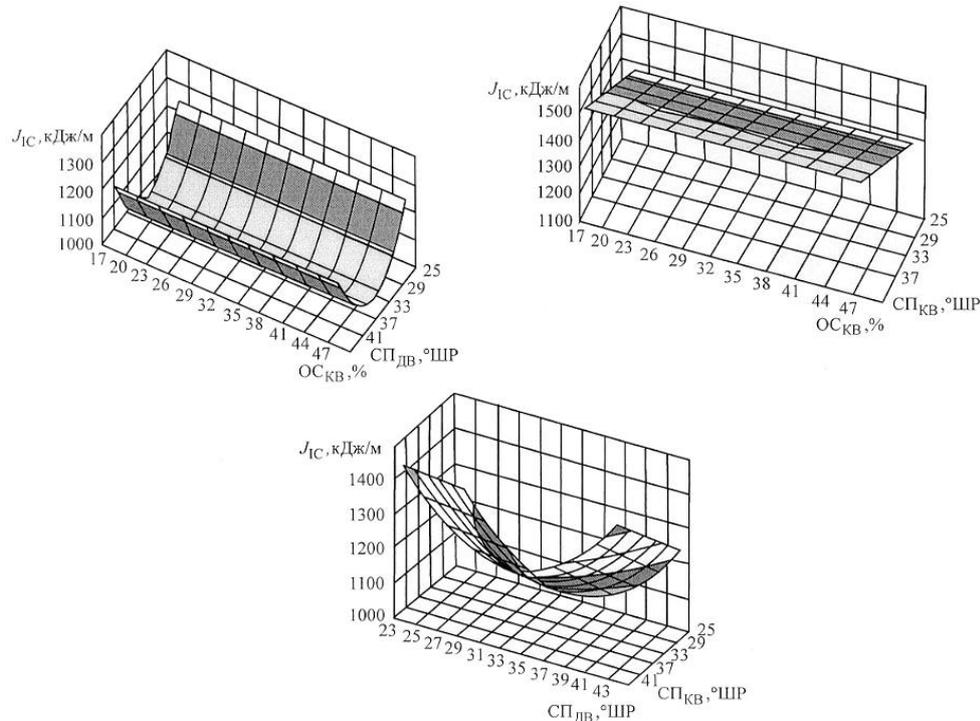


Рис. 9. Влияние параметров процессов фракционирования и размола на трещиностойкость тест-лайнера

тый материал в зависимости от его физической характеристики и технологического назначения либо вообще не подвергают размолу, либо размалывают отдельно. Длинноволокнистая фракция диспергируется и размалывается в целях гомогенизации бумажной массы и повышения ее прочности [13].

На рис. 9 приведены результаты исследования зависимости трещиностойкости тест-лайнера от параметров фракционирования и размола вторичного волокна [12].

Данный эксперимент позволил определить технологические параметры, обеспечивающие получение тест-лайнера с максимально возможной в данной технологии трещиностойкостью $J_{IC} = 1500$ кДж/м: степень помола длиноволокнистой фракции ($SP_{ДВ}$) – 35 °ШР; степень помола коротковолокнистой фракции ($SP_{КВ}$) – 25 °ШР; относительное содержание короткого волокна ($OC_{КВ}$) – 35 %.

Таким образом, контроль трещиностойкости материала позволяет на практике принимать решения об оптимизации технологического процесса: необходимой эффективности сортирования в целях уменьшения размеров типичных дефектов, относительном содержании в структуре длиноволокнистого полуфабриката или длиноволокнистой фракции для нивелирования воздействия дефектов; о параметрах процесса размола для заданного

изменения свойств волокон; модернизации бумагоделательной машины для уменьшения колебаний характеристик качества бумажного полотна и размеров дефектов кромок; об использовании для производства менее дорогостоящих полуфабрикатов; о снижении массы 1 м^2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабаевский, П.Г.* Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций [Текст] / П.Г. Бабаевский, С.Г. Кулик. – М.: Химия, 1991. – 336 с.
2. *Бакнелл, К.Б.* Ударопрочные пластики [Текст] / К.Б. Бакнелл. – Л.: Химия, 1981. – 328 с.
3. *Бартенев, Г.М.* Прочность и механизм разрушения полимеров [Текст] / Г.М. Бартенев. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
4. *Белоглазов, В.И.* Анизотропия деформативности и прочности тарного картона и методы ее оценки [Текст] / В.И. Белоглазов, А.В. Гурьев, В.И. Комаров; под ред. В.И. Комарова. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005. – 252 с.
5. *Варенцов, П.Н.* Изучение растяжения гофрированного картона при рилевании и перегибах [Текст] / П.Н. Варенцов, Г.А. Карпова, И.В. Головизина // Совершенствование технологии тарного картона и картонной тары: сб. трудов ВНИПИЭИлеспром. – М., 1986. – С.34–41.
6. *Варенцов, П.Н.* Растяжение гофрированного картона при рилевании и перегибах [Текст] / П.Н. Варенцов, Г.А. Карпова // Бум. пром-сть. – 1986. – № 2. – С. 5–7.
7. *Козлов, Г.В.* Оценка вкладов механизмов пластической деформации в ударную прочность полимеров [Текст] / Г.В. Козлов, В.Н. Белоусов, А.К. Микитаев // Докл. АН СССР. – 1984. – № 2. – С. 338–342.
8. *Комаров, В.И.* J-интеграл – характеристика структуры целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / В.И. Комаров // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 1997. – № 5-6. – С. 26–29.
9. *Комаров, В.И.* Вязкоупругость целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / В.И. Комаров // Лесн. журн. – 1997. – № 6. – С. 25–44. (Изв. высш. учеб. заведений).
10. *Комаров, В.И.* Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / В.И. Комаров. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. – 440 с.
11. *Комаров, В.И.* Расчет коэффициента Пуассона при испытании на растяжения целлюлозно-бумажных материалов [Текст] / В.И. Комаров, Я.В. Казаков // Лесн. журн. – 1993. – № 5–6. – С. 133–136. – (Изв. высш. учеб. заведений).
12. *Комаров, В.И.* Формирование свойств тест-лайнера в процессе производства [Текст] / В.И. Комаров, Н.И. Яблочкин, Д.А. Дулькин, И.Н. Ковернинский. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005. – 162 с.
13. *Ламбергер, Э.* Фракционирование макулатуры – средство к управлению качеством и его улучшению // Материалы фирмы «Voith». – М.: 1985. – 15 с.
14. *Нотт, Дж.Ф.* Основы механики разрушения [Текст] / Дж.Ф. Нотт. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
15. *Пейдж, Д.* Теоретические исследования механизма сопротивления разрыву бумаги при растяжении [Текст] / Д.Пейдж // Tappi. – 1969. – № 4. – С. 674–681.
16. Программа для расчета характеристик вязкости разрушения целлюлозно-бумажных материалов согласно SCAN-P 77:95 (J_INTEGRAL) [Текст]: свид.

2001610527 РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ / Я.В. Казаков, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ (RU). – № 2001610251/69; заявл. 11.03.01; опубл. 10.05.01, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

17. *Сет, Р.С.* О работе разрушения бумаги [Текст] / Р.С. Сет // Тappi. – 1979. – № 3. – С.105.

18. *Сысоева, Н.В.* Разработка технологии производства крафт-лайнера повышенной жесткости [Текст]: дис... канд. техн. наук / Н.В. Сысоева. – Архангельск, 2003. – 146 с.

19. *Фудзи, Т.* Механика и разрушение композиционных материалов [Текст] / Т. Фудзи, М. Дзако. – М.: Мир, 1982. – 232 с.

20. *Choi, D.* Progressive deformation at the crack tip in paper during Mode I fracture. Part I – bond paper [Text] / D. Choi, J.L. Thorpe // Tappi. – 1992. – N 10. – P. 127–134.

21. *Fellers, C.* Furniture foughness a new paper property [Text] / C. Fellers // Paper Testing and Processes Optimization: Catalog. Lorentzen and Wettre, 1994. – P. 92–98.

22. *Mc Kee, R.C.* Effekt of repulping on sheet properties and fiber characteristics [Text] / R.C. Mc Kee // Paper Trade Journal. – 1971.– Vol. 155, N 24. – P. 34–40.

23. Papermaking Science and Technology. Book 7. Recycled Fiber an Deinking [Text] / Book editor L. Gottshing, H. Pakarinen. – Jyvaskila, Finland, 2000. – 649 p.

24. Papers and Boards. Fracture Toughness. Scandinavian pulp, paper and board. Testing Committee [Text]: SCAN–P77:95. – 8 p.

25. Paper Testing and Process Optimization Catalog [Text]. – Lorentzen and Wettre, 1994. – 200 p.

26. *Seth, R.S.* Fracture resistance: a failure criterion for Paper [Text] / R.S. Seth, D.H. Page // Tappi. – 1975. – N 9. – P. 112–117.

27. *Seth, R.S.* Measurement of in-plane fracture toughness of paper [Text] / R.S. Seth // Tappi. – 1995. – N 10. – P. 177–183.

28. *Wellmar, P.* Crack Tip Characterization in Paper [Text] / P. Wellmar, C. Fellers, F. Nilsson, L. Delhage // Journal of Pulp and Paper Science. – 1997. – Vol. 23, N 6. – P. 169–176.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 10.05.06

E.V. Djakova, V.I. Komarov, E.S. Noskova

Stability to Crack Initiating and Growth in Structure of Pulp-and-paper Materials

The possibility of using energy characteristic (J -integral) for paper and board quality estimation is shown; the technique for testing and calculation procedure of J -integral value for pulp-and-paper materials is provided; the influence of different technological factors on fracture strength of containerboard is established.