

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.017

В.И. КОМАРОВ

Архангельский государственный технический университет



Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет более 160 печатных работ в области исследования свойств деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.

**МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Предложена гипотеза механизма деформирования и разрушения волокнистых целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки. Анализ зависимости $\sigma - \epsilon$ позволил выделить четыре области действия различных механизмов данного процесса. Предложены методики для количественной оценки наблюдаемых явлений.

The hypothesis has been suggested for the mechanism of deformation and destruction of fiber pulp-and-paper materials when tensile load is applied. The analysis of the dependence $\sigma - \epsilon$ has allowed to determine four areas of activity for different mechanisms of the given process. The models for quantitative assessment of the observed phenomena have been suggested.

Механизм деформирования и разрушения любого материала, в том числе бумаги и картона, зависит в сильной степени от двух факторов: во-первых, от наличия и природы дефектов структуры, во-вторых, от вариации в структуре микронеоднородностей напряжений и их концентрации. В волокнистом капиллярно-пористом материале структурные микро- и макронеоднородности обусловлены наличием капилляров и пор различной геометрической конфигурации и высокой вариабельностью свойств отдельных волокон. Действуя на неоднородный материал, макрооднородное поле напряжений становится микронеоднородным и вызывает перенапряжения в

слабых местах и концентрацию напряжений у дефекта структуры. В последние годы выполнено большое число работ по исследованию вопроса, являются ли вязкоупругие свойства бумаги результатом явлений, происходящих внутри волокон или между ними. Эти явления тесно взаимосвязаны, поэтому интерпретация экспериментальных данных затруднена. По мнению автора, в существующих теориях прочности целлюлозно-бумажных материалов уделяется недостаточное внимание роли высокой дисперсности целлюлозных волокон и различных свойств отдельных фракций, отличающихся длиной волокна.

Более высокий уровень оценки свойств целлюлозы, бумаги и картона и разработки технологий материалов с заданными свойствами может быть достигнут при привлечении методов механики разрушения [3].

Анализ зависимости напряжение – деформация при статическом нагружении позволяет выделить четыре области действия различных механизмов деформирования и разрушения целлюлозно-бумажных материалов (рис.1).

В области I, ограниченной на кривой точкой I, происходит деформирование волокон и межволоконных связей. Предел упругости σ_1 и упругая деформация ε_1 испытываемых образцов варьируются, что объясняется неоднородностью материала в плоскости листа (рис. 2). Различия в величинах предела упругости и упругой деформации слоёв 1–4 приводят к коле-

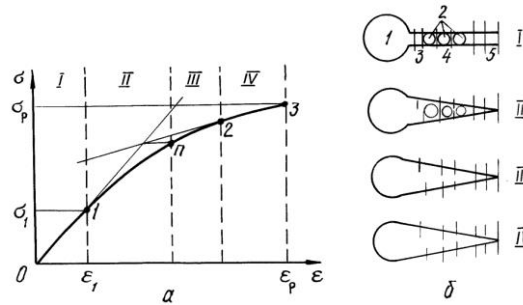
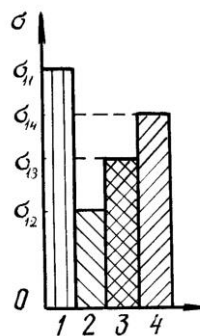


Рис. 1. Схема деформационных состояний целлюлозно-бумажных материалов при растяжении: а – зависимость $\sigma - \varepsilon$; б – стадии раскрытия трещины; I – деформирование волокон и межволоконных связей; II – извлечение концов неразорванных волокон; III – отрыв волокон при их деформировании без разрушения и слияние микрокапилляров; IV – разрыв волокон и адгезионное отслаивание волокон перед разрывом; 1 – капилляр с максимальным диаметром; 2 – микрокапилляр; 3 – волокна с $l \ll l_k$; 4 – $l < l_k$;

5 – $l > l_k$

Рис. 2. Зависимость предела упругости σ от структуры слоя в плоскости листа (1–4 – номер слоя; $\sigma_{11} - \sigma_{14}$ – соответствующий слою предел упругости)



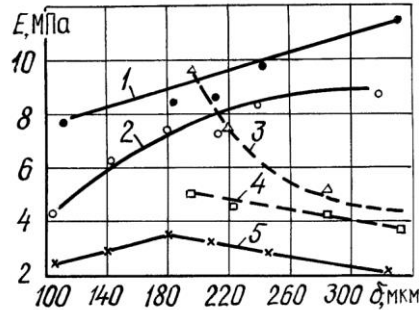


Рис. 3. Влияние толщины материала, обусловленной массой 1 м^2 , на модуль упругости, определенный динамическим и статическим методами: 1 – $\varepsilon \approx 0,03$; 2 – $\varepsilon \approx 0,1$; 3 – $\varepsilon \approx 0,2 \dots 0,3 \%$; 4, 5 – стрела прогиба образца составляет до 8 % от испытываемой длины, а угол изгиба не превышает 7°

баниям пороговых значений σ_1 и ε_1 у образца, а значит, и к колебаниям величины начального модуля упругости. Отсюда следует, что у образца, состоящего только из слоя 1, начальный модуль упругости будет гораздо выше, чем у образца, состоящего только из слоя 2.

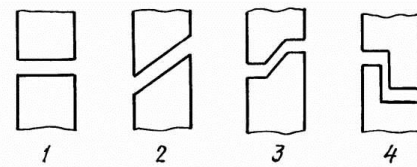
Данное положение подтверждено [4, 5] экспериментально (рис. 3).

От точки 1 до точки 2 (см. рис. 1) зависимость имеет криволинейный характер, причем крутизна кривой на отрезке 1 – II (область II) выше, чем на отрезке II – 2 (область III). Постоянное снижение текущего модуля упругости на этой кривой обусловлено поведением различных по длине фракций волокон. При этом в II области отклонение от прямолинейной зависимости вызвано извлечением концов неразорванных волокон с $l \ll l_k$ (l – длина волокна, l_k – критическая длина волокна) из стенок трещин, образующихся у капилляров с достаточно большим диаметром. Переход от точки 1 к точке II сопровождается увеличением длины участвующих в этом процессе волокон, снижением межволоконных сил связи и текущего модуля упругости E_t . При этом раскрытие начинающейся образовываться трещины сдерживается «проросшими» через неё волокнами с $l > l_k$, т.е. появляется трещина типа «крейзы», а микрокапилляры увеличиваются в объеме.

В III области с увеличением напряжения деформирование волокон с длиной, приближающейся к критической (с $l \rightarrow l_k$), приводит к отрыву концов волокон от края трещины уже с более значительным разрушением межволоконных сил связи. Концы волокон извлекаются с преодолением сил трения. Микрокапилляры сливаются, и под действием сдвиговых, касательных напряжений и крейзования происходит возникновение пластических деформаций.

В IV области начинается рост трещины, приводящий к разрушению образца. Под действием значительных напряжений, возникающих в направлении роста трещины, происходит адгезионное отслаивание волокон (разрушение межволоконных сил связи) у вершины трещины с последующим разрушением волокна. У целлюлозно-бумажных материалов рост трещины может осуществляться двумя основными способами – отрывом или сколом. В некоторых случаях разрыв представляет собой сочетание местных отрывов и сколов (рис. 4) [7].

Рис. 4. Элементарные типы разрушения хрупкого материала при испытании на растяжение: 1, 2 – соответственно отрыв и скалывание в плоскости максимальных сдвиговых напряжений; 3 – отрыв и скалывание; 4 – отрыв и скалывание в направлении растяжения



Таким образом, упругие свойства зависят от предыстории материала: природы волокна; способа варки; фундаментальных свойств волокна; режимов технологических процессов; соотношения начальных модулей упругости волокон, выполняющих роль матрицы и армирующего элемента; наличия макронеоднородной структуры в плоскости листа, обусловленной процессом формования на сетке БДМ. Начальный модуль упругости E_1 является интегральной характеристикой I области деформирования [10].

Замедленно упругая деформация, т.е. проявление вязкоупругих свойств во II и III областях кривой зависимости σ – ε , обусловлена следующим: во-первых, величиной критической длины волокна l_k ; во-вторых, относительным содержанием фракций волокон с $l < l_k$ и $l > l_k$; в-третьих, относительным вкладом в возникающую пластическую деформацию механизмов сдвиговой вынужденной эластичности (СВЭ) и крейзования. Разработанные методики позволяют получить характеристики для оценки данных областей деформирования. Критическую длину волокна определяют по уравнению [6,12]

$$l_k / d_b = \sigma_{p0} (1,54 / \rho_1) / 2 F_{cb} (1,54 / \rho_2), \quad (1)$$

где d_b – ширина волокна;

σ_{p0} – разрушающее напряжение материала при испытании на растяжение и нулевом расстоянии между зажимами разрывной машины;

1,54 – плотность стенки целлюлозного волокна;

ρ_1 и ρ_2 – кажущаяся плотность материала;

F_{cb} – адгезионная способность волокна, определяемая по методу Иванова.

Знание фракционного состава волокна по длине позволяет оценить относительное содержание фракций с заданной длиной.

Количественная оценка вкладов крейзования и сдвиговой вынужденной эластичности в механизм пластической составляющей деформации важна для интерпретации процессов деформации и разрушения. Исходным уравнением предлагаемой методики является следующее соотношение [2, 11]:

$$(\Delta V/V) / (\Delta L/L) = 1 - 2\nu, \quad (2)$$

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 (2) определяет вклад крейзования в пластическую деформацию образца. Если левая часть равна 1, то единственным механизмом является крейзование ($\nu = 0$), если она равна 0, то вся пластическая деформация обусловлена сдвиговой вынужденной эластичностью ($\nu = 0,5$). При промежуточных значениях ν левая часть уравнения (2) выражает относительную долю крейзования в пластической деформации. Таким образом, это уравнение позволяет однозначно дифференцировать вклады крейзования и СВЭ при условии известного ν . Коэффициент Пуассона может быть рассчитан по уравнению

$$\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = [(1-\nu)/(1-2\nu)]^2, \quad (3)$$

где σ_1 и σ_2 – разрушающее напряжение соответственно при плосконапряженном и плоскодеформированном состояниях.

Развивающиеся при приложении нагрузки деформации во II и III областях на кривой напряжение – деформация могут иметь и релаксационный характер. Дополнительную информацию о механизме деформирования может дать расчет времени релаксации напряжения по уравнению типичного тела [9]:

$$\sigma_{(\varepsilon)} = E_2 \varepsilon + \nu n (E_1 - E_2) \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\nu n}} \right), \quad (4)$$

где $\sigma_{(\varepsilon)}$ – напряжение;

E_2 – модуль упругости в области предразрушения;

ν – скорость приложения нагрузки;

n – время релаксации напряжения;

ε – относительная деформация;

E_1 – начальный модуль упругости.

Четвертая область деформирования материала характеризуется трещиностойкостью, т.е. устойчивостью к инициированию и росту трещин, случайно образующихся или специально нанесённых дефектов и надрезов. Одним из основных энергетических критериев, характеризующих рост трещины, является J -интеграл [1, 8].

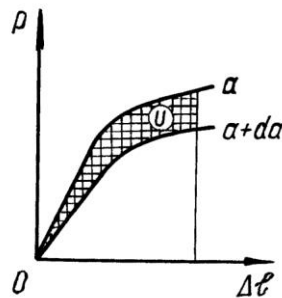


Рис. 5. Зависимость усилия – удлинение ($P - \Delta l$) для образцов с различной длиной трещин

J -интеграл можно найти, используя экспериментально полученные кривые усилие – удлинение ($P - \Delta l$) для образцов, в которых создаются трещины длиной a и $a + da$ (рис. 5):

$$J_1 = \frac{U}{(a + da) - a}, \quad (5)$$

где U – энергия, необходимая для роста трещины на длину da .

Экспериментально можно построить зависимость $J - \Delta l$. В случае линейно-упругой деформации эта зависимость выражается уравнением параболы. При возникновении у вершины трещины пластической зоны зависимость приобретает линейный характер (рис. 6), что дает возможность легко определять величину характеристики трещиностойкости J_{IC} соответственно точке 1.

Сведения о трещиностойкости материала полезны для практики: в случае низкой трещиностойкости необходимо проводить эффективное сортирование целлюлозы или бумажной массы и увеличивать относительное содержание в структуре материала длинноволокнистого полуфабриката или длинноволокнистой фракции в целях нивелирования воздействия типичных дефектов; поддерживать параметры процесса размола для заданного изменения критической длины волокна; модернизировать бумаго-делательную машину с целью уменьшить колебания характеристик упругости, вязкоупругости и прочности; при излишней трещиностойкости целесообразно использовать материал для производства менее дорогостоящих полуфабрикатов; снижать массу 1 м^2 материала.

Учет теоретических представлений о микромеханических явлениях, происходящих при деформировании и разрушении материала, применение предложенных методик как для оценки качества полуфабрикатов и материала, так и для эффективного регулирования технологических процессов маскоподготовки и производства на бумагоделательной машине позволяют с большей вероятностью прогнозировать производство материалов с заданными свойствами.

Для иллюстрации вышеизложенного было проведено исследование влияния степени делигнификации сульфатной небелёной целлюлозы на характеристики деформативности, трещиностойкости и прочности (см. табл.). Эксперимент на образцах с массой 1 м^2 , равной 40 г, и степенью помола 45 °ШР показал, что снижение критической длины волокна уменьшает вклад в пластическую деформацию механизма крейзования и трещиностойкость материала, что влечет за собой уменьшение характеристик статической P и динамической A_p прочности.

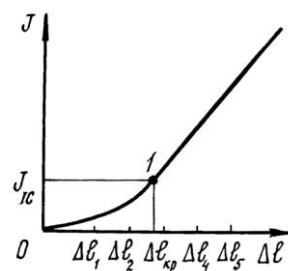


Рис. 6. Изменение J -интеграла в зависимости от удлинения Δl образца в процессе испытаний

Характеристики	Значение характеристик при различной степени делигнификации целлюлозы, ед. Каппа		
	43,9	32,4	67,2
E_1 , МПа	5870	6310	6380
ν	0,29	0,24	0,22
СВЭ, %	42	52	60
K^* , %	58	48	40
l_k , мм	1,24	1,18	0,67
J_{IC} , мДж/м	1,86	1,29	0,70
P , Н	64,4	59,6	51,3
A_p , мДж	102	85	74

* K – крейзование.

В то же время увеличение вклада в механизм пластической деформации крейзования позволяет предположить об образовании, например в слоях 2 и 3 (см. рис. 2), большего количества трещин типа крейзы, что снижает величину начального модуля упругости.

Таким образом, предложенная гипотеза с известным приближением дает качественное представление о механизме деформирования и разрушения волокнистого целлюлозно-бумажного материала, а разработанные методики позволяют количественно оценить происходящие явления на различных ступенях деформирования с целью целенаправленного технологического воздействия для достижения заданного качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Броек Д. Основы механики разрушения - М.: Высш. шк., 1980. - 368 с. [2]. Козлов Г.В., Белоусов В.Н., Микитаев А.К. Оценка вкладов механизмов пластической деформации в ударную прочность полимеров // Докл. АН СССР. - 1984. - № 2. - С.338-342. [3]. Комаров В.И. Вязкоупругость целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн. - 1997.- № 6. - С. 25-44. - (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Комаров В.И. Жесткость при изгибе целлюлозно-бумажных материалов. Анализ методов измерения и влияния технологических факторов // Лесн. журн.- 1994. - № 3.- С. 112-142.- (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Комаров В.И. К вопросу измерения модуля упругости бумаги // Химическая переработка древесины.- Л.:РИО ЛТА, 1972.- Тр. № 152. С.62-66. [6]. Комаров В.И. «Критическая» длина волокна – фактор, определяющий деформативность и прочность целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн. - 1993. - № 4. - С. 79-83.- (Изв. высш. учеб. заведений). [7]. Комаров В.И. Применение статистической теории прочности при испытании целлюлозных материалов // Бум. пром-сть.- 1987 - № 3- С. 13-14. [8]. Комаров В.И. J -интеграл – характеристика структуры целлюлозно-бумажных материалов // Целлюлоза, бумага, картон.- 1997. - № 5-6.- С.26-29. [9]. Комаров В.И., Казаков Я.В. Определение времени релаксации напряжения в целлюлозно-бумажных материалах из статических кривых σ – ϵ при деформировании и нагружении с постоянной скоростью // Лесн. журн. - 1993. - № 5-6. - С.130-133.- (Изв. высш. учеб. заведений). [10]. Комаров В.И., Казаков Я.В. Программное обеспечение лабораторного комплекса для оценки механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растя-