

УДК 676.017

## АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЕ — ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА РАСТЯЖЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. КОМАРОВ

Архангельский лесотехнический институт

В оценке и поддержании качества продукции на оптимальном уровне важную роль играют испытания. Многостадийность и многофакторность, характерные для технологии получения целлюлозно-бумажных материалов, природа данного класса материалов обуславливают их структурную неоднородность. Поэтому существующие в отрасли методы испытаний во многих случаях не позволяют правильно оценить соответствие продукции ее назначению. Для достоверного прогнозирования потребительских свойств материалов необходимы такие испытания, которые достаточно точно моделируют эксплуатационные воздействия.

При оценке качества целлюлозно-бумажных материалов важным эквивалентным испытанием считается испытание на растяжение [9], причем стандарт допускает определение прочности по трем различным характеристикам: разрушающему усилию  $P$ , разрывной длине  $L$  и пределу прочности при растяжении  $\sigma_p$ . Последнюю характеристику, зависящую не только от свойств материала, но также от температуры, влажности, продолжительности действия деформирующей силы и др., правильнее называть разрушающим напряжением.

Проблема оценки качества периодически обсуждается в отраслевой печати [10, 11, 13, 14, 17—19, 28]. В. А. Гуляницкий [10] исследовал вопрос изыскания наиболее рационального показателя сопротивления бумаги разрыву и пришел к выводу, что для оценки целесообразнее всего пользоваться пределом прочности, имеющим общий характер. Вместе с тем известные затруднения при определении толщины бумаги предполагают необходимость разработки более точных методов ее измерения. В работе [28] Г. Э. Финкельштейн отмечает, что в разных научно-технических документах (НТД) на целлюлозно-бумажную продукцию нормируются различные характеристики прочности (разрушающее усилие, предел прочности при растяжении, разрывная длина). Он делает вывод о необоснованности такого подхода и высказывает мнение, что для потребителя продукции важно только разрушающее усилие, полностью характеризующее прочность каждой марки бумаги и картона. По мнению автора, расчетные показатели (предел прочности и разрывная длина), зависящие от площади поперечного сечения или поверхностной плотности материала, нормировать в НТД нецелесообразно, так как они не могут быть использованы для прогнозирования прочности изделий из бумаги и картона, а служат лишь для сравнительной оценки продукции. Ранее нами [19] показано, что при испытании на растяжение целлюлозно-бумажных материалов наблюдаются четыре элементарных типа разрушения (рис. 1): отрыв в плоскости максимальных нормальных напряжений (1); скалывание в плоскости максимальных сдвиговых напряжений (2); отрыв и скалывание (3); отрыв и скалывание в направлении растяжения (4). Относительные доли различных типов разруше-

ния, отмеченных при испытании целлюлозных волокнистых материалов, представлены в таблице.

Как видно из таблицы, на относительное содержание различных типов разрушений основное влияние оказывают природа волокна и степень помола, в меньшей степени — масса 1 м<sup>2</sup>. Установлено, что разрушающее напряжение, рассчитанное с учетом типа разрушения, на 5... 12 % ниже, чем полученное по общепринятой методике.

Сульфатная целлюлоза	Масса 1 м <sup>2</sup> , г	Степень помола, °ШР	Тип разрушения, %		
			1	2	3 + 4
Хвойная: небеленая	50	25	30	40	30
	100	25	30	40	30
	200	25	40	40	20
	75	15	28	54	18
	75	35	38	38	24
	75	60	46	28	26
беленая	75	20	40	40	20
	75	30	60	30	10
	75	60	90	—	10
Лиственная беленая	75	20	10	90	—
	75	30	80	20	—
	75	60	90	—	10

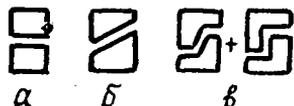


Рис. 1. Типы разрушения: а — 1; б — 2; в — 3 + 4

Возрастание коэффициента вариации  $v$  (рис. 2) с увеличением значений характеристик прочности сульфатной небеленой целлюлозы при испытании на растяжение отмечено в работе [18]. Среднее значение характеристики в этом случае недостаточно отражает качество материала.

Проведенное нами [18] исследование влияния комплекса факторов при лабораторном изготовлении образцов целлюлозы, подготовке их к испытаниям и собственно испытаниях показали, что статистическая природа физико-механических свойств волокнистых целлюлозных материалов требует вероятностного подхода при оценке их качества.

Таким образом, характеристики прочности целлюлозно-бумажных материалов, полученные при испытании на растяжение, обладают рядом недостатков. Наиболее серьезный из них — невозможность использования для прогнозирования прочности изделий из бумаги и картона.

Известно, что способность материала сопротивляться возникающему под действием внешних сил деформированию и разрушению определяется такими его свойствами, как упругость, вязкость, пластичность, прочность. Причем упругие постоянные материалов, которые могут быть определены статическими или динамическими методами, весьма чувствительны к изменениям структуры. В литературе достаточно долго обсуждается вопрос о том, какой из методов (статический или динамический) лучшим образом оценивает качество материала. Большая работа по обоснованию применения метода крутильных колебаний для оценки качества целлюлозно-бумажных материалов проведена Б. П. Ерыховым. Частично результаты этих исследований представлены в работах [11, 13, 14] и обобщены в монографии [12]. Отдавая предпочтение динамическим методам испытания, автор [12, с. 4... 5] отмечает,

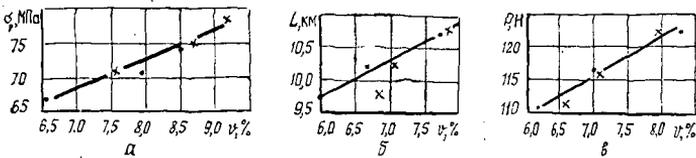


Рис. 2. Изменение коэффициента вариации характеристик: а — разрушающее напряжение; б — разрывная длина; в — разрушающее усилие

что применение статических методов часто оправдано, так как они в отличие от динамических позволяют построить кривую зависимости деформации от напряжения в широком диапазоне его изменения.

В работе [5] В. В. Богданов, указывая на простоту определения деформационных характеристик по кривым зависимости напряжение — деформация, подчеркивает, что полученные значения модуля упругости существенно зависят от скорости приложения нагрузки. Вследствие этого при определении модуля упругости применение классических формул возможно лишь с учетом временной зависимости входящих в них характеристик. Э. Л. Аким и В. А. Романов [1] считают, что использование статических методов, в частности метода исследования релаксационных свойств в области малых нагрузок, не вызывающих структурных изменений, позволяет оценить вклад отдельных структурных образований в механические показатели бумаги.

Кривая зависимости напряжение — деформация ( $\sigma - \epsilon$ ), получаемая путем обработки индикаторной диаграммы нагрузка — удлинение ( $P - \Delta l$ ), является интегральной характеристикой механических свойств [3, 15, 21, 26, 33—39] и широко применяется в материаловедении [7].

О. I. Kallmes, D. X. Page, I. Skowronski, Van den Akker, J. Clark, Кадоя, Э. Л. Аким, Б. П. Ерыхов и др. показали сложность явлений, обуславливающих механические свойства целлюлозно-бумажных материалов. Существующее представление о механизмах деформирования и разрушения целлюлозно-бумажных материалов при приложении различных видов нагрузок, в частности растягивающей, отстают от уровня, достигнутого при изучении полимерных и композитных материалов.

В физическом материаловедении одной из основных является проблема [24] использования для прогноза работоспособности материала результатов испытаний образцов при одномерной нагрузке. Исследование зависимости напряжение — деформация, по всей видимости, может способствовать ее разрешению.

При приложении растягивающей нагрузки в капиллярно-пористом материале (образцы технической целлюлозы, бумаги и картона) наблюдается несколько стадий развития деформаций, предшествующих окончательному разрушению (рис. 3).

Рис. 3. Зависимость напряжение — деформация для целлюлозно-бумажного материала: 0 — 1 — упругая зона; 1 — 2 — замедленно-упругая зона; 2 — 3 — зона предразрушения, характеризующая развитием пластических деформаций; Э — точка, усредненно характеризующая замедленно-упругую зону

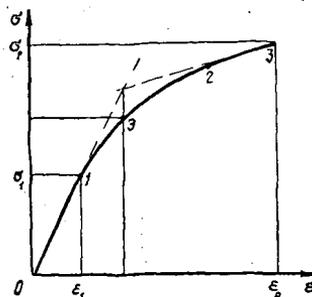


График зависимости напряжение — деформация во многих случаях труден для математического описания. Его начальная часть является прямой, которая при возрастании напряжения переходит в кривую. Для определения характеристики упругости в основном используют три способа (рис. 4). Первый заключается в нахождении начального модуля упругости через тангенс угла ( $E_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$ ), второй — в определении секущего модуля упругости или модуля общей деформации ( $E_{0..A} = \operatorname{tg} \alpha_2$ ), третий — в получении модуля упругости для выбранной точки на кривой или текущего модуля упругости ( $E_{\tau} = \operatorname{tg} \alpha_3$ ) [39].

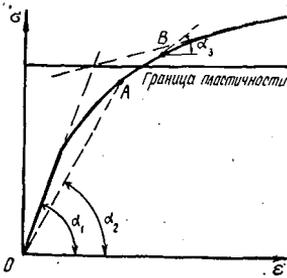


Рис. 4. Способы определения модуля упругости для нелинейно-упругих тел

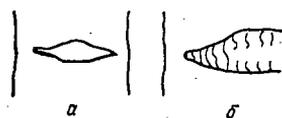
В твердом состоянии целлюлозно-бумажные материалы имеют достаточно густую сеть межмолекулярных и межволоконных связей, которые, являясь менее жесткими и прочными, чем химические связи макромолекул, деформируются силовым полем в первую очередь. При этом деформация межволоконных связей может легко возрасти до величины, соответствующей их прочности. Компоненты структуры (волокон, фрагменты волокон, нано-, микро- и макрофибриллы и др.) в зависимости от своего физического состояния, влажности материала и др. приобретают подвижность и способность к ориентации в направлении действия растягивающей силы. Таким образом, наблюдаются следующие стадии развития деформации: упругая, замедленно-упругая и деформация в области предразрушения, происходящая в условиях интенсификации процессов разрушения и заканчивающаяся разделением образцов на части. Рассматривая последовательность процессов деформирования и разрушения образцов под действием одноосной растягивающей нагрузки, отмечаем, что теории, которая объясняла бы поведение целлюлозно-бумажных материалов, обладающих большим разнообразием структур, в настоящее время не существует.

Изучение упругой стадии деформации имеет важное значение для понимания развития всех последующих стадий. Растяжение образца на начальной стадии приводит к увеличению его объема и ослаблению межволоконных сил связи между элементами структуры. При этом нужно отчетливо представлять, что структура бумаги — это совокупность разноразмерных, разноразмерных волокон, их фрагментов и фибрилл, взаимопереплетенных и сцепленных между собой. Специфические свойства бумаги возникают как следствие разнообразия свойств волокон, характера их сочетания, распределения сил связи и концентрации напряжений в объеме. Когда для характеристики материала используют модуль упругости, необходимо уделять должное внимание и такому показателю, как коэффициент Пуассона  $\mu$ , который является абсолютным значением отношения относительной поперечной и продольной деформаций материала (в данном случае при его продольном растяжении). Определение  $\mu$  для целлюлозно-бумажных материалов представляет некоторую трудность, поэтому разработка надежной и нетрудоёмкой методики является важной задачей. Для различных видов целлюлозно-бумажных

материалов экспериментальные значения начального модуля упругости  $E_1 = (2 \dots 10) \cdot 10^3$  МПа, а  $\mu = 0,10 \dots 0,45$ , в то время как для «идеального» материала, объем которого при упругой деформации остается постоянным,  $\mu = 0,5$ .

Вслед за упругой деформацией в подвергаемом растяжению материале начинает проявляться замедленно-упругая деформация. При достижении определенного напряжения (предела упругости  $\sigma_1$ ) у некоторых фрагментов структуры появляется определенная подвижность. Очевидно, что в начальный и конечный периоды замедленно-упругого деформирования размеры и природа «активационного объема», оказывающего влияние на ход кривой зависимости напряжение — деформация и количественные значения определяемых характеристик, могут быть различными. Кроме того, в этой области деформирования в структуре начинают появляться трещины и крейзы (рис. 5).

Рис. 5. Вид нарушения сплошности материала: а — трещина; б — крейза



Характер деформации вокруг краев трещины под воздействием растягивающего усилия — это важный фактор для понимания механизма развития трещины [32]. С появлением возможности измерять деформацию у краев трещины возникает возможность повышать трещиностойкость структуры при производстве материала. В настоящее время предлагается две теории, объясняющие появление трещин: линейно-упругий механизм разрыва и  $I$ -интеграл. Обе теории базируются на изучении размера пластической зоны, который для бумаги на данный момент экспериментально не установлен. Высказывается предположение, что классическая концепция пластического деформирования не может быть применена к бумаге.

В структуре образца целлюлозно-бумажных материалов при растяжении, очевидно, могут возникать и крейзы.

Крейза — это особый тип дефекта структуры, характерный только для полимерных материалов. Этот дефект, образующийся в силовом поле, называют еще «трещиной серебра». Трещины серебра не являются трещинами в обычном понимании этого слова, так как вследствие микрон неоднородного строения структуры перед трещиной в области повышенной деформации происходит расслаивание на микротяжи, роль которых в целлюлозно-бумажных материалах могут выполнять волокнистые элементы длиной выше критической. Крейза образуется в связи с развитием деформаций сдвига. Волокнистые компоненты структуры в ней ориентированы. Следует подчеркнуть, что при исследовании деформируемых образцов полимеров с помощью структурных методов (например, рентгеновской дифракции) подобного рода нарушения сплошности могут регистрироваться как обычные трещины, каковыми они не являются [23]. В отношении целлюлозно-бумажных материалов этот вопрос остается нерешенным.

Третья стадия деформации характеризуется необратимым смещением волокнистых элементов структуры в возрастающем силовом поле. Продолжается рост и образование новых трещин и крейз. Заканчивается эта стадия разделением образцов на части. Для прогнозирования качества материала, очевидно, большое значение имеет возможность количественно определять вклад механизмов крейзования и сдвиговой вынужденной эластичности в пластическую деформацию. В работе [16] для полимерных материалов предлагается методика, выявляющая характер

пластического деформирования. В ее основе лежат следующие допущения:

в случае образования только крейз поперечная деформация не наблюдается и  $\mu = 0$ ;

в случае образования только трещин в результате сдвиговой вынужденной эластичности поперечная деформация наблюдается и  $\mu = 0,5$ .

Наши предварительные исследования показали возможность использования этой методики для испытаний целлюлозно-бумажных материалов.

Таким образом, ход кривой зависимости напряжение — деформация зависит от структуры материала и изменений в структуре, вызванных возрастающим силовым полем.

Обработка экспериментальной кривой для получения большого количества характеристик связана с трудоемкостью расчетов. Облегчить их позволяют программы для ЭВМ [20, 30]. При создании программ использовали аппроксимацию экспериментальных данных полиномом вида

$$\sigma_i = b_0 + b_1 \epsilon_i + \dots + b_m \epsilon_i^m.$$

В результате обработки экспериментальной кривой могут быть получены следующие характеристики:

показатели прочности (разрушающее усилие  $P$ ; разрушающее напряжение  $\sigma_p$ ; работа разрушения  $A$ );

показатели деформативности (начальный модуль упругости  $E_1$ ; модуль, характеризующий область предразрушения,  $E_2$ ; эффективный модуль упругости (характеристика области, замедленной упругости в точке начала возникновения пластических деформаций)  $E_3$ ; модуль общей деформации (секущий модуль упругости)  $E_{0.д}$ ; предел упругости  $\sigma_1$ ; упругая деформация  $\epsilon_1$ ; деформация разрушения  $\epsilon_p$ );

показатели прочности и деформативности, позволяющие оценить кинетику процесса разрушения и деформирования, т. е. текущие, соответствующие заданной точке на кривой (усилие  $P_t$ ; напряжение  $\sigma_t$ ; работа деформирования  $A_t$ ; модуль упругости  $E_t$ ; деформация  $\epsilon_t$ ).

Величины напряжения и деформации, при которых возникает пластическая деформация в структуре материала, кроме способа, показанного на рис. 2, можно определять также методом, предложенным I. Skowronski (рис. 3), и третьим способом, обладающим наибольшей чувствительностью. Переход от использования системы координат  $\sigma - \epsilon$  к  $\sigma^2 - \epsilon$  позволяет в отчетливой форме обнаружить переходы второго порядка [31]. Механическое упрочнение материала, связанное с возникающей пластической деформацией, проявляется в изменении угла наклона участка ломаной линии (рис. 6). Точка  $A$  в этом случае соответствует началу возникновения в структуре пластических деформаций, т. е. упрочнению материала ( $\sqrt{\sigma_A^2}$  и  $E_A$  — параметры, при которых возникают пластические деформации).

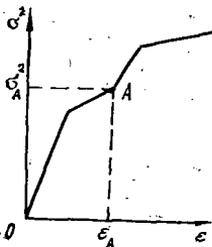


Рис. 6. Зависимость напряжение—деформация в системе координат

$$\sigma^2 = f(\epsilon)$$

Кроме того, кривая зависимости напряжение — деформация представляет еще ряд возможностей для оценки качества материала. Ван Кревелен показал [6], что тип материала можно определять по форме кривой (рис. 7). В монографии [29] показано, как характер распределения связующего влияет на характер кривой (рис. 8). При деформировании и напряжении образца с постоянной скоростью решение уравнения типичного тела при  $\epsilon = vt$  и начальных условиях  $\sigma(0) = 0$  имеет вид [8, 25]

$$\sigma(\epsilon) = E\epsilon + vn(E_1 - E)(1 - e^{-\epsilon/vn}),$$

где  $E$  — длительный модуль, определяющий направление асимптоты, к которому стремится рост напряжения с течением времени;  
 $v$  — скорость приложения нагрузки;  
 $n$  — время релаксации напряжения;  
 $E_1$  — начальный модуль упругости, равный тангенсу угла, который образуют касательная к экспериментальной кривой  $\sigma - \epsilon$  в начальной точке координат (рис. 9).

Рис. 7. Зависимость напряжение — деформация для полимерных материалов различного типа: а — мягкий; б — мягкий пластичный; в — жесткий прочный; г — жесткий пластичный; д — жесткий хрупкий

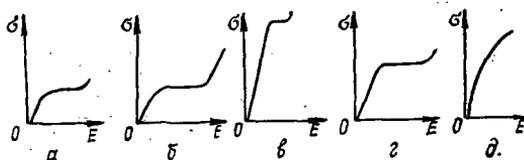


Рис. 8. Вид кривой в зависимости от характера распределения связующего в структуре бумаги из химических волокон (от а к в содержание связующего увеличивается)

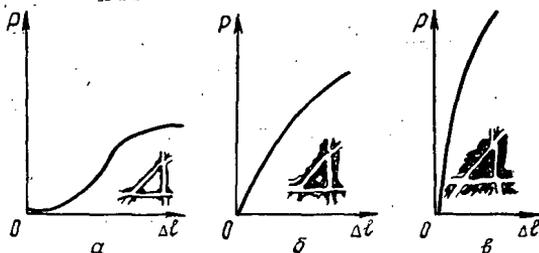
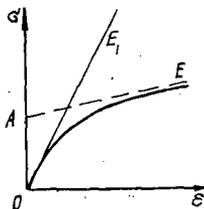


Рис. 9. Схема определения реологических характеристик при равномерном деформировании (нагружении)



Время релаксации напряжения может быть определено из уравнения

$$\sigma = AO = (E_1 - E)vn.$$

Отрезок  $AO$  отсекается асимптотой на оси  $\sigma$ . В случае сложности построения касательной  $E$  авторы предлагают методику нахождения наиболее достоверных значений  $E_1$ ,  $E$  и  $n$ .

В работе [2] показана возможность определения энергии межволоконных сил связи при использовании кривых зависимости нагрузка — удлинение. Отмечая, что наиболее распространенным способом идентификации водородных связей и нахождения их энергии является метод

ИК-спектроскопии, авторы подчеркивают, что в этом случае образцы не подвергаются механическому воздействию, которое характерно для реальных условий их применения и безусловно отражается на характере разрушения водородных связей. Предлагаемая методика исходит из предположения, что при известной величине работы, затраченной на разрыв связей при различных видах деформации, можно определить интенсивную работу разрыва связей путем экстраполяции до деформации и полного разрушения образца. Испытывая образцы при расстоянии между зажимами прибора 50, 100 и 150 мм и рассчитывая энергию на разрыв связей, путем экстраполяции можно получить значение энергии в зоне разрыва. Работа, затраченная на пластическую деформацию материала, представляет собой энергию, затраченную на разрыв связей. Деля величину энергии разрыва связей на массу образца в зоне разрыва, которая принимается равной 1,5 средней длины волокна, получают величину энергии межволоконных связей (в Дж/г).

В заключение отметим, что общепринятыми стандартными методами оценки качества целлюлозно-бумажных материалов являются разрушающие испытания с получением характеристик прочности, оценивающих материал в момент разрушения. Реализация этих методов вызывает затруднения как при разработке технологий изготовления новых материалов с заданными физико-механическими свойствами, так и при оценке их потребительских свойств. Физические теории, разработанные для металлов и полимеров, показывающие достаточно тесную корреляцию между характеристиками деформативности и прочности, для целлюлозно-бумажных материалов, имеющих специфическую структуру, часто неприемлемы.

Сведения о деформативности целлюлозно-бумажных материалов позволяют, во-первых, обеспечить лучшее понимание чрезвычайно сложной структуры; во-вторых, оценить влияние изменяющихся параметров технологических процессов производства; в-третьих, прогнозировать качество. Характеристики деформативности важны для моделирования и проектирования материала [2, 22, 31], а также для автоматического управления бумагоделательной машиной [27]. Для этого требуется проведение большого объема исследований в лабораторных и производственных условиях. Основой методики, позволяющей получить большой набор характеристик, которые обеспечивают реализацию вышеизложенной задачи, может стать зависимость напряжение — деформация при испытании на растяжение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аким Э. Л., Романов В. А. Структура и релаксационные свойства бумаги как основы целлюлозных композиционных материалов // *Химия древесины*.— 1986.— № 4.— С. 12—17. [2]. Алехина Н. А., Чекунин В. Н. Исследование диаграмм «нагрузка — удлинение» при определении энергии межволоконных сил связи // *Исследования в области производства бумаги*: Сб. тр. ЦНИИБ.— М.: Лесн. пром-сть, 1975.— С. 82—89. [3]. Бабурин С. В., Киприанов А. И. Реологические основы процессов целлюлозно-бумажного производства.— М.: Лесн. пром-сть.— 1983.— 192 с. [4]. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Часть I. Малые деформации.— М.: Наука, 1984.— 596 с. [5]. Богданов В. В. Методы исследования технологических свойств пластмасс.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978.— 174 с. [6]. Ван Кревелен Д. В. Свойства и химическое строение полимеров.— М.: Химия, 1976.— 414 с. [7]. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение.— М.: Атомиздат, 1975.— 472 с. [8]. Гермелис А. А., Латигенко В. А. Определение реологических характеристик полимерных материалов из статических кривых  $\sigma - \epsilon$ , кривых ползучести и релаксации // *Механика полимеров*.— 1967.— № 6.— С. 977—988. [9]. ГОСТ 13525. 1—79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинение при растяжении— Введ. 01.07.80. [10]. Гуляницкий В. А. Вопросы характеристики сопротивления бумага разрыву // Сб. тр. / УкрНИИБ.— 1957.— Вып. 1.— С. 103—114. [11]. Ерыхов Б. П., Комаров В. И., Фляте Д. М. Исследование адеструктивными методами влияния проклеивающих веществ на механическую прочность бу-