

УДК 676.017

Я.В. Казаков

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Казаков Яков Владимирович родился в 1966 г., окончил в 1990 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, член международного научного общества EUROMECH. Имеет более 160 научных трудов в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.

E-mail: j.kazakov@narfu.ru



КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БУМАГИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ

Представлена методика оценки локальных деформаций при одноосном растяжении с постоянной скоростью листовых целлюлозно-бумажных материалов. Установлено наличие в неоднородной структуре целлюлозного волокнистого материала неоднородности продольных и поперечных локальных деформаций при растяжении, дана их количественная и статистическая оценка. Предложен способ визуального представления поля локальных деформаций. Экспериментально подтверждено, что образец разрывается в области с максимальной неоднородностью локальных деформаций.

Ключевые слова: неоднородность бумаги, деформирование, локальные деформации, растяжение.

Все виды бумаги и картона, в той или иной степени, обладают структурной неоднородностью [2, 6, 7]. Благодаря природе волокнистых полуфабрикатов и существующей технологии изготовления бумаги и картона, получить идеальный изотропный материал в настоящее время не удастся.

Структура реального листового целлюлозно-бумажного материала определяется особенностями строения, свойств и взаимосвязи структурных элементов: волокон различных размеров, природы и степени разработки, наполнителей, проклеивающих и других вспомогательных веществ [7]. Все эти факторы, включая склонность волокон к хлопьеобразованию, приводят к тому, что в реальном бумажном листе обязательно имеет место структурная неоднородность, т. е. неравномерность распределения массы по площади листа. Визуально этот эффект оценивается по облачности просвета листа бумаги [6, 7], для количественной оценки применяют анализаторы формования [2].

В настоящее время при описании механического поведения бумаги под воздействием различного вида нагрузок (растягивающих, сжимающих, изгибающих) широко используют ряд теорий [1], основывающихся на допущении однородного поля деформаций во всем образце бумаги. В действительности имеют место существенные изменения по величине местной деформации в листе бумаги под нагрузкой (при приложении внешней нагрузки к образцу целлюлозно-бумажного материала). Связанные межволоконными связями области и свободные от связей сегменты волокон имеют различную жесткость, флоккулы и промоины в образце усиливают эффект неоднородности, что приводит к возникновению концентраций напряжений.

Экспериментальные наблюдения свидетельствуют, что при приложении к образцу внешней нагрузки, в нем возникает неоднородность полей деформаций и напряжений, приводящая к возникновению концентраций напряжений, что выражается как в локальности зоны разрушения, так и в сильной вариации значений разрушающих характеристик. Учет макроструктурной неоднородности, обусловленной строением агрегированных вторичных элементов пространственной структуры бумаги и распределением волокон в бумажном листе, а также количественная оценка неоднородности напряжений и деформаций позволяют более надежно прогнозировать поведение целлюлозно-бумажного материала в процессе его эксплуатации.

В материаловедении существуют методики анализа распределения локальных деформаций в образце, которые широко применяются для прогнозирования механического поведения металлов, полимеров и композитов. Результаты, получаемые в этих экспериментах, служат исходными данными для

расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [5], который позволяет получить информацию о поле напряжений во всех точках образца и прогнозировать дальнейшее развитие деформаций. Однако в отечественной практике для целлюлозно-бумажных материалов данная методика практически не применяется.

Нами проведена адаптация используемых в материаловедении методик для измерения локальных деформаций в структуре листа бумаги при испытании на растяжение и оценки неоднородности полей локальных деформаций и напряжений в образце [4, 8]. Суть методики состоит в следующем.

Образец с нанесенной струйным принтером сеткой точек, расположенных по углам квадратов (длина стороны 4 мм), крепится в зажимах вертикальной разрывной машины. Напротив, на штативе, устанавливается цифровой фотоаппарат, который производит снимки (разрешение 12 мегапикселей) исходного образца и далее через каждую секунду в процессе его растяжения с постоянной скоростью до разрушения. При обработке полученных кадров с помощью специально разработанной программы по первому снимку определяется шаг сетки в пикселях (рис. 1), затем производится наложение получившихся снимков и вычисляются смещения узлов сетки в пикселях (рис. 2).

С учетом разрешения снимка рассчитываются смещения точек в миллиметрах. Одновременно в процессе испытания регистрируются кривые зависимости «напряжение–деформация», по которым можно точно установить общую деформацию и среднее напряжение в образце в момент снимка.

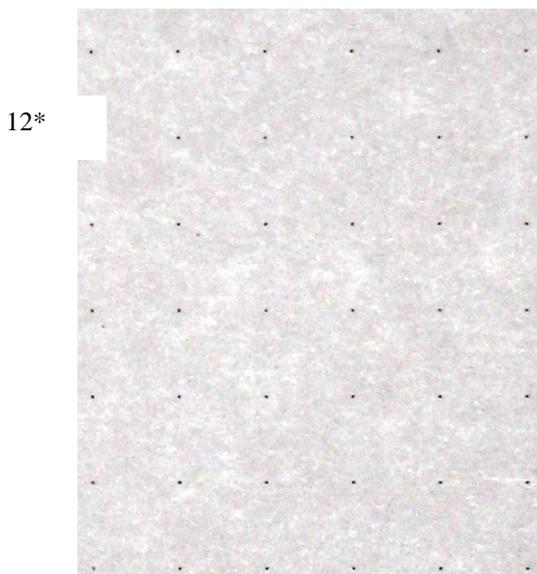


Рис. 1. Фрагмент цифрового снимка сетки точек образца бумаги перед испытанием

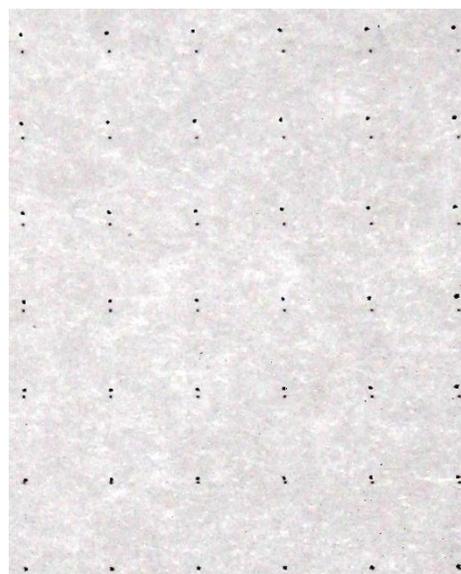


Рис. 2. Снимок образца с общей деформацией 4 мм, наложенный на снимок исходного образца

Полученные смещения точек (u_x – вдоль продольной оси образца, v_y – перпендикулярно продольной оси) соответствуют локальным деформациям ϵ_x и ϵ_y , развивающимся в образце, и служат исходными данными для расчетов по методу конечных элементов.

Результаты определения неоднородности поля деформаций представляются в виде графиков распределения локальных деформаций в образце при растяжении. На рис. 3 приведены данные для композиции из лиственной

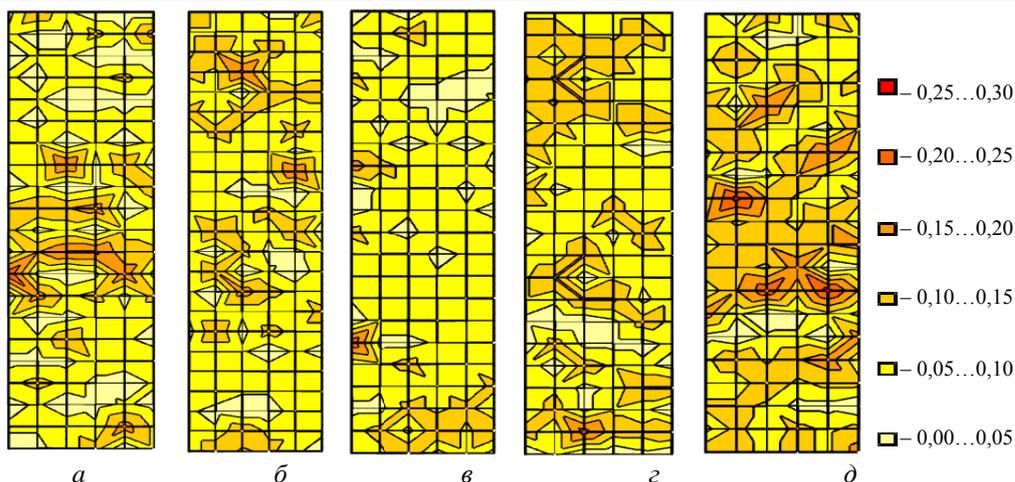
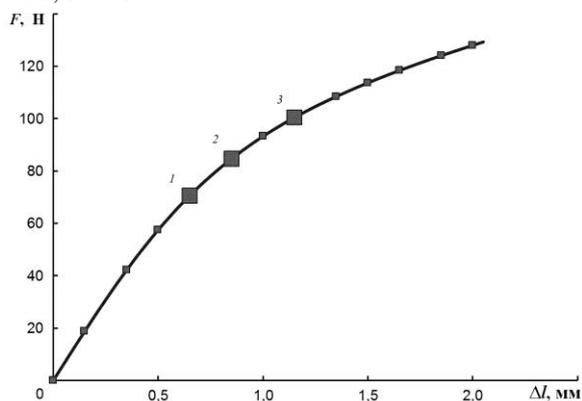


Рис. 3. Распределение продольных локальных деформаций ε_x в образцах с различной степенью помола, °ШР: а – 18; б – 20; в – 25; г – 30; д – 40

Рис. 4. Экспериментальная кривая деформирования образца при растяжении (■ – точки, где делались снимки); 1–3 – точки, принятые для обработки



(60 %) и хвойной целлюлоза (40 %) с различной степенью помола после растяжения образца до общей деформации 1 мм. Более темные области диаграмм соответствуют более сильным деформациям. Отметим, что поперечные деформации ε_y в образце бумаги являются деформациями сжатия, поэтому полученные значения являются отрицательными. Полученные результаты свидетельствуют о наличии неоднородного поля деформаций как вдоль линии нагружения, так и поперек.

Анализ развития неоднородности полей деформаций при растяжении выполнен на образцах, имеющих следующую композицию: 40 % лиственной и 60 % хвойной целлюлозы. Использовали три точки при растяжении одного образца примерно до 0,65; 0,90 и 1,25 мм (рис. 4): т. 1 находится в области замедленной упругости, т. 2 – в области начала развития пластических деформаций в образце, т. 3 – в начале зоны предразрушения материала [3]. Для количественной оценки обнаруженной неоднородности проведена статистическая обработка локальных деформаций. Результаты представлены в таблице. За характеристику неоднородности локальных деформаций принято среднеквадратическое отклонение величины локальных деформаций в направлении приложения нагрузки σ_{ε_x} .

Представленные в таблице данные свидетельствуют, что при растяжении образца увеличиваются не только общая и локальная продольные деформации, но и их неоднородность, т. е. развитие деформаций усиливается в местах, где образуются локальные растяжения структуры. Экспериментально подтверждено, что наибольшие локальные деформации наблюдаются именно в том месте, где в последующем образец рвется (рис. 5).

Необходимо отметить, что деформации в продольном направлении ε_x по абсолютной величине больше, чем в поперечном ε_y , и их рост при растяжении образца более выражен. При этом характеристики неоднородности поперечных деформаций остаются на одном уровне.

Характеристика неоднородности полей деформаций в образце при растяжении

Степень помола, °ШР	Нагрузка на образец		Общее удлинение, мм		Средняя локальная деформация		Неоднородность деформации σ_{ε_x}
	F , Н	σ , МПа	ε_y^o	ε_x^o	ε_y^l	ε_x^l	
18	51,8	18,2	-0,0163	0,639	-0,0054	0,0356	0,03416
	66,7	21,5	-0,0227	0,873	-0,0076	0,0468	0,03380
	79,5	26,5	-0,0580	1,280	-0,0193	0,0659	0,03917
20	64,7	22,7	-0,0518	0,640	-0,0164	0,0313	0,02485
	79,5	27,9	-0,0656	0,900	-0,0206	0,0448	0,02728
	99,0	34,7	-0,1137	1,393	-0,0366	0,0652	0,03375
25	83,4	31,4	-0,0683	0,784	-0,0228	0,0421	0,03207
	89,4	35,0	-0,0716	0,958	-0,0239	0,0547	0,03546
	101,2	39,9	-0,1004	1,190	-0,0335	0,0586	0,03162
30	60,2	23,1	-0,0399	0,488	-0,0133	0,0289	0,02530
	78,9	30,3	-0,0413	0,672	-0,0138	0,0346	0,03298
	113,3	43,6	-0,1212	1,251	-0,0404	0,0638	0,03264
40	73,6	31,6	-0,0145	0,523	-0,0048	0,0311	0,02764
	89,2	38,4	-0,0370	0,668	-0,0123	0,0386	0,02795
	98,4 42,3	-0,0410 0,784	-0,0137	0,0452			0,03115

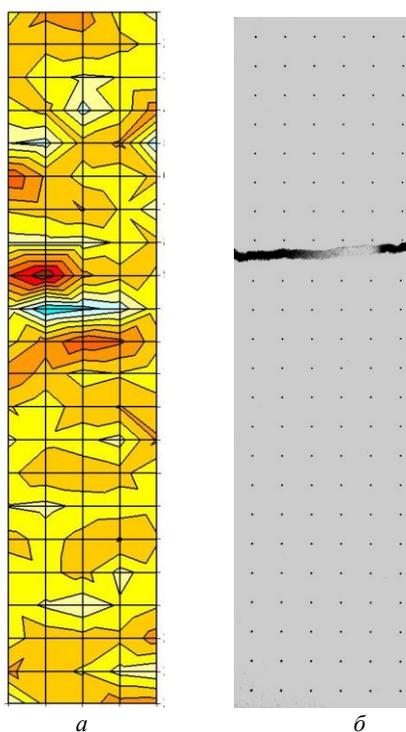


Рис. 5. Сопоставление распределения продольных локальных деформаций в образце (общее удлинение 1,2 мм) с линией разрыва: *a* – распределение деформаций,

b – образец с линией разрыва

Таким образом, в результате проведенных исследований предложена и экспериментально апробирована методика оценки локальных деформаций при растяжении листовых целлюлозно-бумажных материалов. Экспериментально установлено наличие в неоднородной структуре целлюлозного волокнистого материала неоднородностей продольных и поперечных локальных деформаций при растяжении, дана их количественная и статистическая оценка. Экспериментально подтверждено, что образец разрывается в области с максимальной неоднородностью локальных деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 440 с.

Влияние степени помола в данном случае проявляется в нескольких аспектах. С одной стороны, при увеличении степени помола возрастает жесткость материала, и при той же общей деформации у размолотых образцов напряжения в структуре выше, что сказывается на общей величине и неоднородности деформаций, с другой стороны, размол приводит к снижению неоднородности структуры материала. Поэтому не наблюдается линейной зависимости неоднородности локальной деформации от степени помола.

Полученные в эксперименте данные будут использованы для расчетов полей напряжений в образце по методу конечных элементов. Для этого необходимо знать упругие константы материала – модуль Юнга (модуль упругости) E и коэффициент Пуассона ν . Интегральный начальный модуль упругости материала определяют математической обработкой кривых «напряжение–деформация» [1, 3], в задачах теории упругости его принимают величиной постоянной. При выходе общей деформации за пределы зоны упругости для расчетов используют текущий модуль упругости E_t . Сведения о коэффициенте Пуассона для целлюлозно-бумажных материалов достаточно противоречивы [1], поэтому для более точного определения ν , особенно вне пределов зоны упругости, предложена методика, основанная на принципе определения локальных деформаций.

2. Казаков Я.В., Зеленова С.В., Комаров В.И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров // Лесн. журн. 2007. № 3. С.110–121. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Казаков Я.В., Комаров В.И. Математическая обработка кривых зависимости «напряжение-деформация», полученных при испытании целлюлозно-бумажных материалов на растяжение // Лесн. журн. 1995. № 1. С.109–114. (Изв. высш. учеб. заведений).

4. Казаков Я.В., Суханов А.В., Комаров В.И. Анализ перераспределения локальных деформаций в структуре бумаги в процессе растяжения // Целлюлоза. Бумага. Картон. Спец. науч. вып. Ноябрь. 2006. С. 51–53.

5. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988. 284 с.

6. Смолин А.С., Аксельрод Г.З. Технология формования бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 120 с.

7. Фляте Д.М. Свойства бумаги. Изд. 4-е, испр. и доп. СПб.: НПО «Мир и семья-95»; ООО «Интерлайн», 1999. 384 с.

8. Kazakov Ya., Komarov V., Suhanov A. Analysis of local deformations and stresses in structure of handmade sheets with different furnish under tensile loading // Progress in paper physics seminar / Proceedings. Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008. P. 201–205.

Поступила 25.01.13

Y.V. Kazakov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Quantitative Estimation of Deformation Heterogeneity in a Paper at Uniaxial Stretching at Constant Rate of Speed

The technique of an estimation of local deformation under uniaxial tension at a constant rate applied to sheet pulp and paper materials is presented. Experimentally established that in inhomogeneous structure of cellulose fiber material the presence of heterogeneity of the longitudinal and transverse tensile local deformations and their quantitative and statistical evaluation is given. Provides a method for visual representation of the field local deformations. Experimentally confirmed that the sample breaks in the region of the maximum heterogeneity of local deformations.

Key words: kraft pulp, paper drying, viscoelasticity, strength, deformation behavior, interfiber bonds, fiber strength.