

8. Sinyavskii V. S., Kalinin V. D., Aleksandrova T. V. Novyi metod uskorennykh korrozionnykh ispytaniy alyuminievykh splavov / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2013. N 2. P. 89 – 93 [in Russian].
9. Sinyavskii V. S. Vliyanie nachal'nykh stadii atmosfornoj korrozii na tsiklicheskuyu prochnost' alyuminievykh splavov / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2012. N 1. P. 93 – 97 [in Russian].
10. Kolobnev N. I., Makhsidov V. V., Samokhvalov S. V., Sbitneva S. V., Popov V. I., Kurs M. G. Vliyanie deformatsii posle zakalki i rezhimov stareniya na mekhanicheskie i korrozionnye svoystva splava sistemy Al – Mg – Si – Cu – Zn / Aviats. Mater. Tekhnol. 2011. N 1. P. 12 – 15 [in Russian].
11. Khokhlatova L. B., Kolobnev N. I., Antipov V. V., Karimova S. A., Rudakov A. G., Oglodkov M. S. Vliyanie korrozionnoi sredy na skorost' rosta treshchiny ustalosti v alyuminievykh splavakh / Aviats. Mater. Tekhnol. 2011. N 1. P. 16 – 20 [in Russian].
12. Kablov E. N. (ed.). Istoriya aviatsionnogo materialovedeniya. VIAM — 80 let: gody i lyudi. — Moscow: Izd. VIAM, 2012. P. 211 – 222 [in Russian].
13. Semenychev V. V., Salakhova R. K. Sklonnost' k lokal'nym vidam korrozii krupnogabaritnykh polufabrikatov iz alyuminievykh splavov / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2013. N 3. P. 121 [in Russian].
14. Semenychev V. V. Vliyanie kontsentratsii khloridov na korroziyu listov iz splava D16chT v usloviyakh morskikh subtro-
pikov / Izv. Samarsk. Nauch. Tsentra RAN. 2012. Vol. 14. N 4(3). P. 791 – 797 [in Russian].
15. Kablov E. N., Startsev O. V., Medvedev I. M., Panin S. V. Korroziionnaya agressivnost' primorskoj atmosfery. Ch. 1. Faktory vliyaniya (obzor) / Korroziya: Mater. Zashch. 2013. N 12. P. 6 – 18 [in Russian].
16. Startsev O. V., Medvedev I. M., Kurs M. G. Tverdost' kak indikator korrozii alyuminievykh splavov v morskikh usloviyakh / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N 3. P. 16 – 19 [in Russian].
17. Erasov V. S., Bairamukov R. R. Rol' faktora vremeni pri provedenii mekhanicheskikh ispytaniy, otrabotke dannykh i predstavlenii rezul'tatov / Aviats. Mater. Tekhnol. 2013. N 2. P. 62 – 67 [in Russian].
18. Erasov V. S., Krylov V. D., Panin S. V., Goncharov A. A. Ispytaniya polimernogo kompozitsionnogo materiala na udar padayushchim gruzom / Aviats. Mater. Tekhnol. 2013. N 3. P. 60 – 64 [in Russian].
19. Kvasov F. I., Fridlyander I. N. Promyshlennyye alyuminievye splavy. — Moscow: Metallurgiya, 1984. — 528 p. [in Russian].
20. Sinyavskii V. S., Val'kov V. D., Kalinin V. D. Korroziya i zashchita alyuminievykh splavov. — Moscow: Metallurgiya, 1988. — 368 p. [in Russian].
21. Rozenfel'd I. L., Zhigalova K. A. Uskorennyye metody korrozionnykh ispytaniy metallov. — Moscow: Metallurgiya, 1966. — 348 p. [in Russian].

УДК 620.172.22:676.017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ КОНСТАНТ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА

© Я. В. Казаков, О. Я. Казакова, Т. Н. Манахова, А. В. Малков¹

Статья поступила 3 сентября 2014 г.

Представлены результаты определения модулей упругости E_{11} и E_{22} , коэффициентов Пуассона ν_{12} и ν_{21} и модуля сдвига G_{12} наиболее распространенных целлюлозно-бумажных материалов в условиях одноосного растяжения с постоянной скоростью для режима плоского напряженного состояния. Эксперименты проведены на вертикальной разрывной машине с микропроцессорным управлением с получением зависимости напряжение – деформация, использована цифровая фотосъемка с высоким разрешением для регистрации продольных и поперечных деформаций. Подтверждена анизотропия целлюлозно-бумажных материалов по модулям упругости и коэффициентам Пуассона и установлены величины и пределы варьирования упругих констант для основных видов бумаги и картона.

Ключевые слова: бумага; картон; модуль упругости; коэффициент Пуассона; модуль сдвига; анизотропия.

Бумага и картон — это волокнистые материалы на основе растительных полимеров, которые должны обладать заданным уровнем прочностных и деформационных свойств. В процессах переработки и использования бумага и картон подвергаются воздействию различного вида нагрузок.

¹ ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия; e-mail: j.kazakov@narfu.ru

Бумага представляет собой сложный гетерогенный материал, состоящий главным образом из растительных волокон, волокнистой мелочи и минеральных наполнителей [1]. Свойства материала зависят от его композиции и технологического режима изготовления. Благодаря волокнистой природе и существующей технологии изготовления свойства бумаги и картона различны в трех главных направлениях: машинном (MD, machine direction), совпадающем с направлением

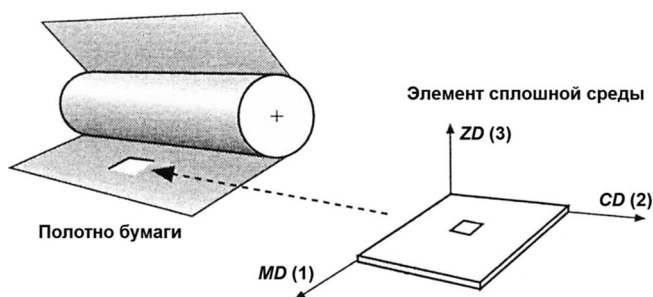


Рис. 1. Три главные направления в бумажном материале: MD — машинное направление; CD — поперечное машинному направлению; ZD — направление по толщине

движения бумаги при ее изготовлении на бумагоделательной машине; поперечном машинному (CD, cross direction); в направлении по толщине (ZD, z-direction) (рис. 1). Волокна, образующие структуру бумаги, располагаются главным образом в плоскости листа и преимущественно ориентированы в машинном направлении. В этом случае можно говорить об ортотропии свойств бумаги в плоскости. Поскольку толщина бумаги на два-три порядка меньше длины и ширины испытываемых образцов, то при рассмотрении прочностных и деформационных свойств при растяжении принимают гипотезу о режиме плоского напряженного состояния.

Из-за гидрофильности целлюлозного материала механические характеристики определяют в стандартизированных условиях — при температуре 23 ± 1 °C и относительной влажности воздуха 50 ± 2 % (ГОСТ 13523–78). При оценке качества целлюлозно-бумажных материалов важным является испытание в режиме одноосного растяжения с постоянной скоростью; процедура регламентирована стандартами ГОСТ 13525.1–79, ГОСТ 1924-1–96, ISO 1924-2:2008, ISO 1924-3:2005. Согласно этим нормативным документам определяют прочность при растяжении; удлинение при разрыве; жесткость при растяжении как тангенс угла наклона кривой нагрузка – удлинение; работу разрушения.

На регистрируемой в процессе испытания на растяжение кривой нагрузка — удлинение (рис. 2) выделяют несколько областей развития деформаций, предшествующих окончательному разрушению: 0–1 — упругая зона; 1–2 — зона замедленной упругости; 2–3 — зона предразрушения, где деформация происходит в условиях интенсификации процессов разрушения и заканчивается разделением образца на части; Э и П — точки, усредненно характеризующие зону замедленной упругости [1]. Методы математической обработки этих кривых достаточно хорошо разработаны [2, 3].

Начальный участок кривой (при малых деформациях) близок к прямолинейному, и до точки предела упругости можно применять методы общей теории упругости. При деформациях выше предела упругости для описания механических свойств требуется введе-

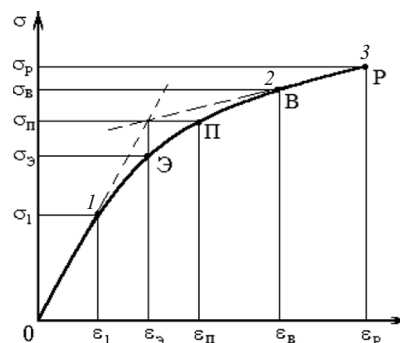


Рис. 2. Зависимость напряжения — деформация для целлюлозно-бумажного материала

ние поправок на вязкоупругое поведение целлюлозно-бумажного материала [7].

Связь между напряжениями и деформациями в условиях плоского напряженного состояния при деформациях, не превышающих предел упругости, описывается зависимостью

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_{11}\nu_{21}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{E_{22}\nu_{12}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_{22}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица жесткости включает характеристики, которые могут быть измерены достаточно легко (модули упругости в направлении, совпадающем с осью нагружения E_{11} и перпендикулярном оси нагружения E_{22}), а также характеристики, нахождение которых вызывает затруднения (модуль сдвига G_{12} и коэффициенты Пуассона ν_{12} и ν_{21}), поскольку процедура их определения для целлюлозно-бумажных материалов не стандартизирована. Ранее сообщалось о применении ультразвуковых методов для измерения констант целлюлозно-бумажного материала [4] и специальных методов [5, 6], включающих использование биаксиальной разрывной машины [5].

Эксперименты проводили на образцах печатных и упаковочных видов бумаги и картона, занимающих ведущее место в ассортименте отечественной бумажной промышленности и различающихся по композиции — массе 1 м^2 , числу слоев и технологии формования: газетной бумаги; офсетной бумаги; картона для плоских слоев гофрированного картона с белым покровным слоем «топлайнер»; картона для плоских слоев гофрированного картона «крафтлайнер»; картона «тестлайнер» из макулатуры для плоских слоев гофрированного картона. Характеристики образцов представлены в табл. 1.

Предварительно определяли физико-механические характеристики всех исследуемых образцов неразрушающими методами. Испытания проводили для оценки качества формования на приборе PTA-Line

Formation Tester [10]. Жесткость при растяжении TSI и ее анизотропию измеряли с помощью ультразвукового тестера L&W TSO SE 150 [8]. Воздухонепроницаемость и пористость по ISO 8791-2:1990 определяли на приборе PTA-Line P62420, физические свойства (толщину, массу 1 м², плотность образцов бумаги и картона) — по ГОСТ 27015–86 и ГОСТ 13199–88 [9]. Полученные физико-механические характеристики представлены в табл. 2.

Образцы, различающиеся по содержанию в композиции беленой и небеленой целлюлозы нормального выхода, древесной массы, макулатуры имеют, соответственно, различный уровень физико-механических характеристик. Образцы отличаются по плотности (0,61 – 0,77 г/см³), неоднородности структуры, оцениваемой по индексу формования (77 – 361), воздухонепроницаемости (11,5 – 37 с), анизотропии жесткости TSI_{MD/CD} (2,38 – 3,56). Таким образом, исследуемые образцы дают представление о степени варьирования физико-механических характеристик различных целлюлозно-бумажных материалов.

В данной работе для определения упругих констант проведены испытания образцов бумаги и картона на растяжение с постоянной скоростью 10 мм/мин на разрывной машине «Тестсистема 101» (Иваново) с микропроцессорным управлением, которая имеет следующие технические характеристики:

тип силоизмерителя — тензорезисторный;
диапазон измерения нагрузки — 0 – 500 Н;
пределы допускаемой погрешности машины при измерении нагрузки — не более ±1 % от измеряемой нагрузки;
скорость перемещения активного захвата — в пределах 1 – 500 мм/мин;
цена деления при измерении удлинения — 1 мкм;
отклонение скорости от установленного значения — не более ±5 %

Машина обеспечивает регистрацию изменения нагрузки и удлинения в процессе испытания (рис. 3) и оснащена портом для вывода информации на ПК (интерфейс RS 232C).

Для обработки диаграмм нагрузка — удлинение использована методика работы [2].

Образцы для испытаний вырезали по фигурному шаблону согласно ГОСТ 1497–84; рабочая длина составляла 100 мм, ширина узкой зоны — 25 мм (чтобы зона разрушения гарантированно попала в узкую зону, где проводят измерения). Для измерения продольных и поперечных деформаций на образец наносили две линии на расстоянии 25 мм по обе стороны от его поперечной оси. Образцы испытывали в машинном, поперечном направлениях и под углом 45° к машинному направлению, причем в каждом направлении — по

Таблица 1. Характеристики исследованных образцов бумаги и картона

Материал	Масса 1 м ² , г	Композиция	Зольность, %	Слойность
Газетная бумага	45	Химико-термомеханическая масса — 90 %, сульфатная хвойная беленая целлюлоза — 10 %	5	Однослойная
Офсетная бумага	60	Сульфатная хвойная беленая целлюлоза — 30 %, сульфатная лиственная беленая целлюлоза — 10 %	15	Однослойная
Картон топ-лайнера	125	Сульфатная хвойная небеленая целлюлоза — 40 %, сульфатная лиственная небеленая целлюлоза — 30 %	—	Основной бурый слой — 60 %
		Сульфатная хвойная беленая целлюлоза — 20 %, сульфатная лиственная беленая целлюлоза — 20 %	10	Покровный белый слой — 40 %
Картон крафт-лайнера	140	Небеленая сульфатная хвойная целлюлоза высокого выхода — 80 %, полуцеллюлоза — 20 %	—	Основной слой — 80 %
		Небеленая сульфатная хвойная целлюлоза высокого выхода — 100 %	—	Покровный слой — 20 %
Картон тест-лайнера	125	Макулатура МС5Б — 100 %	—	Однослойный

Таблица 2. Физико-механические характеристики исследованных видов бумаги

Характеристики материала	Материал образца				
	офсетная бумага	газетная бумага	топ-лайнера	тест-лайнера	крафт-лайнера
Толщина, мкм	83 ± 0,7	70 ± 0,7	165 ± 2,7	207 ± 2,5	216 ± 1,9
Масса 1 м ² , г	60,0 ± 0,4	43,7 ± 0,4	127,6 ± 1,9	126,4 ± 2,1	141 ± 1,5
Плотность, г/см ³	0,717 ± 0,006	0,619 ± 0,006	0,774 ± 0,015	0,610 ± 0,008	0,651 ± 0,007
Индекс формования	109 ± 5	77 ± 3	244 ± 7	361 ± 12	345 ± 24
Пористость, мл/мин	1054 ± 83	282 ± 70	371 ± 68	351 ± 81	329 ± 48
Воздухонепроницаемость (Герлей), с	11,5 ± 0,8	44,7 ± 11,1	33,5 ± 6,6	36 ± 9	37 ± 5
TSI _{MD}	12,0 ± 0,1	8,1 ± 0,1	14,5 ± 0,35	11,2 ± 0,04	13,2 ± 0,33
TSI _{CD}	5,0 ± 0,08	2,3 ± 0,03	5,8 ± 0,37	4,6 ± 0,02	4,5 ± 0,08
TSI _{MD/CD}	2,38 ± 0,04	3,56 ± 0,06	2,55 ± 0,11	2,42 ± 0,02	2,88 ± 0,07
TSO _{angle}	-0,72 ± 1,4	2,27 ± 2,2	-0,36 ± 2,9	-3,91 ± 1,4	0,92 ± 1,4

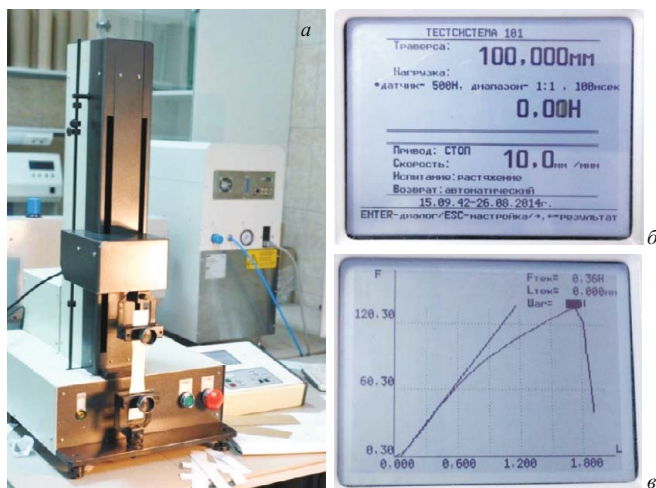


Рис. 3. Разрывная машина «Тестсистема-101»: а — внешний вид; б — экран пульта управления перед испытанием; в — кривая нагрузка — удлинение, полученная при испытании единичного образца

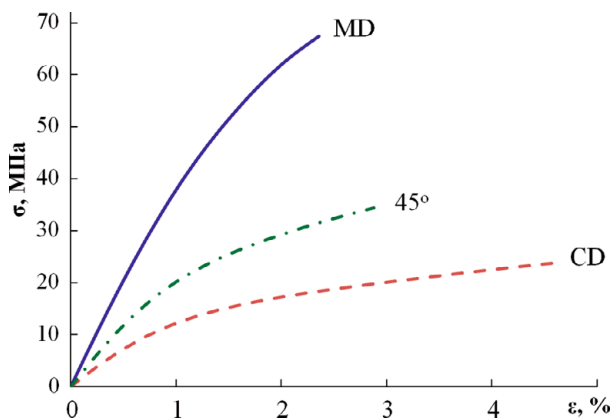


Рис. 4. Типичные кривые напряжение — деформация при испытании в режиме одноосного растяжения с постоянной скоростью на примере картона крафт-лайнера; каждая кривая представляет собой среднюю из четырех параллельных определений

пять параллельных образцов. По итогам отбрасывали по одному из пяти выпадающему результату.

В процессе испытаний на растяжение образцов была проведена фотосъемка с разрешением 24 мегапикселя (6016×4016), режим sRGB, 24 бит со скоростью два кадра в секунду. Использовали камеру NIKON D600, объектив AF-S Micro-Nikkor 60/2.8, фокусное расстояние 60 мм, диафрагма f/8, выдержка 1/100 с, светочувствительность ISO 1600. В процессе обработки цифровых фотографий измеряли расстояния в пикселях между продольными краями образца и между нанесенными на образец поперечными линиями и рассчитывали продольное удлинение ε_1 , поперечное сжатие ε_2 и коэффициент Пуассона ν . За результат принимали среднее значение для точек в зоне ниже эффективной точки (σ_e, ε_e) (см. рис. 2). При испытании образцов, вырезанных в направлении MD, нахо-

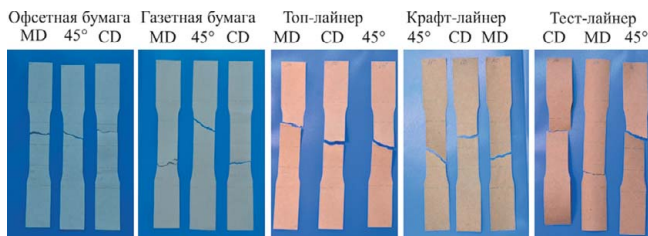


Рис. 5. Линии разрушения образцов для трех направлений вырезки испытанных образцов бумаги и картона

дили коэффициент Пуассона ν_{12} , а для образцов, вырезанных в направлении CD, — ν_{21} .

Для определения модуля сдвига G_{12} использовали результаты испытаний образцов, вырезанных под углом 45° к машинному направлению, поскольку при их разрушении линия разрыва направлена под углом 45° к продольной оси образца, что свидетельствует о сдвиговом механизме разрушения. Модуль сдвига G_{12} рассчитывали как отношение изменения напряжения сдвига $\tau = \sigma_{45}/2$ к касательной деформации $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ на начальном участке кривой деформирования. Величины ε_1 и ε_2 — деформации вдоль и поперек оси образца — измеряли по цифровым снимкам непосредственно в процессе испытания образцов.

Типичные кривые напряжение — деформация, полученные при одноосном испытании на растяжение образцов, вырезанных в трех направлениях (MD, CD и 45°) из картона крафт-лайнера, представлены на рис. 4. Данные кривые четко показывают анизотропию свойств бумаги при одноосном растяжении, уменьшение жесткости в упругой области деформирования, предела упругости и возрастание общей деформации до разрушения при увеличении угла вырезки образцов от машинного направления (MD). Все это обусловлено преимущественной ориентацией целлюлозных волокон в структуре листа бумаги и картона. Для остальных материалов получены аналогичные зависимости, отличающиеся величинами напряжений и деформаций, а также расположением кривой для образцов, вырезанных под углом 45° по отношению к образцам MD и CD, которые связаны со степенью анизотропии образцов, прочностью и длиной волокон, составляющих композицию бумаги, а также технологией формования.

Модуль упругости E определяли как тангенс угла наклона касательной к кривой $\sigma - \varepsilon$ на начальном участке деформирования. При испытании образца, вырезанного в направлении MD, находили модуль упругости E_{11} , а для образцов, вырезанных в направлении CD — E_{22} .

На рис. 5 представлены фотографии образцов после разрушения для трех направлений вырезки испытанных образцов бумаги и картона. Для образцов в направлении MD и CD линии разрушения практически перпендикулярны продольной оси образца, т.е. преобладает механизм отрыва. Для образцов, выре-

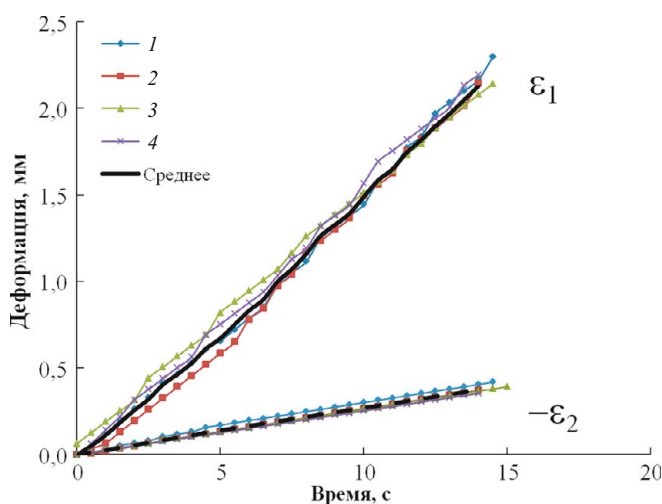


Рис. 6. Динамика развития продольных ϵ_1 и поперечных ϵ_2 деформаций образцов в процессе испытания на примере картона крафт-лайнер: 1 – 4 — результаты измерений для параллельных образцов

занных под углом 45° к машинному направлению, линия разрыва направлена под углом 45° , что свидетельствует о сдвиговом механизме разрушения. Отметим, что во всех случаях линии разрушения направлены в направлении преимущественной ориентации волокон в образце или перпендикулярны ему.

На рис. 6. приведен график, отражающий динамику развития продольных ϵ_1 и поперечных ϵ_2 деформаций образцов в процессе испытания на примере картона крафт-лайнер (образцы вырезаны в направлении CD). По этим данным вычисляли значения коэффициентов Пуассона. Некоторые отличия в кривых для параллельных образцов связаны с неоднородностью структуры бумаги, а также с дискретностью измерений размеров образца в процессе испытания. Для остальных исследованных материалов зависимости аналогичны и отличаются углом наклона, длиной и расположением кривых относительно друг друга.

На рис. 7 представлены кривые напряжение σ – деформация γ для сдвигового режима, полученные при испытании образцов бумаги и картона, вырезанных под углом 45° к машинному направлению. По тангенсу угла наклона этих кривых на начальном участке определены величины модуля сдвига G_{12} . По ходу кривых σ – ϵ исследованные материалы четко разделились на две группы. Первую составили офсетная бумага и картон топ-лайнер — материалы с относительно высокой плотностью, в композицию которых входит беленая целлюлоза и небеленая целлюлоза нормального выхода. Поэтому для этих материалов кривые σ – ϵ расположены выше, чем для других, что говорит об их больших жесткости и прочности в условиях развития сдвиговых деформаций. Во вторую группу вошли газетная бумага, крафт-лайнер, тест-лайнер — материалы, содержащие в композиции или волокнистые полуфабрикаты с высоким содержанием остаточного лигнина, или вторичное волокно.

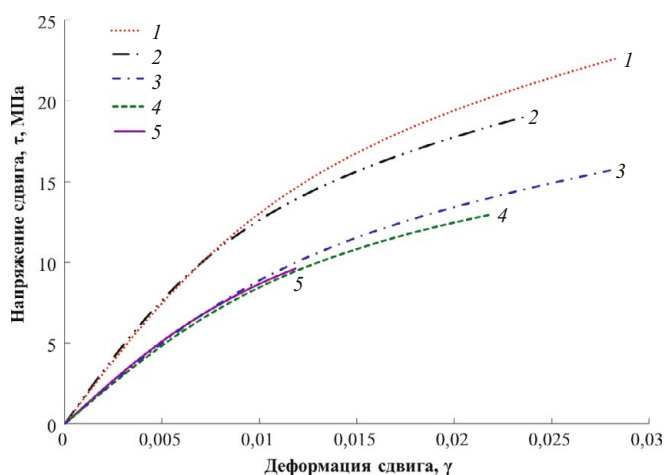


Рис. 7. Кривые напряжение — деформация для сдвигового режима, полученные при испытании образцов бумаги и картона, вырезанных под углом 45° к машинному направлению: 1 — картон топ-лайнер; 2 — офсетная бумага; 3 — картон крафт-лайнер; 4 — картон тест-лайнер; 5 — газетная бумага

В табл. 3 приведены результаты измерений упругих констант исследованных материалов: модулей упругости E_{11} и E_{22} ; коэффициентов Пуассона ν_{12} и ν_{21} , модуля сдвига G_{12} . В связи с достаточно высокой неоднородностью структуры бумаги и картона, связанной с волокнистой природой и существующей технологией изготовления, имеет место неоднородность упругих и прочностных характеристик. Поэтому в результат включены пределы отклонения, выраженные через среднеквадратическое отклонение для серии образцов.

Упругие константы подтвердили анизотропию целлюлозно-бумажных материалов, которая по модулю упругости E_{11}/E_{22} составила величину 2,5 – 4,1, а по коэффициенту Пуассона ν_{12}/ν_{21} — 1,4 – 2,1. Минимальной анизотропией по обоим характеристикам обладает макулатурный картон тест-лайнер, что связано с технологией его формования.

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента определены константы упругости различ-

Таблица 3. Результаты измерения упругих констант образцов бумаги и картона

Материал образца	Модуль упругости E_{11}/E_{22} , МПа	Коэффициент Пуассона (ν_{12}/ν_{21})	Модуль сдвига G_{12} , МПа
Офсетная бумага	5740 ± 360	$0,276 \pm 0,037$	1680 ± 140
	1930 ± 170	$0,130 \pm 0,043$	
Газетная бумага	4130 ± 280	$0,264 \pm 0,030$	1100 ± 120
	1010 ± 160	$0,165 \pm 0,021$	
Картон Топ-лайнер	5730 ± 320	$0,260 \pm 0,027$	1590 ± 180
	2160 ± 180	$0,153 \pm 0,022$	
Картон Тест-лайнер	3800 ± 350	$0,221 \pm 0,026$	1030 ± 220
	1530 ± 200	$0,161 \pm 0,023$	
Картон Крафт-лайнер	4230 ± 420	$0,344 \pm 0,025$	1050 ± 250
	1560 ± 210	$0,196 \pm 0,026$	

ных целлюлозно-бумажных материалов в условиях одноосного растяжения с постоянной скоростью при использовании вертикальной разрывной машины с микропроцессорным управлением. Получены зависимости напряжение — деформация и цифровая фото-съемка с высоким разрешением для регистрации продольных и поперечных деформаций. Модули упругости E_{11} и E_{22} , коэффициенты Пуассона ν_{12} и ν_{21} , модуль сдвига G_{12} рассчитаны для режима плоского напряженного состояния.

Подтверждена анизотропия целлюлозно-бумажных материалов по модулям упругости и коэффициентам Пуассона и установлены величины и пределы варьирования упругих констант для основных видов бумаги и картона, являющихся гетерогенными анизотропными и материалами с неоднородной структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Комаров В. И.** Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. — Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. — 440 с.
2. **Комаров В. И., Казаков Я. В.** Анализ механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки / Лесной вестник МГУЛ. 2000. № 3(12). С. 52 – 62.
3. Свид. 2001610526 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (KOMPLEX) / Казаков Я. В., Комаров В. И.; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ (RU). — № 2001610250; заявл. 11.03.2001; опубл. 10.05.2001. Реестр программ для ЭВМ. — 1 с.
4. **Baum G. A., Brennan, D. C., Habeger C. C.** Orthotropic elastic constants of paper / Tappi J. 1981. Vol. 64. N 8. P. 97 – 101.
5. **Uesaka T., Murakami K., Imamura R.** Biaxial tensile behavior of paper / Tappi J. 1979. Vol. 62. N 8. P. 111 – 114.
6. **Castro J., Ostoja-Starzewski M.** Elasto-plasticity of paper / Int. J. Plasticity. 2003. N 19. P. 2083 – 2098.
7. Papermaking Science and Technology. Book 16. Paper Physics. — Second Edition / Book editor K. Niskanen. — Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2008. — 351 p.
8. **Lindblad G., Fürst T.** The ultrasonic measuring technology on paper and board. — Lorentzen & Wettre: ElandersTofters AB, 2001. — 100 p.
9. **Дубовый В. К., Гурьев А. В., Казаков Я. В., Комаров В. И.** Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона: Учебное пособие / Под ред. проф. В. И. Комарова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. — 230 с.
10. Lab formation Sensor 2D FSensor — Lab formation Sensor [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.techpap.com/lab-formation-sensor,lab-device,6.html> (дата обращения: 18.08.2014).

REFERENCES

1. **Komarov V. I.** Deformatsiya i razrushenie voloknistykh tsellyulozno-bumazhnykh materialov [Deformation and fracture of the fibrous pulp and paper materials]. — Arkhangelsk: Izd. AGTU, 2002. — 440 p. [in Russian].
2. **Komarov V. I., Kazakov Y. V.** Analiz mekhanicheskogo povedeniya tsellyulozno-bumazhnykh materialov pri prilozhenii rastyagivayushchei nagruzki [Analysis of the mechanical behavior of the pulp and paper materials by applying a tensile load] / Lesn. Vestn. MGUL. 2000. N 3(12). P. 52 – 62 [in Russian].
3. RF Author's Certificate 2001610526 (RU). Certificate of state registration of computer software. Software of laboratory test complex to evaluate the deformability and strength of pulp and paper materials (KOMPLEX) / Kazakov Y. V., Komarov V. I. The applicant and the holder NARFU (RU); N 2001610250; appl. 11.03.2001; publ. 10.05.2001. The registry of the computer programs. 1 p. [in Russian].
4. **Baum G. A., Brennan, D. C., Habeger C. C.** Orthotropic elastic constants of paper / Tappi J. 1981. Vol. 64. N 8. P. 97 – 101.
5. **Uesaka T., Murakami K., Imamura R.** Biaxial tensile behavior of paper / Tappi J. 1979. Vol. 62. N 8. P. 111 – 114.
6. **Castro J., Ostoja-Starzewski M.** Elasto-plasticity of paper / Int. J. Plasticity. 2003. N 19. P. 2083 – 2098.
7. Papermaking Science and Technology. Book 16. Paper Physics. — Second Edition / Book editor K. Niskanen. — Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2008. — 351 p.
8. **Lindblad G., Fürst T.** The ultrasonic measuring technology on paper and board. — Lorentzen & Wettre: ElandersTofters AB, 2001. — 100 p.
9. **Dubovy V. K., Guriev A. V., Kazakov Y. V., Komarov V. I.** Laboratornyi praktikum po tekhnologii bumagi i kartona: Uchebnoe posobie [Laboratory workshop on the technology of paper and cardboard: textbook] / Ed. prof. V. I. Komarov. — St. Petersburg: Izd. SPbPU, 2006. — 230 p. [in Russian].
10. Lab formation Sensor 2D FSensor — Lab formation Sensor: <http://www.techpap.com/lab-formation-sensor,lab-device,6.html> (accessed 18.08.2014).