

УДК 676.274

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.155

## ИЗМЕРЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ГОФРИРОВАННОГО КАРТОНА ПРИ ИЗГИБЕ\*

© *Е.Ю. Ларина, канд. техн. наук*

*Я.В. Казаков, канд. техн. наук*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: ketrin@bk.ru, j.kazakov@narfu.ru

Ящики из гофрированного картона являются очень распространенным видом упаковки. Для прогнозирования их поведения в условиях эксплуатации используют не только стандартные, но и дополнительные характеристики гофрированного картона, в первую очередь жесткость при изгибе. Из всех методов измерения жесткости гофрокартона при изгибе наибольшей достоверностью обладает 4-точечный метод, сведений об использовании которого в настоящее время недостаточно. В работе представлена методика измерения жесткости гофрированного картона при 4-точечном режиме изгиба на приборе L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108. На примере образцов трехслойного гофрокартона различных марок от T22 до T25 с профилем гофры С выполнен анализ факторов, влияющих на результаты испытания. Исследовано влияние длины образца в диапазоне от 100 до 200 мм и массы грузов в диапазоне от 70 до 220 г. Показано преимущество принятия за результат среднего геометрического жесткости при изгибе, измеренной в машинном (MD) и поперечном машинному (CD) направлениях. Экспериментально установлено, что увеличение длины образца и прилагаемой нагрузки приводит к снижению жесткости гофрокартона при изгибе. В наибольшей степени влияние длины образца сказывается при низких значениях прилагаемой нагрузки, влияние прилагаемой нагрузки – при малой длине образца. Установлено, что анизотропия жесткости при изгибе гофрокартона низкой марки T22 (2,7...3,1) выше, чем высокой марки T25 (2,5...2,7), и она уменьшается с увеличением длины образца. Для корректного и надежного проведения измерения длина испытуемого образца гофрокартона должна составлять не менее 200 мм, поскольку в этом случае влияние других факторов практически нивелируется. Величина прилагаемой нагрузки зависит от марки гофрокартона и должна составлять от 120 до 220 г. Полученные результаты позволят повысить достоверность оценки качества гофрированного картона и обеспечить более надежное прогнозирование свойств гофроящиков.

*Ключевые слова:* гофрированный картон, изгиб, сопротивление изгибу, жесткость при изгибе.

---

\*Работа выполнена в инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России».

На сегодняшний день ящики из гофрированного картона являются самым распространенным видом упаковки [5, 9]. Благодаря низкой стоимости и многообразию форм и размеров, гофроупаковка находит свое применение во многих сферах жизнедеятельности человека. Важное условие дальнейшего развития предприятий тароупаковочной отрасли – достижение высокого и стабильного качества тарного картона и изделий из него, которое обусловлено совокупностью свойств исходных компонентов, особенностями используемой технологии, а также наличием и стабильным функционированием комплексной системы управления качеством [9].

Применяемые в отрасли при оценке качества гофрокартона механические характеристики – сопротивление продавливанию и сопротивление торцевому сжатию [1] – не воспроизводят весь комплекс реально воздействующих сил при затаривании, складировании и транспортировке гофроящиков. Поэтому прогнозировать поведение гофроящика с использованием стандартных характеристик затруднительно и требуется использование дополнительных характеристик, к которым относится жесткость при изгибе [2, 5].

Жесткость гофрокартона является одной из его главных характеристик, так как упаковка в первую очередь должна выполнять функцию защиты содержимого. При одной и той же массе  $1 \text{ м}^2$  гофрокартон разных марок может обладать различными жесткостными характеристиками.

Жесткость при изгибе включена в уравнение МакКее [11], описывающее взаимосвязь между сопротивлением сжатию гофроящика ( $BCT$ ) и свойствами гофрокартона – сопротивлением торцевому сжатию ( $ECT$ ), жесткостью при изгибе ( $S_b$ ), а также периметром гофроящика ( $P$ ).

Информация о жесткости при изгибе гофрокартона важна для предотвращения деформации гофроящика под воздействием содержимого, что может произойти при их затаривании или укладке в штабеля, за счет чего снижается несущая способность ящика.

Жесткость при изгибе также имеет значение, например, при упаковке и использовании больших открытых гофроящиков, особенно ее необходимо учитывать при увеличении размеров ящика. Прогиб стенки ящика может вызвать трудности при автоматизированном складировании.

В процессе измерения жесткости при изгибе картона применяются различные методы, включающие 2-, 3- и 4-точечные режимы приложения нагрузки [3–5, 11]. Первые два метода используются в универсальных испытательных машинах, но практика показала, что они приводят к ошибкам определения из-за сил сдвига, возникающих при изгибе гофрокартона [11].

Проведенные ранее исследования на образцах картона-лайнера и флутинга показали сложность явлений, происходящих при изгибе волокни-

стых целлюлозно-бумажных материалов [6, 7], и важную роль масштабного фактора.

Для измерения жесткости гофрокартона при изгибе в настоящее время рекомендуется применять 4-точечный метод, реализованный в современных приборах. Использование специальных передвижных пневматических зажимных устройств при проведении измерений по этому методу исключает влияние коробления, кручения и волнистости листа гофрокартона, что позволяет точно измерить чистую жесткости при изгибе [11].

В инновационно-технологическом центре САФУ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» для определения сопротивления образцов гофрокартона изгибу установлен и функционирует 4-точечный прибор Lorentzen&Wettre 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид прибора L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 для определения жесткости при изгибе по 4-точечному методу

Данный прибор оценивает сопротивление образцов гофрокартона, обеспечивая постоянный изгибающий момент в области упругой деформации. По данным разработчиков, прибор обеспечивает надежное и достаточно быстрое измерение на гофрах А, В, С, D и E, а также на образцах двух-, трех-, пяти-слойного гофрокартона [8]. Принцип приведения испытания представлен на рис. 2.

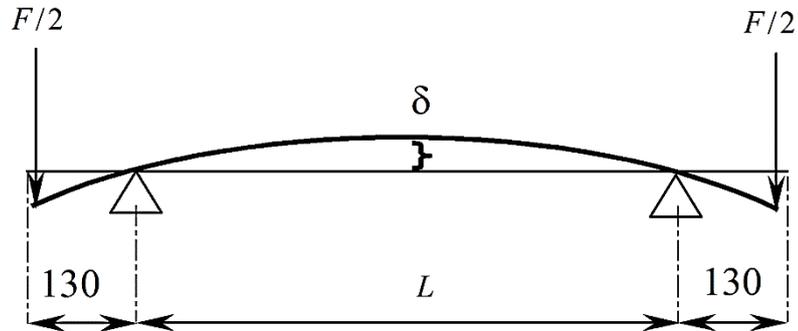


Рис. 2. Принцип приложения нагрузки при 4-точечном методе испытания на изгиб (данные приведены в миллиметрах)

Жесткость образца картона при изгибе ( $S_b$ , Н·м) вычисляется по следующему уравнению:

$$S_b = \frac{0,13(F/2)L}{4 \cdot 2 \delta b}, \quad (1)$$

где  $F$  – действующая на образец сила, Н;  
 $L$  – свободная длина изгиба, м;  
 $\delta$  – деформация (измеряемая величина), м;  
 $b$  – ширина образца, м.

Вследствие анизотропии гофрированного картона и отдельных слоев картона-лайнера жесткость при изгибе в продольном (машинном, MD) и поперечном машинному (CD) направлениях отличается друг от друга (рис. 3). О вкладе волнистого слоя в жесткость гофрированного картона существуют различные мнения [10].

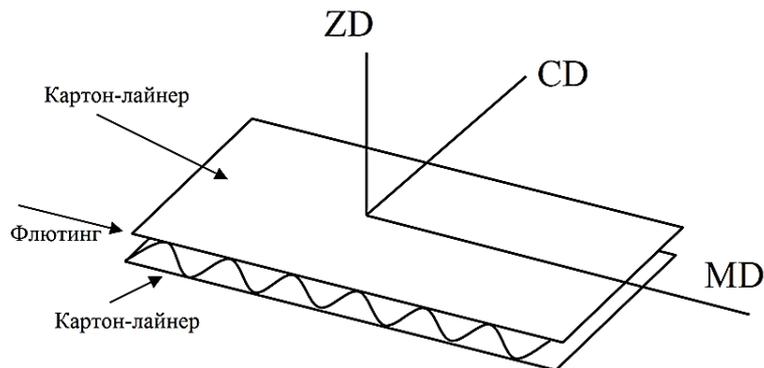


Рис. 3. Структура гофрированного картона и основные направления

В настоящее время процедура измерения жесткости при изгибе гофрированного картона стандартами не регламентируется. В качестве конечной оценки жесткости гофрокартона при изгибе  $S_b$  рекомендуется использовать

среднее геометрическое жесткости при изгибе, измеренной в машинном (MD) и поперечном машинному (CD) направлениях [11]:

$$S_b = \sqrt{S_b^{MD} S_b^{CD}}. \quad (2)$$

Из формулы (1) следует, что измеряемое значение жесткости при изгибе гофрокартона (толщина  $d$ , ширина  $b$ ) по результатам измерения деформации  $\delta$  зависит от прилагаемой нагрузки  $F$  и длины образца  $L$ . Интерес представляет исследование влияния этих факторов на образцах гофрокартона различных марок.

Для эксперимента использовали образцы гофрокартона марок T22 – T25 (картон–лайнер и бумага для гофрирования из первичного волокна на основе целлюлозы высокого выхода (ЦВВ) и полуцеллюлозы (ПЦ) с профилем гофры С (высота гофры – 3,5 мм, шаг гофры – 6,5 мм), соответствующим требованиям ГОСТ 7376–89 [4].

В соответствии с руководством по эксплуатации прибора L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 разработчиками регламентируются следующие условия проведения испытаний на изгиб образцов гофрокартона с профилем гофры С [8]:

Размеры образца, мм:	
ширина.....	100
длина.....	200
толщина.....	3,5...4,5
Нагрузка на сторону, г:	
MD.....	320
CD.....	170
Сопротивление изгибу, Н·м:	
MD.....	15
CD.....	6

Проведение пробных измерений жесткости при изгибе гофрокартона с профилем гофры С показало, что величина измеренной жесткости при изгибе в этих условиях сильно отличается в меньшую сторону от приведенной выше величины. Вероятнее всего эти данные характерны для гофрокартона европейских производителей. В связи с этим возникает необходимость уточнения условий измерения для более достоверной оценки жесткости гофрированного картона при изгибе.

Цель данной работы – оценить влияние прилагаемой нагрузки и длины испытуемого образца на измеряемую жесткость при изгибе на примере трехслойного гофрокартона различных марок.

В таблице представлены результаты измерений жесткости при изгибе гофрированного картона и характеристик анизотропии для гофрокартона низкой (Т-22) и высокой (Т-25) марок.

Жесткость при изгибе в MD направлении в основном зависит от жесткости при изгибе лайнеров, волокна которых ориентированы в направлении MD (вдоль образца). Благодаря преимущественной ориентации волокон в лайнере жесткость при изгибе картона во многом определяется жесткостью

**Жесткость и анизотропия жесткости  
при изгибе гофрокартона марок Т-22 и Т-25**

Марка гофрокартона	Масса груза, г	Длина образца, мм	Жесткость при изгибе, Н·м				Анизотропия жесткости при изгибе				
			$S_b^{MD}$	$S_b^{CD}$	$S_b = \sqrt{S_b^{MD} S_b^{CD}}$	$S_b^a = \frac{S_b^{MD} + S_b^{CD}}{2}$	$\frac{S_b^{MD}}{S_b}$	$\frac{S_b}{S_b^{CD}}$	$\frac{S_b^{MD}}{S_b^a}$	$\frac{S_b^a}{S_b^{CD}}$	$\frac{S_b^{MD}}{S_b^{CD}}$
Т-22	70	100	3,04	0,98	1,73	2,01	1,76	1,76	1,51	2,05	3,11
		150	2,92	0,96	1,68	1,94	1,74	1,74	1,51	2,02	3,03
		200	2,69	0,98	1,63	1,84	1,66	1,66	1,47	1,87	2,73
	160	100	2,77	0,91	1,59	1,84	1,74	1,74	1,51	2,02	3,04
		150	2,84	0,94	1,63	1,89	1,74	1,74	1,50	2,01	3,02
		200	2,63	0,97	1,60	1,80	1,65	1,65	1,46	1,86	2,72
Т-25	70	100	3,99	1,46	2,41	2,72	1,65	1,65	1,46	1,87	2,74
		150	3,59	1,48	2,30	2,53	1,56	1,56	1,42	1,71	2,43
		200	3,54	1,43	2,25	2,49	1,57	1,57	1,42	1,74	2,48
	160	100	3,75	1,39	2,28	2,57	1,64	1,64	1,46	1,85	2,70
		150	3,54	1,41	2,23	2,48	1,58	1,58	1,43	1,76	2,51
		200	3,54	1,39	2,22	2,47	1,60	1,60	1,44	1,77	2,55

волокон, на которые приходится основная нагрузка. Экспериментальные данные, приведенные в таблице, свидетельствуют, что при увеличении длины образца измеряемая жесткость при изгибе снижается, по всей видимости, за счет увеличения в образце количества связей, соединяющих волокна в продольном направлении.

В CD направлении жесткость при изгибе определяется главным образом жесткостью волнистой конструкции, образуемой гофрированным флютингом. При этом вклад лайнеров с поперечной ориентацией волокна незначителен. В результате жесткость при изгибе гофрокартона практически не зависит от длины образца.

Результирующее изменение жесткости при изгибе, как среднее геометрическое, так и среднее арифметическое из значений в направлениях MD и CD, соответствует изменению жесткости в направлении MD. При этом среднее арифметическое значение выше. Преимущество использования среднего геометрического значения выявляется из данных таблицы:  $S_b$  пропорциональна  $S_b^{MD}$ , и  $S_b^{CD}$ .

Обнаружено, что анизотропия жесткости при изгибе зависит от длины образца и марки гофрокартона. Отмечено, что анизотропия гофрокартона низкой марки Т22 (2,7...3,1) выше, чем высокой марки Т25 (2,5...2,7), и снижается с увеличением длины образца, которая становится очень важным фактором.

Влияние длины образца проанализировано на образцах гофрокартона разных марок (от T22 до T25). Длина испытуемого образца составляла 100, 150 и 200 мм, ширина – 100 мм. На рис. 4 представлены результаты измерения жесткости при изгибе гофрокартона в зависимости от длины испытуемого образца ( $l$ ) и приложенной нагрузки ( $S_b$ ).

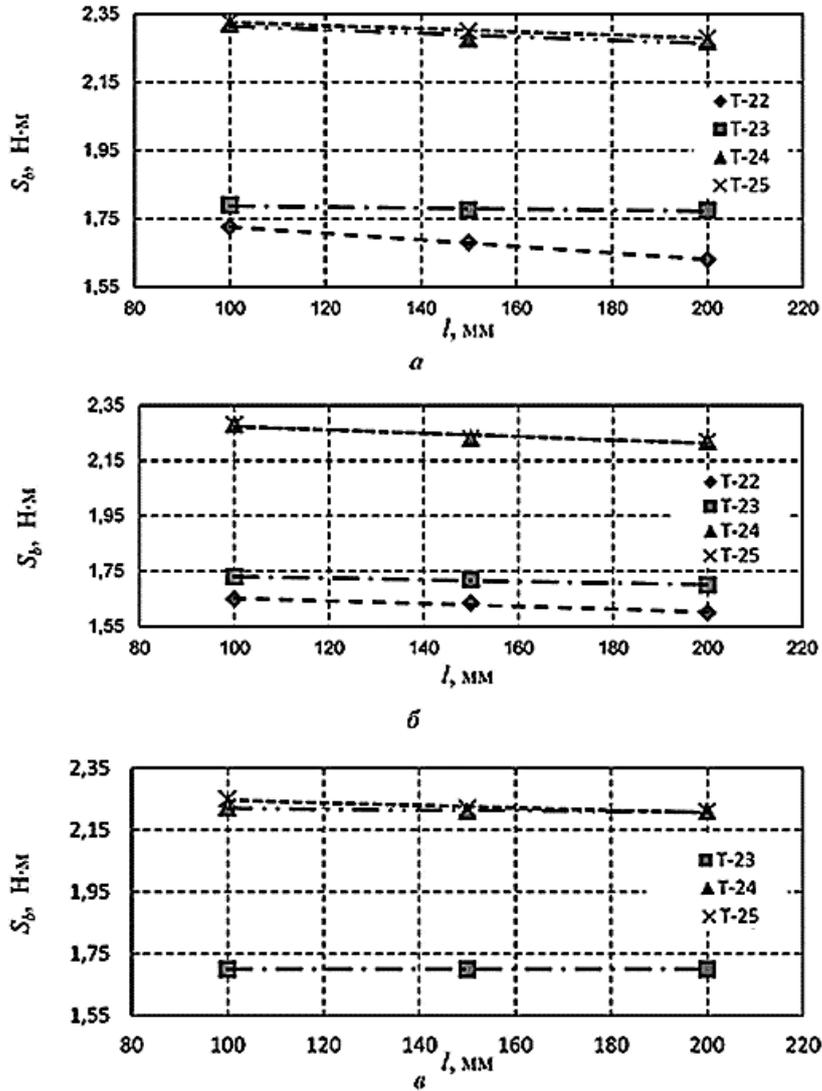


Рис. 4. Влияние длины образца на жесткость при изгибе гофрокартона при различных значениях приложенной нагрузки, г: а – 70; б – 160; в – 220

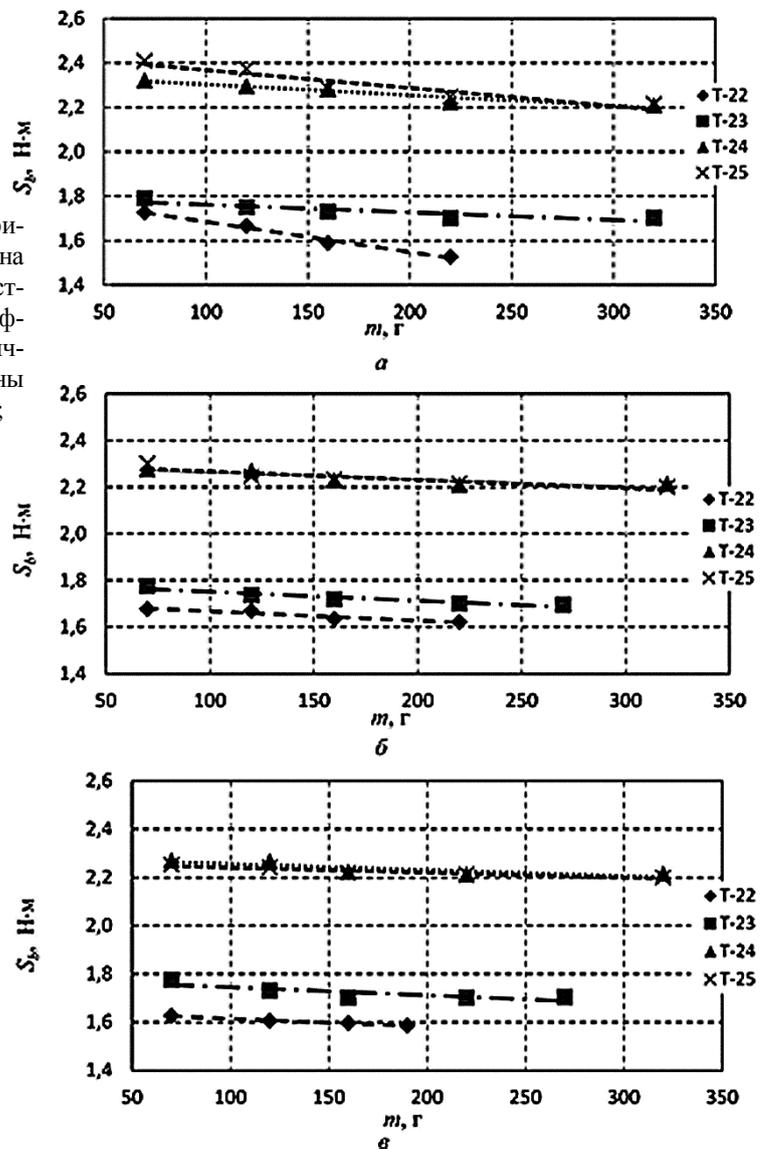
Из данных рис. 4 следует, что с увеличением длины образца жесткость при изгибе гофрокартона снижается, что особенно заметно при низких значе-

ниях прилагаемой нагрузки. С увеличением нагрузки влияние длины образца на жесткость гофрокартона снижается, а при максимальной длине – практически нивелируется.

Выявлено, что при длине 200 мм гофрокартон марки T22 не выдерживает груз массой 220 г и ломается в процессе изгиба, что противоречит рекомендованным в руководстве по эксплуатации значениям. Установлено, что сопротивление изгибу для всех типов испытуемого гофрокартона в несколько раз ниже, чем представления разработчиков прибора.

Зависимость жесткости при изгибе от приложенной нагрузки ( $m$  – масса груза) представлена на рис. 5.

Рис. 5. Влияние приложенной нагрузки на измеряемую жесткость при изгибе гофрокартона при различных значениях длины образца, мм: а – 100; б – 150; в – 200



В соответствии с руководством по эксплуатации [8], измеряя жесткость при изгибе, при испытании в машинном направлении (MD) рекомендовано использовать груз массой 320 г, в поперечном (CD) – 170 г. Результаты эксперимента показали, что рекомендованные руководством значения прилагаемой нагрузки не подходят для испытания трехслойного гофрокартона с профилем гофры С. Обнаружено, что при массе груза свыше 200 г происходит слом гофрокартона низких марок.

Выявлено, что с увеличением приложенной нагрузки (при одной и той же длине испытуемого образца 100 и 200 мм) жесткость при изгибе гофрокартона снижается: для T22 – от 0,10 при длине образца 100 мм до 0,04 Н·м при длине образца 200 мм; для T23 – соответственно от 0,09 до 0,07 Н·м; для T24 – от 0,11 до 0,06 Н·м; T25 – от 0,12 до 0,08 Н·м. Степень снижения жесткости при изгибе уменьшается с ростом длины образца.

Установлено, что при длине образца 200 мм с увеличением нагрузки жесткость при изгибе гофрокартона снижается в наименьшей степени.

Исходя из полученных в ходе проведенного эксперимента данных на приборе Lorentzen&Wettre 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 можно рекомендовать длину испытуемого образца для гофрокартона типа С, равную 200 мм, поскольку в этом случае влияние других факторов практически нивелируется. Прилагаемая нагрузка (масса грузов) зависит от марки гофрокартона: для T22 рекомендуется 120 г, для T25 – 220 г.

#### *Выводы*

1. Условия проведения испытаний влияют на величину жесткости гофрокартона при изгибе: увеличение длины образца и прилагаемой нагрузки приводит к снижению жесткости при изгибе.

2. Анизотропия жесткости при изгибе гофрокартона низкой марки T22 (2,7...3,1) выше, чем высокой марки T25 (2,5...2,7), при этом она уменьшается с увеличением длины образца.

3. Оптимальные условия для проведения испытаний гофрокартона типа С на изгиб с применением прибора Lorentzen&Wettre 4-point Bending Stiffness Tester SE 108: длина испытуемого образца – 200 мм; прилагаемая нагрузка для T22 – 120 г, для T25 – 220 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 7376–89. Картон гофрированный. Общие технические условия. Введ. 01.01.91.

2. Казаков Я.В., Гурьев А.В., Комаров В.И., Крыжановский А.О. Журавлева А.Н. Жесткость при изгибе гофрокартона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 6. С. 50–52.

3. *Комаров В.И.* Деформативность целлюлозно-бумажных материалов при изгибе // Лесн. журн. 1994. № 1. С. 96–103. (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. 133–142. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. *Комаров В.И., Гурьев А.В., Елькин В.П.* Механика деформирования целлюлозных тароупаковочных материалов: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 175 с.
6. *Комаров В.И., Ларина Е.Ю.* Расчет жесткости при изгибе волокнистых целлюлозно-бумажных материалов с учетом пластической деформации в сжатой зоне в плоскости листа // Лесн. журн. 2009. № 4. С. 106–110. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Ларина Е.Ю., Комаров В.И.* Влияние пластических деформаций по толщине и в плоскости листа, возникающих при испытании на изгиб, на величину измеряемой характеристики // Лесн. журн. 2010. № 4. С. 89–95. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Прибор L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 018 для определения сопротивления образцов изгибу. Руководство по эксплуатации. Lorentzen & Wettre, 1999. 27 с.
9. *Смолин А.С., Комаров В.И., Дубовый В.К., Белоглазов В.И.* Технология гофрокартона: учеб. пособие. Ч. I. СПб.: СПбГГТУРП, 2014. 146 с.
10. *Blechsmidt J.* Papierverarbeitungstechnik. Dresden, 2012. 576 S.
11. *Markstrom H.* Testing Methods and Instruments for Corrugated Board. Elanders Tofters AB, 1999. 103 p.

Поступила 13.05.15

УДК 676.274

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.155

### Measurement of Bending Stiffness of Corrugated Board

*E.Yu. Larina, Candidate of Engineering*

*Ya.V. Kazakov, Candidate of Engineering*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: ketrin@bk.ru, j.kazakov@narfu.ru

The corrugated boxes are a very common type of packaging. The standard and additional features of corrugated board, primarily the bending stiffness are used in order to predict their behavior under operating conditions. The 4-point method is more valid of all the methods of measuring the bending stiffness of corrugated board. The information on the use of it is currently insufficient. The paper presents a method of measuring the stiffness of corrugated board with the 4-point bending mode on the device “L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108”. The analysis of the factors affecting on the test results is carried out on the samples of C-flute single-wall corrugated board of different brands of T22 to T25. The influence

of the sample length within the range from 100...200 mm and a loaded weight in the range from 70...220 grams is studied. The advantage of acceptance as a result of the geometric mean of bending stiffness, measured in the machine (MD) and cross machine (CD) directions is shown. It is established experimentally that the increasing the length of the sample and the applied load decreased bending stiffness of corrugated board. The greatest impact of the sample length affects at the low values of the applied load and the effect of the applied load – at a small length of the sample. It is found that the anisotropy of bending stiffness of corrugated board of the low grade T22 (2.7...3.1) was higher than that of the high grade T25 (2.5...2.7). The anisotropy of bending stiffness decreases with the increasing of the sample length. For the accurate and reliable measurement the length of the test sample of corrugated board should be at least 200 mm, as in this case the influence of other factors almost has no effect. The magnitude of the applied load depends on the brand of corrugated board and should be within the range from 120...220 grams. The results can improve the accuracy of the assessment of corrugated board quality and provide a more reliable prediction of the properties of the corrugated boxes.

*Keywords:* corrugated board, bending, bending resistance, bending stiffness.

#### REFERENCES

1. GOST 7376–89. Karton gofirovanny. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 7376-89. Corrugated Board. General Specifications]. Moscow, 1991.
2. Kazakov Ya.V., Gur'ev A.V., Komarov V.I., Kryzhanovskiy A.O. Zhuravleva A.N. Zhestkost' pri izgibe gofrokartona [Bending Stiffness of Corrugated Board]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Board], 2006, no. 6, pp. 50–52.
3. Komarov V.I. Deformativnost' tsellyulozno-bumazhnykh materialov pri izgibe [Strain Capacity of Pulp and Paper Materials under Bending]. *Lesnoy zhurnal*, 1994, no. 1, pp. 96–103.
4. Komarov V.I. Zhestkost' pri izgibe tsellyulozno-bumazhnykh materialov. Analiz metodov izmereniya i vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov [Bending Stiffness of Pulp and Paper Materials. Analysis of the Measuring Methods and the Impact of Technological Factors]. *Lesnoy zhurnal*, 1994, no. 3, pp. 133–142.
5. Komarov V.I., Gur'ev A.V., El'kin V.P. *Mekhanika deformirovaniya tsellyuloznykh taroupakovochnykh materialov* [Mechanics of Deformation of Cellulose Packaging Materials]. Arkhangelsk, 2002. 175 p.
6. Komarov V.I., Larina E.Yu. Raschet zhestkosti pri izgibe voloknistykh tsellyulozno-bumazhnykh materialov s uchetom plasticheskoy deformatsii v szhatoy zone v ploskosti lista [Calculation of the Bending Stiffness of Fibrous Pulp and Paper Materials with Regard to Plastic Deformation in the Compression Region in the Sheet Plane]. *Lesnoy zhurnal*, 2009, no. 4, pp. 106–110.
7. Larina E.Yu., Komarov V.I. Vliyanie plasticheskikh deformatsiy po tolshchine i v ploskosti lista, vznikayushchikh pri ispytanii na izgib, na velichinu izmeryaemoy kharakteristiki [Effect of Plastic Deformation in Thickness and Paper Sheet Plane Occurring in Bending on Measured Parameter Value]. *Lesnoy zhurnal*, 2010, no. 4, pp. 89–95.

8. *L&W 4-Point Bending Stiffness Tester. Manual.* Available at: <http://l-w.com/produkt/lw-4-point-bending-stiffness-tester>.
9. Smolin A.S., Komarov V.I., Dubovyy V.K., Beloglazov V.I. *Tekhnologiya go-frokartona. Chast' 1* [Technology of Corrugated Board. Part I]. Saint Petersburg, 2014. 146 p.
10. Blechschmidt J. *Papierverarbeitungstechnik.* Dresden, 2012. 576 p.
11. Markstrom H. *Testing Methods and Instruments for Corrugated Board.* Elanders Tofters AB, 1999. 103 p.

Received on May 13, 2015

---

---