

УДК 676.273.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.160

## **ВЛИЯНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ФОРМОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАТИВНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КАРТОНА\***

*В.В. Гораздова, асп.*

*Е.В. Дернова, канд. техн. наук, доц.*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;  
e-mail: v.gorazdova@narfu.ru, e.dernova@narfu.ru

Многослойное формование улучшает многие прочностные свойства картона. Целью настоящего исследования является изучение многослойного формования картона как одного из факторов повышения и регулирования его прочности, деформативности и трещиностойкости. Подобные исследования применительно к массовым видам картона проводились еще в 90-х гг. прошлого века А.С. Смолиным и Г.З. Аксельродом. В настоящей работе особое внимание уделено современным и актуальным на сегодняшний день характеристикам упаковочных видов картона: сопротивлению сжатию по методу SCT, энергии внутренних связей по Скотт–Бонду и сопротивлению развитию трещин. Представлены результаты испытаний модельных образцов картона широкого диапазона композиций по волокну с использованием как первичных (беленых и небеленых) полуфабрикатов нормального и высокого выхода, так и вторичных волокон. Продемонстрирована возможность моделирования многослойного формования, позволяющего целенаправленно изменять физико-механические характеристики и получать материалы с заданными потребительскими свойствами.

*Ключевые слова:* многослойный картон, целлюлоза высокого выхода, полуцеллюлоза, лиственная и хвойная беленая целлюлоза, макулатура, прочность, деформативность, трещиностойкость.

### *Введение*

Известно, что прочность целлюлозно-бумажных материалов, и в частности картона, по сравнению с однослойным формованием возрастает как при

---

\*Статья подготовлена по материалам IV Международной научно-технической конференции «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», посвященной памяти проф. В.И. Комарова (Архангельск, 14–16 сент. 2017 г.).

Исследования выполнены на оборудовании инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета им. М. В. Ломоносова при финансовой поддержке Минобрнауки России.

*Для цитирования:* Гораздова В.В., Дернова Е.В. Влияние многослойного формования на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости картона // Лесн. журн. 2017. № 6. С. 160–169. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.160

увеличении его массы  $1 \text{ м}^2$ , так и при формировании в несколько слоев. Много-слойное формирование улучшает многие прочностные свойства картона без повышения массы  $1 \text{ м}^2$  за счет сочетания более пухлого внутреннего слоя листа с уплотненными прочными наружными слоями. Это объясняется тем, что в одно-слойном листе имеются локальные участки полотна с меньшей массой  $1 \text{ м}^2$ , по которым оно разрушается в случае приложения соответствующих нагрузок. С увеличением числа элементарных слоев вероятность наложения друг на друга этих слабых участков снижается, происходит выравнивание полотна по массе. Картон становится более равномерным по плотности и имеет более высокие прочностные характеристики. Таким образом, варьированием количества и качества слоев можно влиять на характеристики прочности и деформативности целлюлозно-бумажных материалов [15, 16].

В условиях конкуренции на рынке товаров народного потребления упаковка выполняет не только утилитарную функцию обеспечения сохранности товара, но и становится маркетинговым инструментом в борьбе за внимание потребителя.

Среди упаковочных картонов выделяют две основные группы. К первой группе относят материалы для производства гофрированного картона – картон для плоских слоев (картон-лайнер) и бумага для гофрирования (флютинг), ко второй – материалы, предназначенные для изготовления потребительской тары (коробок, пачек и др.).

Упаковочные виды картона должны отвечать таким основным требованиям, как высокая жесткость, каркасность, барьерные свойства, прочность.

Типичная структура его имеет несколько слоев:

мелованный – один или несколько (чаще два) слоев мелования;

верхний – один или несколько слоев из качественного первичного сырья;

средний – достаточно толстый слой из дешевого сырья (макулатура, механическая масса, небеленая целлюлоза, различные отходы производства), что дает возможность снизить стоимость картона без ухудшения его барьерных свойств;

нижний – один или несколько слоев качественного сырья (беленая целлюлоза, небеленая целлюлоза, древесная масса, макулатура).

Известно, что качество сырья снижается сверху до среднего слоя и возрастает от него вниз.

Картоны, содержащие макулатуру, несколько дешевле, однако они, как правило, менее жесткие. Целлюлоза повышенной прочности (крафт) используется для увеличения уровня жесткости картона, его прочности и влагостойкости [1, 11–13].

#### *Объекты и методы исследования*

Для оценки влияния многослойного формирования на физико-механические характеристики картона изготавливали модельные одно-, двух-, трех- и четырехслойные образцы. Общая масса образцов, независимо от количества элементарных слоев, составляла  $200 \text{ г/м}^2$ . Следовательно, при моделировании

двухслойных образцов масса каждого элементарного слоя – 100 г/м<sup>2</sup>, трехслойных – 66,7 г/м<sup>2</sup>, четырехслойных – 50 г/м<sup>2</sup>.

В лабораторных условиях изготавливали многослойные образцы картона при использовании следующих композиций слоев по волокну:

полуфабрикаты высокого выхода (ПВВ) – смесь хвойной целлюлозы высокого выхода и лиственной полуцеллюлозы при степени помола 18 и 24 °ШР и соотношении 30 : 70 соответственно;

беленые виды целлюлозы (БЦ) – смесь лиственной и хвойной сульфатных беленых целлюлоз при степени помола 30 °ШР и соотношении 50 : 50;

макулатура марки МС-5Б (М) при степени помола 30 °ШР.

Размол полуфабрикатов проводили в лабораторной мельнице Йокро.

Лабораторные образцы из предварительно подготовленной волокнистой массы изготавливали в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 [6] на листоотливном аппарате типа Rapid-Köthen BBS-2 Estanit.

Для определения стандартных показателей качества лабораторных образцов использовали следующие методы:

толщина образцов (ГОСТ 27015–86 [4]);

прочность на разрыв и удлинение при растяжении (ГОСТ 13525.1–79 [2]) на лабораторном испытательном комплексе, включающем разрывную машину ТС 101-0,5 (г. Иваново) и ПЭВМ с программным обеспечением Комплекс для математической обработки индикаторной диаграммы «нагрузка–удлинение», позволяющим рассчитывать такие характеристики, как деформация разрушения ( $\epsilon_p$ , %) и разрывная длина ( $L$ , м);

прочность на излом при многократных перегибах ( $N$ , ч. д. п.) на приборе Frank-PTI (ГОСТ 13525.2–80 [3]);

сопротивление продавливанию ( $\Pi$ , кПа) на приборе Lorentzen & Wettre (ГОСТ 13648.6–86 [5]);

сопротивление сжатию по кольцу (RCT, Н) на приборе Frank-PTI (ГОСТ 10711–97 [8]);

сопротивление торцевому сжатию (CCT, кН/м) на приборе Frank-PTI (ГОСТ 28686–90 [7]);

энергия внутренних связей по Скотт–Бонду (Scott, Дж/м<sup>2</sup>) на приборе Frank-PTI (ГОСТ 32096–2013 [10]);

сопротивление сжатию на коротком расстоянии между зажимами (SCT, кН/м) на приборе Frank-PTI (ГОСТ Р ИСО 9895–2013 [9]);

трещиностойкость (FT, Дж/м) на приборе Lorentzen & Wettre (ISO/TS 17958:2013 [14–17]).

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

При моделировании многослойных образцов картона внутренние слои изготавливали из наиболее дешевого и низкокачественного сырья (макулатура или полуфабрикаты высокого выхода), наружные слои – из высококачественных первичных полуфабрикатов, чаще из беленых целлюлоз.

Результаты испытаний представлены на рис. 1.

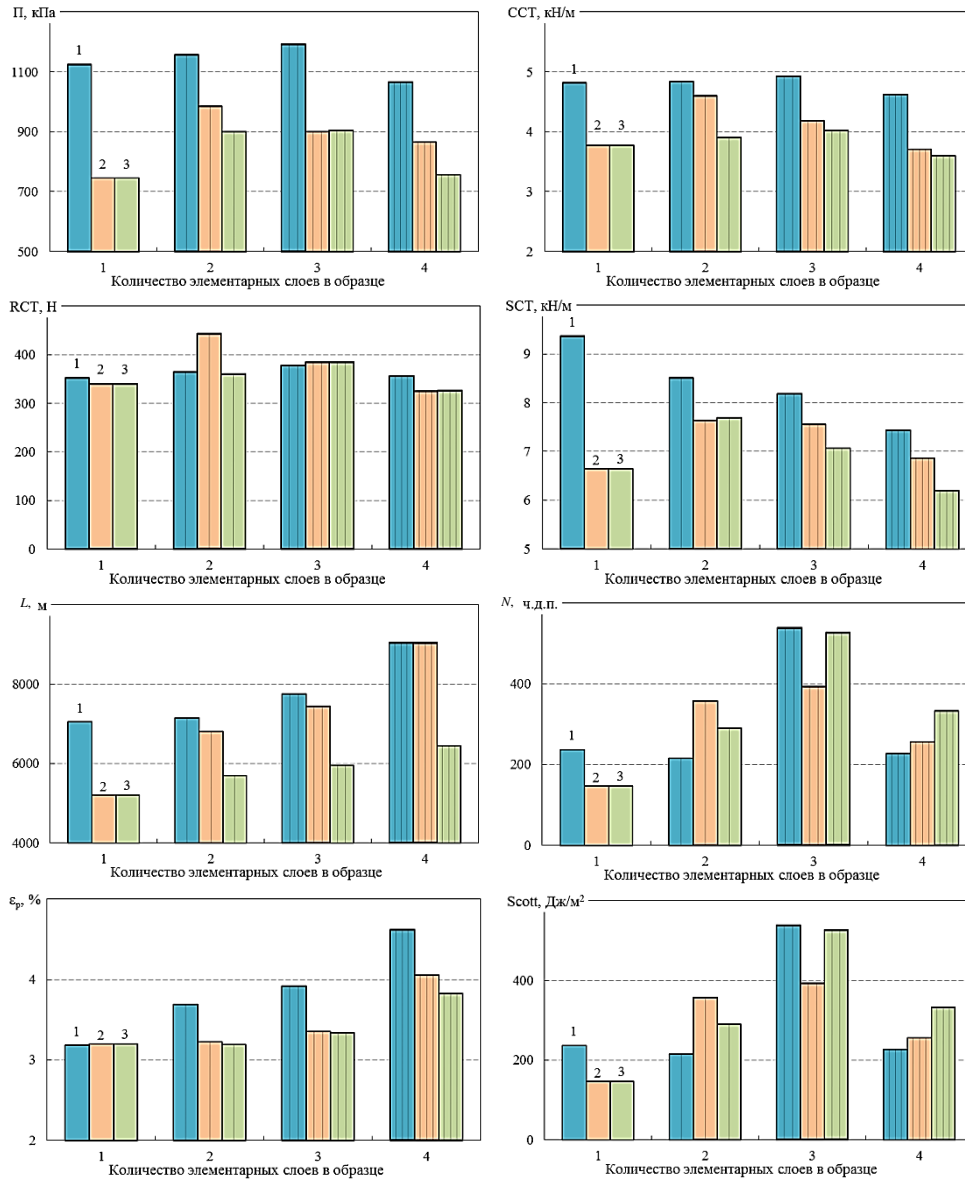


Рис. 1. Влияние количества слоев на физико-механические показатели картона:  
 1 – ПВВ + БЦ; 2 – ПВВ + М; 3 – БЦ + М

Установлено, что увеличение количества элементарных слоев в образцах картона, изготовленных только из первичных волокон (вариант 1 – ПВВ + БЦ), благоприятно влияет на характеристики прочности и деформативности. Известно, что с увеличением (до определенного предела) количества слоев в

материале обеспечивается повышение равномерности просвета за счет наложения друг на друга слабых участков и выравнивания полотна по массе. Следовательно, картон становится более равномерным по плотности и имеет высокие прочностные характеристики.

Так, переход от одно- к многослойным образцам приводит к повышению разрывной длины на 28 %, деформации разрушения – на 45 %, сопротивления торцевому сжатию и сжатию по кольцу – на 2 и 7 % соответственно.

Энергия внутренних связей по Скотт–Бонду (Scott) при увеличении количества элементарных слоев в композиции картона также несколько повышается, что, по-видимому, обусловлено улучшением сцепления слоев в z-направлении при снижении их толщины.

Вместе с тем сопротивление сжатию по методу SCT у однослойных образцов существенно выше, чем у многослойных, вероятно, за счет увеличения влияния межслоевых контактов.

В целом по многим качественным показателям оптимальными с точки зрения уровня значений являются трехслойные образцы. Увеличение количества элементарных слоев до четырех приводит к снижению характеристик. К таким характеристикам относятся стандартные показатели качества картона. Во-первых, в данном случае при увеличении многослойности картона начинает преобладать влияние уменьшения межслоевых контактов; во-вторых, необходимо учитывать, что в условиях лабораторного отлива образцов (по сравнению с промышленными условиями формования на картоноделательной машине) соединение слоев происходит при более высокой сухости, а прессование производится при низком нерегулируемом давлении; в-третьих, при приложении сжимающих нагрузок на торцевых плоскостях образца возникают концентрации напряжений, которые в совокупности с увеличением межслоевых контактов при многослойном формовании приводят к снижению значений показателей.

При замене в композиции картона небеленых ПВВ на макулатуру (вариант 3 – БЦ + М) можно констатировать следующее.

Динамика изменения характеристик прочности, жесткости и деформативности при переходе от одно- к многослойным образцам аналогична предыдущему варианту, но более выражена с точки зрения прироста значений показателей. Это связано в большей степени с тем, что в качестве однослойного образца в данном случае рассматривается картон из 100 %-й макулатуры. Переход к многослойным образцам и, следовательно, включение в состав элементарного покровного слоя из беленого волокна приводит к закономерному повышению значений показателей на 7...20 %.

При этом необходимо отметить, что уровень всех рассматриваемых характеристик в случае использования в композиции макулатуры закономерно на 16...25 % ниже по сравнению с предыдущим вариантом.

Результаты испытаний образцов варианта 2 – (ПВВ + М), в свою очередь, занимают промежуточное положение между рассмотренными ранее. В этом

случае с позиции характеристик прочности закономерно трехслойный образец прочнее двухслойного. Во-первых, при трехслойной структуре доля макулатуры в общей массе картона ниже, чем в двухслойном образце (масса каждого элементарного слоя двухслойных образцов составляет 100 г, а трехслойных – 66,7 г). Во-вторых, более предпочтительным является расположение слоев, когда более прочные слои располагаются сверху и снизу, а менее прочный полуфабрикат – в середине структуры материала. Это связано с тем, что наибольшие нагрузки действуют на целлюлозно-бумажный материал при изгибе, поэтому более прочные первичные полуфабрикаты и должны располагаться в наружных слоях.

С точки зрения комплекса характеристик сопротивления сжатию оптимальными являются двухслойные образцы. В случае рассмотрения трехслойных образцов, даже при снижении общей доли макулатурного волокна в композиции, наблюдается ухудшение показателей их качества. Это обусловлено возрастанием влияния перенапряжений, возникающих на границе раздела фаз между элементарными слоями, обладающими существенно отличающимися друг от друга свойствами (макулатурное волокно и грубое первичное волокно высокого выхода). И, как уже было отмечено ранее, увеличение межслоевых контактов также приводит к снижению жесткости материала.

При рассмотрении такого показателя, как трещиностойкость, особенно актуального на сегодняшний день для производителей тары и упаковки, отмечено следующее.

Трещиностойкость однослойных образцов картона из макулатуры на 19 % выше, чем у аналогичных образцов из первичных полуфабрикатов. Повышение трещиностойкости при переходе к трехслойной структуре образцов из первичных волокон лишь приближает значения данной характеристики к начальному уровню для макулатурных образцов. Данный факт обусловлен повышенной грубостью первичных волокон ПВВ по сравнению с более равномерными и разработанными вторичными волокнами макулатуры. Следовательно, при изготовлении образцов картона из вторичного сырья количество потенциальных локальных источников зарождения дефектов в структуре минимизируется. Вместе с тем повышение количества элементарных макулатурных слоев в образцах приводит к планомерному снижению их трещиностойкости (рис. 2, в), но оно менее выражено, чем для картона из жесткого первичного волокна (рис. 2, а). Результаты, полученные для образцов со смешанной композицией, занимают промежуточное положение (рис. 2, б).

Улучшить ситуацию можно путем увеличения степени разработки волокон. Например, повышение степени помола макулатуры от 30 до 35 °ШР приводит к приросту значений трещиностойкости четырехслойных образцов на 20 % (рис. 2, г), что превышает начальный уровень данного показателя для однослойного картона.

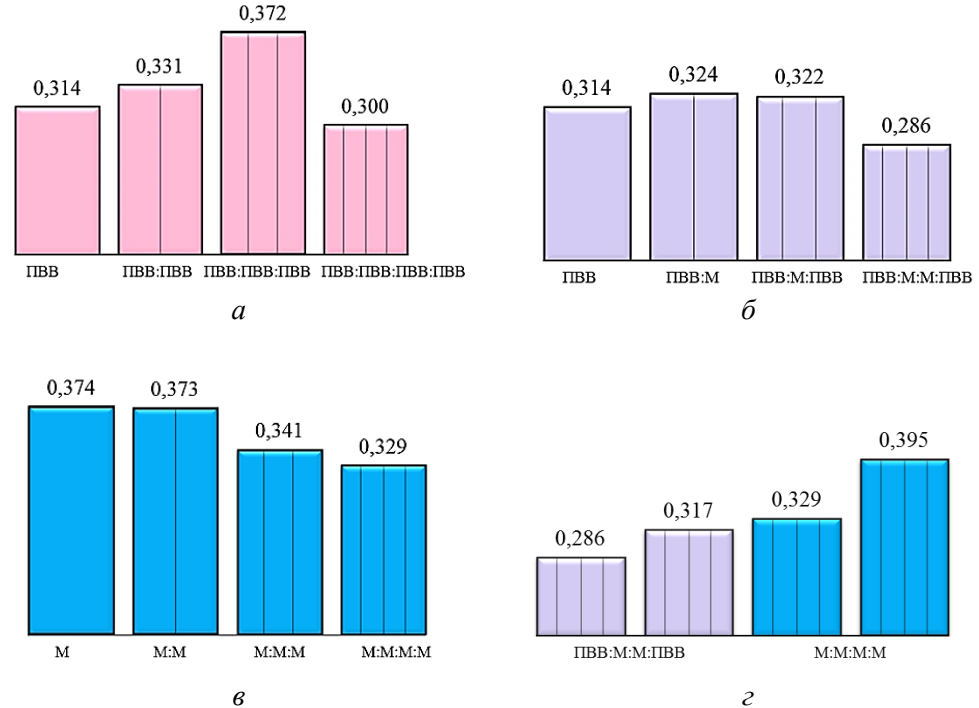


Рис. 2. Трещиностойкость картона: а – смесь полуфабрикатов высокого выхода; б – смесь полуфабрикатов высокого выхода и макулатуры; в – 100 %-я макулатура; г – четырехслойные образцы при увеличении степени помола полуфабрикатов

Для образцов смешанной композиции повышение степени помола полуфабрикатов (рис. 2, г) от 18 до 22 °ШР для целлюлозы высокого выхода и от 24 до 28 °ШР для полуцеллюлозы также положительно сказывается на трещиностойкости. Однако большое количество межслоевых контактов при наличии грубых жестких волокон ПВВ является ограничивающим фактором и не позволяет существенно повысить устойчивость структуры к развитию трещин относительно исходного уровня.

В целом прочностные свойства многослойных образцов картона зависят от прочности отдельных элементарных слоев, но вклад каждого различен. Свойства наружных слоев оказывают большее влияние на деформативность, чем на прочность картона. В то же время при сопротивлении различным видам нагрузок ведущая роль принадлежит внутренним слоям.

#### Заключение

1. Представлена возможность моделирования (варьирования) количества и качества элементарных слоев картона для достижения требуемых показателей физико-механических свойств.

2. Показано, что при увеличении в композиции доли более дешевых видов материалов (например, макулатуры) многослойное формование позволяет регулировать качество картона без повышения массы 1 м<sup>2</sup> продукции.

3. Продемонстрировано, что характеристики качества многослойных образцов картона зависят от свойств отдельных элементарных слоев, но вклад каждого различен. Свойства наружных слоев оказывают большее влияние на деформативность, чем на прочность картона. В то же время при сопротивлении различным видам нагрузок ведущая роль принадлежит внутренним слоям.

4. На примере четырехслойных образцов продемонстрирована возможность увеличения трещиностойкости за счет прироста степени помола полуфабрикатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабаевский П.Г., Кулик С.Г.* Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. М.: Химия, 1991. 336 с.
2. ГОСТ 13525.1–79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении. Взамен ГОСТ 13525.1–68. Введ. 1980–01–07. М.: Стандартиформ, 2007. 5 с.
3. ГОСТ 13525.2–80. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на излом при многократных перегибах. Взамен ГОСТ 13525.2–68. Введ. 1981–30–06. М.: Стандартиформ, 2007. 4 с.
4. ГОСТ 27015–86. Бумага и картон. Методы определения толщины, плотности и удельного объема. Взамен ГОСТ 13199–67, ГОСТ 12432–77. Введ. 1988–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 4 с.
5. ГОСТ 13648.6–86. Бумага и картон. Методы определения сопротивления раслаиванию. Взамен ГОСТ 13648.6–82. Введ. 1986–12–02. М.: Стандартиформ, 1986. 7 с.
6. ГОСТ 14363.4–89. Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям. Взамен ГОСТ 14363.4–79. Введ. 1993–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1993. 14 с.
7. ГОСТ 28686–90. Бумага для гофрирования. Метод определения сопротивления торцевому сжатию (ССТ) гофрированного образца. Введ. 1992–01–01. М.: Стандартиформ, 2005. 4 с.
8. ГОСТ 10711–97. Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца (RCT). Взамен ГОСТ 10711–74. Введ. 2003–01–01. М.: Стандартиформ, 2003. 8 с.
9. ГОСТ Р ИСО 9895–2013. Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами (SCT). Введ. 2015–01–01. М.: Стандартиформ, 2014. 12 с.
10. ГОСТ 32096–2013. Картон тароупаковочный для пищевой продукции. Взамен ГОСТ 9421–80. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартиформ, 2014. 24 с.
11. *Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И., Блинова Л.А.* Свойства целлюлозных волокон и их влияние на физико-механические характеристики бумаги и картона / под ред. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2011. 176 с.
12. *Комаров В.И., Гурьев А.В., Елькин В.П.* Механика деформирования целлюлозных тароупаковочных материалов: учеб. пособие. Архангельск: АГТУ, 2002. 171 с.
13. *Смолин А.С., Аксельрод Г.З.* Технология формования бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 121 с.



14. ISO/TS 17958:2013. Paper and Board. Determination of Fracture Toughness. Constant Rate of Elongation Method (1.7 mm/s). 2013. 16 p.
15. Mäkelä P., Fellers C. An Analytic Procedure for Determination of Fracture Toughness of Paper Materials // Nordic Pulp Paper Res. J. 2012. Vol. 27, iss. 2. Pp. 352–361.
16. Muhonen P. Brittleness of Paper: MSc Thesis. Lappeenranta, Finland, 2013. 110 p.
17. SCAN-P77:95. Papers and Boards. Fracture Toughness. Scandinavian Pulp, Paper and Board. Testing Committee, 1995. 8 p.

Поступила 16.09.17

UDC 676.273.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.160

### **The Influence of Multilayer Formation on Strength, Deformation and Fracture Toughness Characteristics of Board**

*V.V. Gorazdova, Postgraduate Student*

*E.V. Dernova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

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

Multilayer formation improves many strength properties of cardboard. The goal of research is to study the multilayer formation of cardboard as one of the factors of increasing and regulating its strength, deformability and fracture toughness. Smolin A.S. and Aksel'rod G.Z. carried out similar studies with respect to the mass types of cardboard in the 90's in the last century. The authors of the paper pay particular attention to the current characteristics of packaging cardboard types: compressive strength by the SCT method, internal bond strength (Scott type), and fracture toughness. The paper presents the test results of model cardboard samples of a wide range of fiber furnish using both primary (bleached and unbleached) normal and high yield semi-finished products and secondary fibers. The multilayer formation modeling, which allows us to change physico-mechanical characteristics purposefully and to obtain materials with prescribed useful qualities, is demonstrated.

*Keywords:* combined cardboard, high-yield pulp, semichemical pulp, hardwood and softwood bleached pulp, waste paper, strength, deformability, fracture toughness.

#### REFERENCES

1. Babaevskiy P.G., Kulik S.G. *Treshchinostoykost' otverzhdennykh polimernykh kompozitsiy* [Crack Resistance of Cured Polymer Compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 336 p. (In Russ.)
2. *GOST 13525.1–79. Polufabrikaty voloknistyye, bumaga i karton. Metod opredeleniya prochnosti na razryv i udlinenie pri rastyazhenii* [State Standard 13525.1–79. Fibre Semimanufactures, Paper and Board. Tensile Strength and Elongation Tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 5 p. (In Russ.)

---

*For citation:* Gorazdova V.V., Dernova E.V. The Influence of Multilayer Formation on Strength, Deformation and Fracture Toughness Characteristics of Board. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 6, pp. 160–169. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.160

3. GOST 13525.2–80. *Polufabrikaty voloknistye, bumaga i karton. Metod opredeleniya prochnosti na izlom pri mnogokratnykh peregibakh* [State Standard 13525.2–80. Fibre Semimanufactures, Paper and Board. Method for Determination of Breaking Strength]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 4 p. (In Russ.)
4. GOST 27015–86. *Bumaga i karton. Metody opredeleniya tolshchiny, plotnosti i udel'nogo ob"ema* [State Standard 27015–86. Paper and Board. Methods for Determining Thickness, Density and Specific Volume]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 4 p. (In Russ.)
5. GOST 13648.6–86. *Bumaga i karton. Metody opredeleniya soprotivleniya rasslavyaniyu* [State Standard 13648.6–86. Paper and Cardboard. Methods of Splitting Strength Determination]. Moscow, Standartinform Publ., 1986. 7 p. (In Russ.)
6. GOST 14363.4–89. *Tsellyuloza. Metod podgotovki prob k fiziko-mekhanicheskim ispytaniyam* [State Standard 14363.4–89. Pulp. Preparation of Samples for Physical and Mechanical Tests]. Moscow, Standartinform Publ., 1993. 14 p. (In Russ.)
7. GOST 28686–90. *Bumaga dlya gofrirovaniya. Metod opredeleniya soprotivleniya tortsevomu szhatiyu (CCT) gofrirovannogo obraztsa* [State Standard 28686–90. Corrugating Paper. Method for Determination of Corrugating Resistance to Edge Compression]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 4 p. (In Russ.)
8. GOST 10711–97. *Bumaga i karton. Metod opredeleniya razrushayushchego usiliya pri szhatii kol'tsa (RCT)* [State Standard 10711–97. Paper and Board. Method for Determination of Breaking Force by Ring Compression (RCT)]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 8 p. (In Russ.)
9. GOST R ISO 9895–2013. *Bumaga i karton. Opredelenie soprotivleniya szhatiyu. Metod ispytaniya na korotkom rasstoyanii mezhdu zazhimami (SCT)* [State Standard R ISO 9895–2013. Paper and Board. Compressive Strength. Short-Span Test]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p. (In Russ.)
10. GOST 32096–2013. *Karton taroupakovochnyy dlya pishchevoy produktsii* [State Standard 32096–2013. Packaging Paperboard for Food Products. General Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 24 p. (In Russ.)
11. Dul'kin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I., Blinova L.A. *Svoystva tsellyuloznykh volokon i ikh vliyanie na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki bumagi i kartona* [Properties of Cellulose Fibers and Their Influence on Physical and Mechanical Characteristics of Paper and Paperboard]. Ed. by V.I. Komarov. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011. 176 p. (In Russ.)
12. Komarov V.I., Gur'ev A.V., El'kin V.P. *Mekhanika deformirovaniya tsellyuloznykh taroupakovochnykh materialov* [Mechanics of Deformation of Cellulosic Packaging Materials]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 171 p. (In Russ.)
13. Smolin A.S., Aksel'rod G.Z. *Tekhnologiya formovaniya bumagi i kartona* [The Forming Technology of Paper and Cardboard]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 121 p. (In Russ.)
14. ISO/TS 17958:2013. *Paper and Board. Determination of Fracture Toughness. Constant Rate of Elongation Method (1.7 mm/s)*. 2013. 16 p.
15. Mäkelä P., Fellers C. An Analytic Procedure for Determination of Fracture Toughness of Paper Materials. *Nordic Pulp Paper Res. J.*, 2012, vol. 27, iss. 2, pp. 352–361.
16. Muhonen P. *Brittleness of Paper*: MSc Thesis. Lappeenranta, Finland, 2013. 110 p.
17. SCAN-P77:95. *Papers and Boards. Fracture Toughness*. Scandinavian Pulp, Paper and Board. Testing Committee, 1995. 8 p.

Received on September 16, 2017