

УДК 676.274

**О ВЗАИМОСВЯЗИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ И ПРОЧНОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕСТЛАЙНЕРА**

Галимзянова Алина Рамисовна,
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, E-mail: alinagalimzianowa@yandex.ru

Казаков Яков Владимирович,
д-р техн. наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, E-mail: j.kazakov@narfu.ru

Лавров Игорь Валентинович,
канд. техн. наук, зам. главного технолога,
ООО «Сухонский картонно-бумажный комбинат»,
г. Сокол, E-mail: ig.lavrov@yandex.ru

Ключевые слова: тестлайнер, жесткость, формование, анизотропия, корреляция, прогнозирование.

Аннотация. Представлена возможность прогнозирования сопротивления продавливанию тестлайнера с применением линейных многофакторных регрессионных моделей по характеристикам, полученных неразрушающими методами исследования: ультразвуковым методом определения анизотропии жесткости при растяжении на приборе L&W TSO Tester и оптическим методом оценки неоднородности структуры на анализаторе формования PTA-Line Formation Tester. Для прогнозирования использована специально разработанная программа для ЭВМ.

**ON THE RELATIONSHIP OF NON-DESTRUCTIVE AND STRENGTH
CHARACTERISTICS OF TESTLINER**

Galimzyanova Alina Ramisovna,
master student, Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, E-mail: alinagalimzianowa@yandex.ru

Kazakov Yakov Vladimirovich,
holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences,, Associate Professor,
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Arkhangelsk, E-mail: j.kazakov@narfu.ru

Lavrov Igor Valentinovich,
Ph.D. of Engineering Sciences, deputy Chief Technologist, Sukhona Cardboard
and Paper Mill LLC, Sokol, E-mail: ig.lavrov@yandex.ru

Key words: cardboard testliner, stiffness, formation, anisotropy, correlation, forecasting.

Abstract. The relationship between the bursting strength of the testliner and characteristics obtained by non-destructive methods of investigation are presented. Ultrasonic method for determining the tensile stiffness anisotropy on L&W TSO Tester and optical method of evaluating the heterogeneity of the structure on the PTA-Line Formation Tester are used. The possibility to predict the strength of kraft liner using multivariate linear regression models is presented. For forecasting the specially designed computer program was used.

Для производителей картона очень важно быстро получить информацию о качестве произведенной продукции, чтобы в случае необходимости быстро ввести корректировки в технологический процесс. Предпочтение отдается on-line системам, в которых применяются неразрушающие методы, реализованные в сканирующей системе профилеров. Эти методы в настоящее время используются для измерения массы 1 м^2 , влажности и толщины картона или бумаги в режиме на КДМ, производящих картон-лайнер и флютинг. Однако, проблема быстрой и достоверной оценки величины механических свойств картона до сих пор до конца не решена.

Для картона очень важны показатели механической прочности – абсолютное сопротивление продавливанию, разрушающее усилие при сжатии кольца RCT, сопротивление сжатию короткого образца SCT, жесткость при изгибе. Для определения полного набора стандартных механических характеристик картона требуется несколько часов, в течение которых необходимо выполнить отбор образцов с тамбура КДМ в виде нескольких кусков полотна или среза с тамбура, провести кондиционирование, нарезку образцов, испытания и расчеты. То есть технолог получает информацию о качестве продукции с задержкой, исключающей быстрое принятие оперативных решений по корректировке параметров технологического процесса.

В современной исследовательской практике наибольшее применение нашли ультразвуковые и оптические неразрушающие методы исследования свойств бумаги и картона, в которых исследованию подвергается срез бумаги или картона с тамбура КДМ, при этом длина образца равна обрезной ширине машины [1,3,4].

Основным преимуществом неразрушающих методов является сохранение целостности материала, поскольку при их проведении не происходит разрушение образца и сохраняется возможность определения других характеристик на этом же образце. Другим важным преимуществом является скорость их выполнения и, как следствие, возможность проведения измерений в режиме on-line. Последние разработки позволяют оценивать жесткость и другие свойства картона непосредственно при работе КДМ в непрерывном режиме [3], применяя математические модели, связывающие комплекс неразрушающих характеристик с показателями механической прочности. Однако для каждого бумаги или картона требуется проведение отдельной калибровки.

Для определения упругих свойств бумаги и картона используется неразрушающий ультразвуковой метод испытаний, который реализован в приборе L&W TSO Tester (TSO – Tensile Stiffness Orientation – направление ориентации жесткости при растяжении) [1,4]. Метод основан на зависимости скорости прохождения ультразвука в плоскости бумаги с ее эластичностью (упругостью).

Для количественной оценки неоднородности структуры используют оптические анализаторы формования. Получаемое на этих приборах цифровое изображение участка бумаги или картона в поляризованном проходящем свете, обрабатывается методами частотного Фурье-анализа и рассчитываются характеристики, количественно оценивающие как общую неоднородность структуры, так и вклад в общий результат неоднородностей различных размеров [5].

На кафедре целлюлозно-бумажных и лесохимических производств САФУ разработана методика прогнозирования величины сопротивления продавливанию, сопротивления сжатию и изгибу картона крафт-лайнера из первичного волокна на основании измерения толщины, профиля TCO, и индекса формования [6,7]. Для прогнозирования используется комплекс неразрушающих характеристик, вся процедура занимает несколько минут и имеет несомненные преимущества.

Для анализа профилей характеристик картона и прогнозирования его механических свойств, была разработана компьютерная программа “Kraftliner” [6], которая позволяет по результатам измерений комплекса неразрушающих характеристик выполнить следующие процедуры обработки данных:

- организовать хранение данных по результатам неразрушающих и разрушающих испытаний образцов по ширине КДМ;
- выбрать независимые и зависимые характеристики для статистического анализа;
- выполнить корреляционный анализ и построить корреляционные поля для произвольно выбранных свойств с целью отбора влияющих характеристик;
- по выбранным характеристикам: рассчитать коэффициенты уравнений регрессии и рассчитать прогнозные значения механических характеристик;
- построить профили неразрушающих и механических (экспериментальных и прогнозных) характеристик картона [6].

Целью данной работы является проверка применимости технологии прогнозирования, разработанной для картона из первичного волокна, для оценки свойств картона для плоских слоев гофрированного картона тестлайнер из макулатуры.

Эксперимент проведен на картоне тестлайнер, массой 115 г/м^2 производства ООО «Сухонский КБК». Картон изготавливается двухслойный, в качестве сырья применяется макулатура марки МС-5б.

Использованные в эксперименте образцы представляют собой полосы картона длиной 3200 мм и шириной 300 мм, длина полосы соответствует ширине КДМ. Полосы картона подготовлены с помощью подрезчика L&W Sample Trimmer. Измерения свойств полосы картона неразрушающими методами производилось с шагом 100 мм, в результате получается практически непрерывный профиль картона по 31 позиции. Для всех образцов выполнены измерения неразрушающих характеристик на целой полосе картона:

- толщина картона δ , мкм, на приборе L&W Micrometer по ГОСТ 27015–86;
- анизотропия жесткости при растяжении ультразвуковым методом на приборе L&W TSO Tester [4];
- неоднородность структуры на анализаторе формования PTA-Line Formation Tester [5];
- толщина картона δ , мкм, на приборе L&W Micrometer по ГОСТ 27015–86;
- масса $1 \text{ м}^2 M$, г.

В качестве характеристики прочности на вырезанных из полосы картона образцах определено сопротивление продавливанию Π , кПа на приборе L&W Bursting Strength Tester по ГОСТ 13525.8–86.

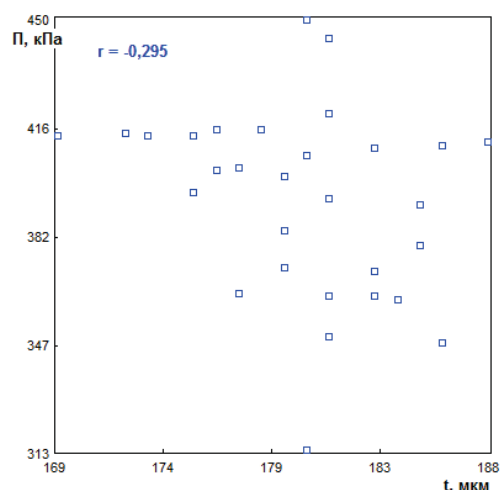
Испытания целлюлозно-бумажного волокнистого материала на TSO-тестере позволяют количественно оценить жесткость при растяжении, анизотропию жесткости материала и ее изменение по ширине тамбура. На TSO-тестере измерены характеристики: TSI_{MD} – индекс жесткости в машинном направлении; TSI_{CD} – индекс жесткости в поперечном направлении; $TSI_{MD/CD}$ – соотношение индексов жесткости в машинном и поперечном направлении; $TSO\text{-}angle$ – угол TSO.

Для количественной характеристики неоднородности структуры картона в нашем эксперименте использован PTA-Line Formation Tester [4], на котором получены цифровые изображения участка картона, размером 12×12 см в поляризованном проходящем свете, и методами частотного Фурье-анализа рассчитаны характеристики: индекс формования I_f , характеризующий сумму интенсивности колебаний неоднородности яркости пикселей, средний размер флокул в направлении осей OX и $OY L_{cp}$, мм, характеристики неоднородностей с размерами 1, 2, 3, 6, 10 и 16 мм.

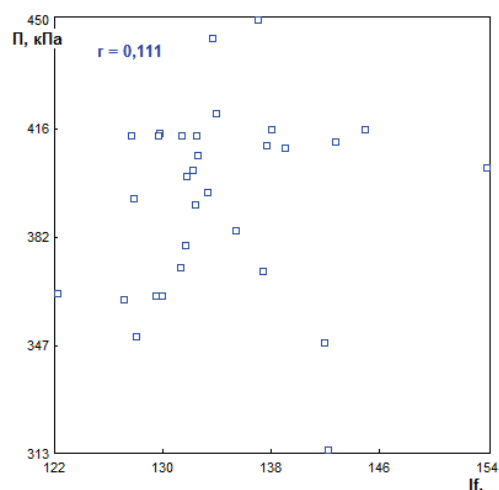
Для количественной оценки взаимосвязи механических и неразрушающих характеристик для всех характеристик определены коэффициенты парной корреляции, результаты приведены в табл. 1. Согласно полученным данным, предполагаемая парная зависимость между сопротивлением продавливанию и характеристиками, определяемыми неразрушающими методами не подтверждается. Величины коэффициентов парной корреляции не превышают 0,3, только для угла TSO_{angle} составляет 0,54. Примеры корреляционных полей представлены на рис.1. Таким образом, для надежного прогнозирования парные зависимости не применимы, а требуется использование множественных зависимостей.

Парная корреляция исследованных характеристик тестлайнера

$X_i \backslash Y_i$	m	δ	TSI_{md}	TSI_{cd}	md/cd	angle	I_f	L_{cp}	3 mm	6 mm	П
m	1	0,07	0,15	-0,10	0,16	0,12	-0,30	-0,48	-0,47	-0,03	0,001
δ	0,07	1	-0,14	-0,70	0,62	-0,61	0,21	-0,06	0,07	-0,22	-0,29
TSI_{md}	0,15	-0,14	1	0,18	0,26	-0,19	-0,29	-0,08	-0,36	0,40	-0,30
TSI_{cd}	-0,10	-0,70	0,18	1	-0,90	0,30	-0,27	0,09	-0,08	0,36	-0,04
md/cd	0,16	0,62	0,26	-0,90	1	-0,39	0,13	-0,11	-0,08	-0,18	-0,09
angle	0,12	-0,61	-0,19	0,30	-0,39	1	0,04	0,00	0,26	-0,33	0,54
I_f	-0,30	0,21	-0,29	-0,27	0,13	0,04	1	0,37	0,52	-0,19	0,11
L_{cp}	-0,48	-0,06	-0,08	0,09	-0,11	0,00	0,37	1	0,27	0,10	0,20
3 mm	-0,47	0,07	-0,36	-0,08	-0,08	0,26	0,52	0,27	1	-0,63	0,03
6 mm	-0,03	-0,22	0,40	0,36	-0,18	-0,33	-0,19	0,10	-0,63	1	-0,08
П	0,001	-0,29	-0,30	-0,04	-0,09	0,54	0,11	0,20	0,03	-0,08	1



а



б

Рис. 1. Примеры корреляционных полей для зависимостей сопротивления продавливанию тестлайнера от неразрушающих характеристик

При проведении множественного регрессионного анализа из всего списка неразрушающих характеристик тестлайнера были последовательно выбраны несколько факторов. Исследованы несколько различных комбинаций факторов, с числом влияющих факторов k от трех до девяти. Результаты представлены в табл. 2.

Оценка качества моделей проводится по их статистическим характеристикам – коэффициентам множественной корреляции между экспериментальными и расчетными данными R и средней относительной погрешности Δ , %. При малом числе используемых для прогнозирования факторов, коэффициенты множественной корреляции имеют низкие значения, что свидетельствует о недостаточной адекватности таких моделей. Причем результат зависит от списка выбранных свойств.

Увеличение количества учитываемых факторов до 5 приводит к росту величины R до величины больше 0,5, и снижению погрешности прогнозирования Δ ниже 5 %. Дальнейший ввод дополнительных факторов в регрессионные модели приводит к улучшению их статистических характеристик, а при 9 учитываемых факторах средняя погрешность прогнозирования составляет величину 4,3 %. Проверочные расчеты были проведены для величин факторов, приведенных в табл. 2.

Влияние количества учитываемых факторов на результаты прогнозирования сопротивления продавливанию тестлайнера

Факторы x_i			Учитываемые факторы и результаты прогнозирования				
Наименование	Величина	Обозначение	$k = 3$	$k = 3$	$k = 5$	$k = 7$	$k = 9$
$M, \text{г/м}^2$	112,5	x_1		+		+	+
$\delta, \text{мкм}$	179,7	x_2			+	+	+
$TSI_{md}, \text{кН}\cdot\text{м/Г}$	10,62	x_3	+		+	+	+
$TSI_{cd}, \text{кН}\cdot\text{м/Г}$	5,09	x_4	+		+	+	+
$TSI_{md/cd}$	2,09	x_5		+			+
TSO_{angle}, \dots°	6,35	x_6				+	+
I_f	133,9	x_7	+		+	+	+
$L_{cp}, \text{мм}$	5,19	x_8				+	+
3 мм	41,39	x_9		+	+		
6 мм	10,2	x_{10}					+
		R	0,298	0,096	0,561	0,664	0,709
		$\delta, \%$	5,708	6,109	4,939	4,331	4,295
$\Pi_{\text{эксп}} = 393 \text{ кПа}$	$\Pi_{\text{расч}}$	Y	393,23	393,15	392,86	393,06	392,2

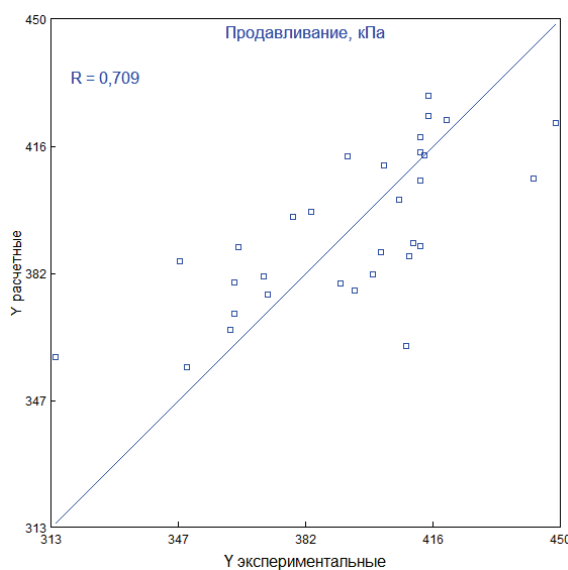


Рис. 2. Корреляция экспериментальных и расчетных значений при прогнозировании сопротивления продавливанию тестлайнера для 9 влияющих факторов

Расчетные значения сопротивления продавливанию во всех случаях оказались близкими среднему значению продавливания по тамбуру 393 кПа, что говорит об адекватности разработанных моделей и технологии прогнозирования.

Экспериментально измеренный и расчетный (для 9 факторов) профиль тестлайнера по сопротивлению продавливанию представлены на рис.3. Расчетный профиль повторяет тенденцию изменения экспериментального профиля, но с меньшей вариацией величины сопротивления продавливанию в соседних точках.



Рис. 3. Экспериментально измеренный и расчетный профиль тестлайнера по сопротивлению продавливанию

Таким образом, разработана технология и программное обеспечение, позволяющие прогнозировать профили механических характеристик макулатурного картона по результатам неразрушающего контроля.

Получены экспериментальные и расчетные данные, подтверждающие высокий прогнозирующий потенциал тестлайнера, определяемых неразрушающими (ультразвуковым и оптическим) методами, если рассматривать их в комплексе.

С применением разработанного программного обеспечения предложена технология прогнозирования величины сопротивления продавливанию тест-лайнера на основании измерения характеристик, полученных неразрушающими методами.

Работа выполнена на оборудовании ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Список литературы

1. Белоглазов В.И., Гурьев А.В., Комаров В.И. Анизотропия деформативности и прочности тарного картона и методы ее оценки. Архангельск: изд-во АГТУ, 2005. 252 с.
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. Линдблад Г., Юха Ю.С. Настройка БДМ для оптимизации прочностных свойств картона для плоских слоев гофрированного картона и бумаги для гофрирования с помощью анализа на TSO тестере // В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» Матер. I Междун. научн.-техн. конфер. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, 2011. С. 78–87.
4. Lindblad, G. Fürst T. The ultrasonic measuring technology on paper and board. Lorentzen&Wettre, Elanders Tofters AB, 2001. 100 p.
5. Lab formation Sensor 2D FSensor [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.techpap.com/lab-formation-sensor,lab-device,6.html> (дата обращения: 18.05.2015)
6. Свид. № 2016614009 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для прогнозирования качества крафт-лайнера по результатам неразрушающего контроля (Kraft-Liner) / Я.В.Казаков, О.С.Беляев: заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО САФУ (RU). – № 20166111457; заявл. 24.02.2016; опубли. 12.04.2016, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

7. Казаков Я.В., Беляев О.С., Филиппов И.Б. К вопросу о прогнозировании механических свойств крафт-лайнера по результатам неразрушающего контроля // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016 №1. С.68–73.

УДК 674.81

**ДРЕВЕСНЫЙ ПЛАСТИК БЕЗ СВЯЗУЮЩЕГО НА ОСНОВЕ ЛИГНИНА
КАК ОТХОДА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Круглов Данил Андреевич,
студент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
г. Екатеринбург, E-mail: tom-art@ya.ru

Артёмов Артём Вячеславович,
канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
г. Екатеринбург, E-mail: tom-art@yandex.ru

Савиновских Андрей Викторович,
канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
г. Екатеринбург, E-mail: savinovskihand@gmail.com

Бурындин Виктор Гаврилович,
д-р техн. наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
г. Екатеринбург, E-mail: ygb@usfeu.ru

***Ключевые слова:** древесный пластик, древесные отходы, лигнин, карбамид, утилизация.*

***Аннотация.** В целлюлозно-бумажном комплексе в качестве одного из видов отхода после гидролиза древесины остается невостребованным технический лигнин. Прирост данного отхода составляет порядка 400 тыс. тонн в год. Данный отход не находит полного и рационального использования. На сегодня это экологическая проблема, так как такие отвалы лигнина являются мощными источниками загрязнения окружающей среды (воды, воздуха, почвы, человеческого организма и т. д.). Поэтому проблема утилизации гидролизного лигнина, который является сырьевой базой для организации производства новых строительных материалов, экологически чистых производств промышленного и топливно-энергетического комплексов, является весьма актуальной.*

**WOOD PLASTIC WITHOUT BINDER BASED ON LIGNIN
AS WASTE PULP AND PAPER INDUSTRY**

Kruglov Danil Andreevich,
student, Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, E-mail: tom-art@ya.ru

Artyemov Artyem Vyacheslavovich,
Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor,
Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, E-mail: tom-art@yandex.ru