

ISSN 0023-1118

ХИМИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

Полимеры • Волокна • Текстиль • Композиты

KHIMICHESKIE VOLOKNA
POLYMERS • FIBRES • TEXTILES • COMPOSITS

www.khimvol.su



2025

УДК 676.1.054.1

ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ КАРТОНА ПО АНАЛИЗУ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА

Н.П. Мидуков*, В.С. Куров*, М.А. Зильберглейт**, М.А. Литвинов*, Я.В. Казаков***

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна;

**Белорусский государственный технологический университет, г. Минск;

***Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск

Многослойные волокнистые композиционные материалы, к которым относится и картон, обладают сложной макро- и микроструктурой. Считается, что склонность волокон к флокулообразованию на стадии подготовки волокнистой суспензии является основной причиной неравномерности структуры бумаги и картона, которая в последующем оказывает влияние на шероховатость. Этот показатель влияет на качество наносимой информации на картон – наиболее распространённый в мире упаковочный материал. Исследования показали, что при разделении волокнистого материала на слои шероховатость поверхности не меняется. Сопоставление данных подтверждает отсутствие корреляции между шероховатостью по Бендтсену в мл/мин и оценкой профиля по показателям R_a , R_z , R_{max} . В работе описан метод оценки шероховатости картона без покрытия с помощью графических и аналитических программ. Метод прямого анализа профиля не имеет ограничений по оценке шероховатости, в отличие от косвенного. Прямой анализ шероховатости графической обработкой применим вне зависимости от наличия мелованного слоя и может использоваться при оценке качества печати на картоне без покрытия, что важно для привлекательной упаковки.

Картон является основным биоразлагаемым упаковочным материалом. Его преимуществом является возможность повторного использования волокон. Согласно проведенным исследованиям в России и за рубежом число циклов повторного использования вторичных волокон достигает 5-8 раз. Однако при этом волокна частично теряют бумагообразующие свойства, что приводит к снижению качества готовой продукции. Одним из путей решения этой проблемы является производство многослойного картона. Для нанесения информации на упаковку покровный слой картона должен обладать высокими печатными свойствами. Остальные слои картона во многом определяют его механические свойства. Влиянию распределения вторичных волокон в слоях картона на механические свойства посвящено большое количество исследований российских ученых [1-4], в которых представлены зависимости сопротивления продавливанию, разрыву, сжатию на коротком расстоянии от количества слоев. Объектом таких исследований являлся упаковочный картон отечественных предприятий. Информация о влиянии числа слоев на качество картона представлена научными группами иностранных производителей формирующих частей бумаго- и картоноделательных машин [5-8].

К печатным свойствам картона, точнее, его покровного слоя относятся однородность струк-

туры, шероховатость, пористость, сжимаемость, белизна, непрозрачность, глянец. Первые четыре свойства определяют расход воздуха через зазор между кольцевой пластиной прибора Бендтсена [9] и поверхности волокнистого материала, причем шероховатость в большей степени зависит от глубины впадин и высоты выступов. Существуют также методы Шеффилда, Бекка, также основанные на определении расхода воздуха (в мл/мин) через зазор рабочего органа прибора и волокнистого материала. В методе Паркера ведется пересчет расхода воздуха с мл/мин в мкм по полученным ранее данным [10-12]. Все перечисленные методы являются косвенными и зависят от проходимости воздуха между металлической пластиной и волокнистым материалом. Метод Паркера при пересчете единиц измерения мл/мин в мкм тоже основан на проходимости воздуха.

Наиболее достоверными являются методы оценки шероховатости по профилю материала, однако его сложно сформировать. В отличие от металла или другой твердой поверхности целлюлозное волокно неустойчиво к рабочему органу профилографа, поэтому щуповой метод неприменим, а прозрачность волокон не позволяет использовать оптические методы формирования профиля [13,14]. Авторы работы [15] предложили использовать атомно-силовую микроскопию, бесконтактный способ получения профиля поверхности бумаги с мелованным покрытием. Предложенный метод позволил с высокой точ-

E-mail: rector@sutd.ru

ностью определить шероховатость поверхности бумаги. После обработки полученного профиля в соответствии со стандартом определен параметр шероховатости Ra . В работе установлено, что при равной шероховатости в мл/мин показатель Ra может иметь разные значения, что связано с несколькими причинами:

- при измерении поверхности бумаги методом атомно-силовой микроскопии анализируется небольшой участок в $10\,000\text{ мкм}^2$ ($100\times 100\text{ мкм}$), а при измерении расхода воздуха охватывается участок диаметром 30 мм ;

- бумага имеет неоднородную структуру, связанную с микро- и макронеравномерным распределением волокон в структуре; в местах промоин шероховатость по Бендтсену может быть больше, в то время как сама поверхность довольно гладкая.

Первая причина может быть исключена проведением большого количества параллельных определений, но решение второй осложняется неравномерностью распределения волокон как на микро-, так и на макроуровне. Известно, что в основном неравномерное распределение волокон связано со склонностью их к образованию флоккул при подготовке бумажной массы в водной среде. Еще одним фактором являются микропульсации в потоке бумажной массы и на формирующей сетке бумажного полотна. Из работ [15–17], посвященных графической обработке поперечного среза, видно, что периодичность шага флоккул и промоин в структуре картона из макулатуры составляет $100\text{--}150\text{ мкм}$. Этот размер определяется особенностью технологии картона и природой волокнистого материала, степенью помола, структурно-морфологическими свойствами волокон, вибрацией оборудования, гидродинамическими режимами формования картона из волокнистой суспензии, использованием флокулянтов.

Микронеровности распределения волокон в этом интервале могут находиться как в самой флоккуле, так и в промоинах. Примерно в этом же диапазоне чаще всего находится неравномерность нанесения печатной краски, тонера для отдельно взятого символа. Размер символов составляет несколько миллиметров. Качество нанесения символов зависит от вида печати и неровностей бумаги и картона, причем картон с покрытием (с шероховатостью по Ra менее 1 мкм) существенно отличается по качеству нанесения от картона без покровного слоя (с шероховатостью по Ra 12.5 мкм). Если тонер, краска или чернила попадают на неравномерную структуру с высокой шероховатостью поверхности, то печать будет неравномерной [18]. Было установлено, что в местах выступов толщина чернил,

тонера, краски будет меньше (оттиск будет светлее), а в местах впадин больше (оттиск темнее). Отсюда возникает неравномерное распределение краски, тонера на поверхности печати [19].

Поэтому контроль за шероховатостью поверхности имеет важное значение с точки зрения нанесения качественной печати. В работах [15, 20] параметр шероховатости Ra не превышает 1 мкм . Для такого уровня шероховатости по нормативам выбора базовой длины (ГОСТ на шероховатость) ее длина должна быть не менее 80 мкм [21]. Для шероховатости в 12.5 мкм по Ra или 100 мкм по Rz значение базовой длины должно быть не менее 2500 мкм (площадью $6\,250\,000\text{ мкм}^2$), что в 625 раз превышает охватываемую площадь в $10\,000\text{ мкм}^2$, что представляют авторы.

Исследователи Белорусского государственного технологического университета и Института физической химии Российской АН считают, что достоверной оценкой шероховатости является параметр Ra , определенный по профилю мелованного картона (исследования проведены для профиля поверхности бумаги размером 100 мкм). Для количественной оценки шероховатости немелованного картона необходимо применение технологии анализа профиля с применением графического метода, который позволяет рассматривать шероховатость на уровне базовой длины 2500 мкм , что является целью данной работы.

Для получения многослойного композиционного материала использовались волокна макулатуры из офисной бумаги. Макулатурная масса подготавливалась в соответствии с международными стандартами. Размол макулатурной массы осуществлялся по стандарту DIN-54360 [22]. Из подготовленной макулатурной массы формировались многослойные отливки на листоотливном аппарате согласно ISO 5269-2 [23]. Поперечный срез многослойного картона перед микроскопическим исследованием был подготовлен с помощью шлифовально-полировальной машины. Визуализация поперечных срезов подготовленных образцов проводилась с помощью электронного микроскопа компании TESCAN MIRA3 LMH (Чешская республика). Характеристики сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMH: электронная колонна FEG SEM с источником электронов на основе катода Шоттки, ускоряющее напряжение $200\text{ В} - 30\text{ кВ}$; ток зонда $2 - 200\text{ нА}$, разрешение 1 нм (при 30 кВ), увеличение до $1\,000\,000$, детекторы вторичных электронов SE, In-Beam SE [24, 25].

Исследование микроструктуры образцов волокнистого материала, с помощью сканирующей

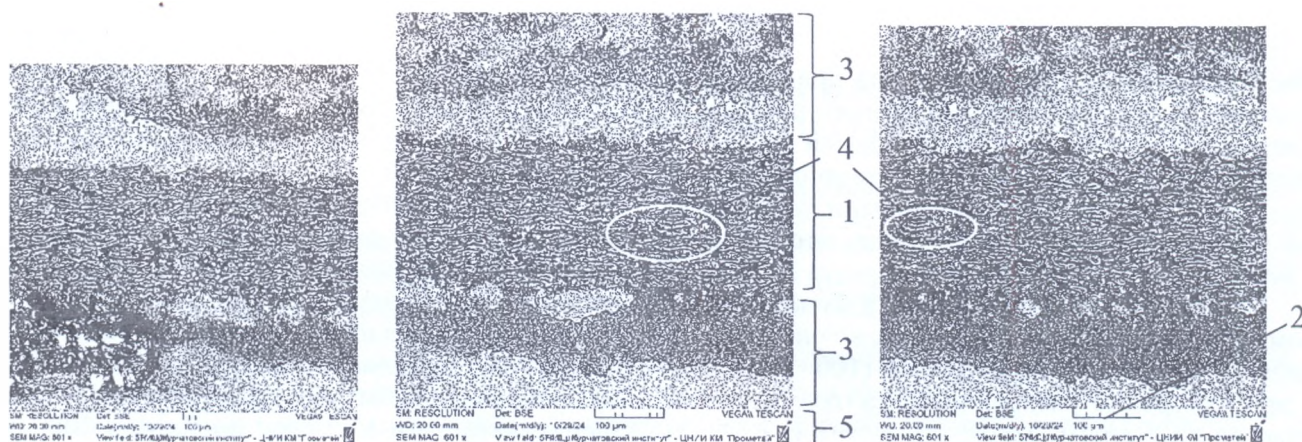


Рис. 1. Сшивка изображений поперечного среза многослойного картона:

1 – область поперечного среза; 2 – масштабная шкала; 3 – область заливки эпоксидной смолой; 4 – повторяющиеся объекты; 5 – метаданные изображений, полученные с помощью СЭМ.

электронной микроскопии (СЭМ) осуществлялось в центре коллективного пользования при НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Работа проводилась в рамках совместного российско-белорусского гранта.

Образцы для исследования, были получены в соответствии с международным стандартом с помощью приборов, находящихся в центре коллективного пользования «Биорефайнинг древесины и нанотехнологии» на базе Высшей школы технологии и энергетики при Санкт-Петербургском государственном технологическом университете промышленных технологий и дизайна.

Для оценки равномерности распределения сечений волокон на поперечном срезе были использованы программы векторного формата. Контрастность изображения микроструктуры поперечного среза подбиралась с помощью программ растрового формата работы с изображениями (ImageJ).

Промежуточными результатами исследований являются снимки поперечного среза многослойного картона, полученные при помощи СЭМ. Образцы были предварительно зафиксированы в держателях и залиты эпоксидной смолой, а затем отполированы.

Изображения поперечного среза (рис. 1) разного размера, на каждом из них имеется масштабная шкала 2, расположенная в метаданных изображений 5. Коэффициент масштаба рассчитывается под каждое изображение. Важно, чтобы все изображения, из которых в последующем будет сформирован панорамный вид поперечного среза, были подведены под одинаковый масштаб по шкале 2.

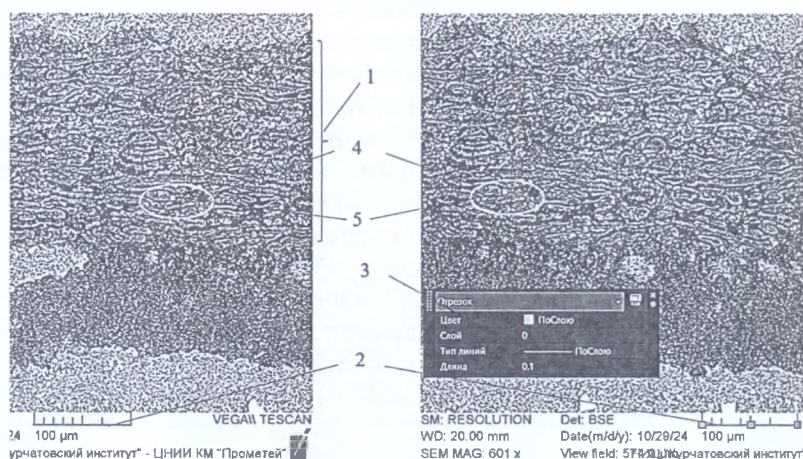


Рис. 2. Сшивка изображений поперечного среза многослойного картона:

1 – область поперечного среза; 2 – масштабная шкала; 3 – таблица свойств объекта измерения (длина отрезка); 4 – повторяющиеся объекты; 5 – точки совмещения изображений.

После масштабирования области поперечного среза 1 (рис. 1 и 2) из серии изображений накладываются друг на друга. Сканирующий электронный микроскоп при формировании каждого снимка автоматически его не сшивает. Для этого необходима CAD программа, в которой выбираются идентичные, повторяющиеся объекты 4, а затем наносятся точки совмещения изображений 5.

Таким образом сшиваются десятки изображений поперечного среза, полученные при помощи СЭМ. Результат сшивки четырех изображений представлен на рис. 3, а.

Чтобы базовая длина составила более 2500 мкм, необходимо больше изображений. На рис. 3, б представлены сшитые девять изображений по методике масштабирования и сшивки, показанной на рис. 2 и 3. Следующим этапом является поворот сшитых изображений на угол наклона 1 (рис. 3, в),

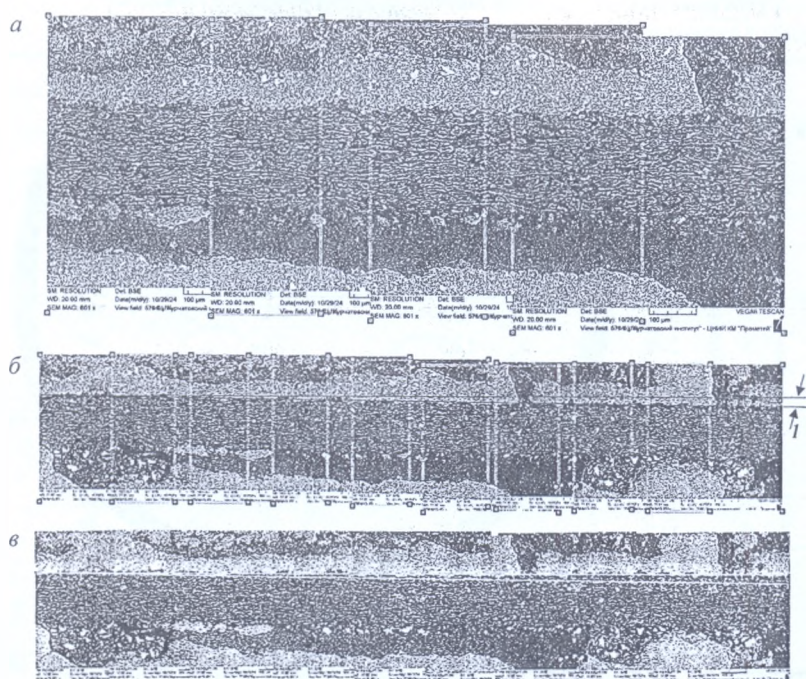


Рис. 3. Сшитые изображения поперечного среза многослойного картона, полученного с помощью СЭМ:

а – изображение из четырех снимков; б – панорама поперечного среза из девяти снимков; в – панорама поперечного среза после поворота; $\angle$ – угол наклона.

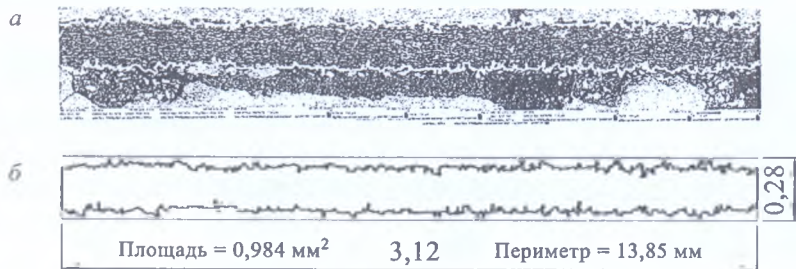


Рис. 4. Выделение профилей в поперечном срезе многослойного картона:

а – выделение профилей картона с лицевой и тыльной сторон; б – расчет основных параметров исследуемой области многослойного картона – периметра, площади, толщины.



Рис. 5. Определение шероховатости многослойного картона по анализу изображений профиля (23, 24, 25 – число профилей) поперечного среза многослойного картона.

который может быть образован в результате изменения поворота или положения камеры или образцов в ходе выполнения снимков. Это стадия имеет важное значение при определении шероховатости поверхности, так как графическая программа или нейросеть, с помощью которых проводится средняя линия относительно выступов и впадин, должна быть параллельна осям координат. В этом случае можно доверять координатам точек, соответствующих выступам и впадинам, по которым далее ведется расчет параметров Ra , Rz , R_{max} .

Предлагаемый метод оценки шероховатости поверхностей картона также позволяет во многих программах векторного формата в «один клик» установить геометрические параметры исследуемой области (рис. 4, а), такие как периметр, толщина, площадь (рис. 4, б). Эти показатели будут использованы при расчете пористости, плотности и массы 1 м^2 картона. Программа устанавливает толщину картона в зависимости от максимального выступа с лицевой стороны и минимальной впадины с тыльной стороны. При определении толщины с помощью толщиномера получают немного завышенные данные, так как рабочий орган прибора сжимает отдельные концы волокон или их фрагменты, «выступающие» над поверхностью картона. Толщина, определенная по расстоянию от средней линии выступов и впадин с одной и другой сторон картона по значению близка к данным, определенным с помощью толщиномера.

Каждый профиль поверхности картона с тыльной и лицевой сторон графически обрабатывался с помощью графической программы векторного формата работы с файлом. Результатом графической обработки являлись координаты точек по оси ординат, соответствующие максимальным отклонениям выступов (H_{max}) и минимальным отклонениям впадин (h_{min}) относительно средней линии (рис. 5).

Средняя линия (рис. 5) была построена по данным максимумов и минимумов профиля, разделенного на 25 секторов по 100 мкм. Таким образом, была охвачена рекомендованная ГОСТ 2789–73 базовая длина 2500 мкм.

Результаты оценки шероховатости многослойного картона методом графического анализа
профиля поперечного сечения и стандартным методом

Образцы и их показатели	Сторона	Область измерения	Шероховатость поверхности			
			по методу Бендстена, мл/мин	по профилю в поперечном сечении, мкм		
				R_a	R_z	R_{max}
Количество слоев – 1, номер образца – 10, масса образца – 3.8 г, масса 1 м ² – 122 г/м ²	Лицевая	6	198	12.5	20	53
		4	161	12.5	25	92
		12	143	12.5	20	68
		14	196	12.5	25	55
	Тыльная	6	302	12.5	25	60
		4	278	12.5	25	49
		12	410	16	32	78
		14	373	25	40	96
Количество слоев – 2, номер образца – 12, масса образца – 3.6 г, масса 1 м ² – 115 г/м ²	Лицевая	6	131	12.5	20	22
		4	135	12.5	20	-
		12	109	10	16	61
		14	152	12.5	20	55
	Тыльная	6	392	32	50	90
		4	274	16	25	73
		12	218	16	20	61
		14	301	16	25	78
Количество слоев – 3, номер образца – 14, масса образца – 3.9 г, масса 1 м ² – 124 г/м ²	Лицевая	6	128	8	10	38
		4	167	12.5	20	58
		12	161	12.5	16	45
		14	137	10	12.5	39
	Тыльная	6	233	12.5	16	39
		4	285	16	32	78
		12	216	12.5	16	35
		14	215	12.5	25	58
Количество слоев – 4, номер образца – 18, масса образца – 3.74 г, масса 1 м ² – 118 г/м ²	Лицевая	6	168	12.5	25	63
		4	168	12.5	25	71
		12	122	12.5	25	68
		14	122	12.5	25	59
	Тыльная	6	299	16	25	75
		4	413	20	40	100
		12	285	16	25	71
		14	249	16	25	70

Пояснение: 6, 4, 12, 14 – области, наиболее удаленные друг от друга и от края образца картона (рис. 6)

Статистическая обработка данных проводилась в соответствии с инструкциями этого стандарта с помощью электронной таблицы Excel. Всего было обработано и проанализировано 32 профиля для многослойного картона. Результаты исследований параметров шероховатости R_a , R_z , R_{max} представлены в таблице.

Из данных таблицы видно, что максимальное значение шероховатости по R_{max} не превышает 100 мкм, поэтому достаточно исследовать область в пределах базовой длины 2500 мкм. Область измерения выбрана таким образом, чтобы отливка размером в 200 мм была разделена на 17 секторов, из которых выбраны четыре, находящиеся на максимальном удалении друг от друга и от краев круглой отливки картона (рис. 6). Шероховатость

по стандарту методом Бендтсена была определена с лицевой и тыльной сторон. Таким образом, исследовалось четыре отливки с лицевой и тыльной сторон в четырех областях среза (6, 4, 12, 14).

Данные таблицы подтверждают справедливость представлений, высказанных авторами работы [15] о том, что шероховатость, определяемая косвенным способом, в конкретном случае по Бендтсену может не соответствовать данным, полученным по профилю картона. При равных значениях R_a количество проходящего через зазор между металлическим кольцом и поверхностью картона может быть разным. На рис. 7 представлены результаты сопоставления метода Бендтсена с методом оценки картона по профилю поперечного сечения картона.

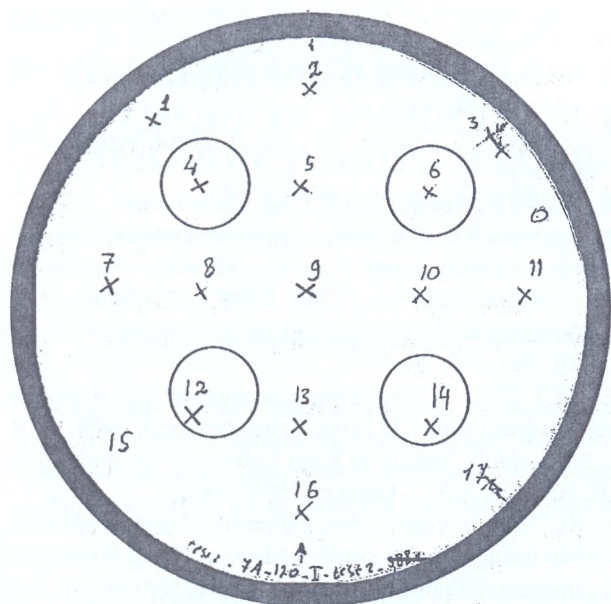


Рис. 6. Исследуемая область измерения:
4, 6, 12, 14 – области, наиболее удаленные друг от друга и от края образца картона.

Из рис. 7 видно, что при шероховатости лицевой стороны картона $Ra = 12.5$ мкм показания прибора Бендтсена, хотя и входят в норматив шероховатости для бумаги (до 400 мл/мин), имеют разные значения. Диапазон данных имеет большой разброс – от 100 до 300 мл/мин. То же наблюдается и для тыльной стороны, у которой шероховатость в большинстве случаев находилась на уровне 16 мкм по Ra .

– Несмотря на отсутствие корреляции между параметром шероховатости поверхности по Бендтсену и Ra , исследования показали возможность применения метода прямого анализа шероховатости поверхности при оценке картона без покрытия. Анализ шероховатости путем графической и аналитической обработки профиля поверхности применим вне зависимости от наличия или отсутствия покровного мелованного слоя. Установлено, что при многослойном формовании число слоев не влияет на формирование профиля поверхности, а шероховатость поверхности определяется с поверхностью сетки и покровным картоном.

– Получены данные шероховатости поверхности картона без покрытия с тыльной и лицевой сторон с помощью графической обработки. Предложенный метод позволяет расширить возможность измерения шероховатости поверхности по профилю в пределах базовой длины 2500 мкм, что соответствует параметру шероховатости R_{max} картона без покрытия до 100 мкм.

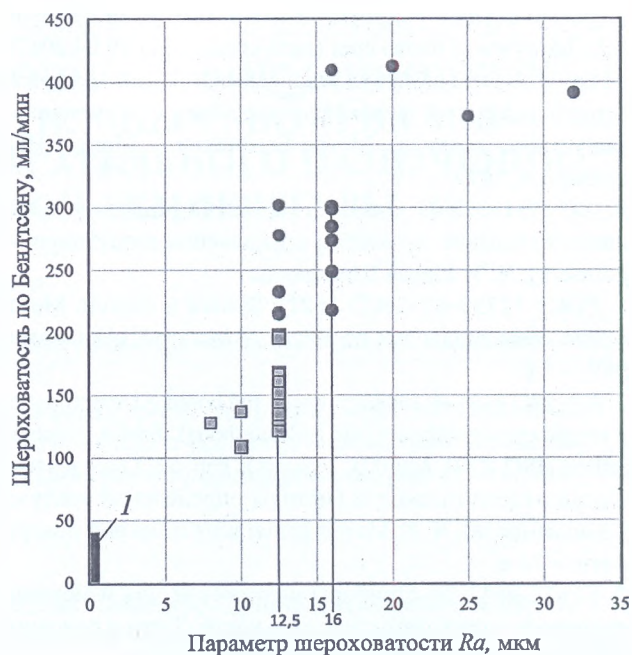


Рис. 7. Результаты сопоставления данных шероховатости по методу Бендтсена и Ra , полученные в ходе графической и аналитической обработки профиля картона:

1 – диапазон шероховатости по Бендтсену для картона с покрытием; □ – результаты оценки шероховатости лицевой стороны картона; ● – результаты оценки шероховатости тыльной стороны картона.

– Метод графической и аналитической обработки шероховатости поверхности применим вне зависимости от наличия или отсутствия покровного мелованного слоя и может использоваться при оценке качества нанесения печатных символов на поверхность картона без покрытия. Это особенно важно для получения красочной упаковки, что значительно увеличивает привлекательность при продаже товаров народного потребления.

Библиографический список

1. Смолин А.С., Аксельрод Г.З. Технология формования бумаги и картона. – М.: Лесная пром-сть, 1984. – 120 с.
2. Гораздова В.В., Дернова Е.В. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. – С. 160-189.
3. Машины для производства бумаги и картона. / Под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2017. – 646 с.
4. Midukov N.P., Smolin A.S., e. a. // Materialien zum wissenschaftlichen Seminar der Stipendiaten der Programme «Michail Lomonosov» und «Immanuel Kant III» 2012/2013. – Moskau, 2013. – S. 53-56.
5. Конструкция вакуум-формера компании Voith (Float Lipformer type S). URL: http://www.voith.com/en/Produktblatt_FloutLip_en.pdf (дата обращения 15.04.2017).
6. Moser H. // Together. 2000. No. 10. – P. 17-21.
7. Risenberg H. // Together. 2005. No. 19. – P. 36-39.

8. Трехканальный гидроразбиватель компании «Metso». URL: <http://www.metso.com> (дата обращения 19.04.2017).
9. ГОСТ 30022.2–93 (ISO 8791-2:2013). Бумага и картон. Метод определения шероховатости (метод с применением пропускания воздуха). Метод Бендтсена. – Минск: Изд. стандартов, 1999. – 7 с.
10. ISO 8791–3:2005. Бумага и картон. Определение шероховатости/гладкости (методы определения воздухопроницаемости). Ч. 3: Метод Шеффилда.
11. ГОСТ 12795–89 (ИСО 5627). Бумага и картон. Метод определения гладкости по Бекку. – М.: Изд. стандартов, 1989. – 7 с.
12. DIN ISO 8791–4:2008-05. Paper and board – Determination of roughness/smoothness (air leak methods). Part 4. Printsurf method (ISO 8791 4:2007). Бумага и картон. Определение шероховатости/гладкости (методы определения воздухопроницаемости). Ч. 4: Метод испытания печатной поверхности. – 26 с.
13. ГОСТ 9847-79. Приборы оптические для измерения параметров шероховатости поверхности. Типы и основные параметры. – М.: Изд. стандартов, 1992. – 8 с.
14. ГОСТ Р 8.651–2009 ГСИ. Приборы контактные (щуповые) для измерений шероховатости поверхности. Методика калибровки. – М.: Стандартинформ, 2009. – 12 с.
15. Курсанкин А.А., Михалева М.Г. и др. // Лесной вестник. 2018. Т. 22. № 1. – С. 88-93.
16. Midukov N.P., Kurov V.S., e. a. // Fibre Chemistry. 2021. V. 53. No. 2. – P. 94-99.
17. Midukov N.P., Kazakov Ya.V., e. a. // Fiber Chemistry. 2020. V. 52. No. 1. – P. 51-57.
18. Rosalen S., Backhaus J. // Tappi Virtual. 2021. – 14 p.
19. Леонтьев В.Н. // Методы и средства совершенствования печатных свойств бумаг в системе «бумага – краска – оттиск»: учебное пособие. – СПб.: СПбГТУРП, 2009. – 170 с.
20. Михалева М.Г., Втюрина Д.Н. и др. // Труды БГТУ. Сер. 2. 2019. № 1. – С. 67-71.
21. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд. Стандартформ, 2006. – 7 с.
22. DIN-54360. Testing of Pulp; Laboratory Beating of Pulp with the Jokro Mill. – German. 1977. – 4 p.
23. ISO 5269-2. Pulps - Preparation of laboratory sheets for physical testing. Part 2. Rapid-Köthen method // International Organization of Standardization. – Geneva, Switzerland, 2004. – 8 p.
24. TESCAN MIRA3 URL: microscope/www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3.
25. TESCAN MIRA3 microscope. Download Brochure. URL: www.tescan-uk.com/tecnology/sem/mira3.