



ISSN 1029-5151
ISSN 1029-5143 (online)



**ХИМИЯ
РАСТИТЕЛЬНОГО
СЫРЬЯ**

4 • 2021

УДК 66.023.2

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КАРТОНА НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© *Н.П. Мидуков*, В.С. Куров*

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095 (Россия), e-mail: mnp83@mail.ru

Статья посвящена прогнозированию механических свойств по исследованию микроструктуры поперечного среза картона. Результаты работы в перспективе могут быть использованы как дополнение к стандартным методам оценки механических свойств картона. На основе изображений микроструктуры поперечных срезов двухслойного картона тест-лайнера и их графической обработки с помощью современных компьютерных программ были выделены протяженности контактов волокон. Руководствуясь тем, что наиболее значимым показателем из всех геометрических параметров микроструктуры является протяженность контактов волокон, были определены основные механические свойства картона (сопротивление продавливанию и сжатию на коротком расстоянии, разрывная длина, жесткость на изгиб, межслоевая прочность), произведенного по различным технологиям (традиционный мокрый способ подготовки макулатурной массы, сухое диспергирование макулатуры с аэродинамическим формованием покровного слоя, сухое диспергирование макулатуры с последующей подачей волокон в массу и сухое диспергирование макулатуры с последующим размолем в водной среде). Каждая из перечисленных технологий позволяет получить картон с различными механическими показателями. Установлено, что практически все механические показатели зависят прямо пропорционально от протяженности линий контактов волокон. Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования механических свойств картона при его производстве на предприятиях отрасли.

Ключевые слова: картон, макулатура, механические свойства, микроструктура, тест-лайнер.

Введение

Картон – это волокнистый композиционный материал (в основном многослойный), обладающий сложной структурой, которая во многом определяет его механические свойства (сопротивления картона: продавливанию; сжатию на коротком расстоянии; разрыву; расслаиванию и изгибу). Каждое из перечисленных свойств определяется на высокоточном оборудовании с разработкой специального стандарта.

Проблема заключается в сложности определения перечисленных свойств и обусловлена необходимостью получения стандартов, обучения персонала для работы с дорогостоящим оборудованием, а также требованием освоения сложных программных продуктов для ввода и обработки данных. При этом затрачивается большое количество времени на исследование материала. Для достоверной оценки перечисленных свойств картона в лаборатории производится несколько образцов (их может быть до десяти в зависимости от стандарта, по которому выполняется контроль) с целью исключения ошибок при роспуске, очистке, разбавлении водой до требуемой концентрации, размолу, удалении влаги под сетку, прессовании, сушке.

Поэтому необходимы принципиально новые решения по прогнозированию механических свойств картона без использования дорогостоящей лабораторной базы. Ключом к решению проблемы является анализ микроструктуры, геометрические показатели которой во многом определяют механические характеристики картона. К геометрическим показателям микроструктуры в поперечном срезе картона относятся протяженность линий контакта волокон и стенок волокон, равномерность их распределения, пористость, равномерность формирования слоев, шероховатость границ слоев [1]. Для количественной оценки этих показателей необходимо использование современных микроскопических методов исследования с последующим применением цифровых технологий для анализа микроструктуры.

Мидуков Николай Петрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: mnp83@mail.ru

Куров Виктор Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, e-mail: vskurov18@mail.ru

необходимо использование современных микроскопических методов исследования с последующим применением цифровых технологий для анализа микроструктуры.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Микроскопия – это один из первых методов оценки микроструктуры, который нашел широкое применение при оценке связеобразования волокон в бумаге и картоне. Сложность восприятия получаемых снимков волокнистых материалов не позволяет разработать единый стандарт анализа микроскопических исследований. До появления электронной микроскопии возможности оптического микроскопа стремительно развивались во многих направлениях. Существуют стереоскопические микроскопы, позволяющие получать 3D-изображения волокна. Электронный микроскоп оснащен функцией получения стереоизображения высокого качества с большим разрешением. На рисунке 1 представлено стереоизображение двухслойного картона тест-лайнера, полученного с помощью электронного микроскопа.

Использовать снимок (рис. 1) поперечного среза для оценки межволоконных связей или для того, чтобы установить распределение химических элементов (входящих в состав композиционного материала) в поперечном сечении, невозможно, так как сложно установить границу слоев и отличить волокна различной природы. 3d-изображение не позволяет оценить поверхность волокон в поперечном срезе. В целом, стереоизображение, представленное на рисунке 1, – это пока красивая визуальная картинка, которая может использоваться для общего представления о поперечном срезе.

Актуальность использования высококачественных снимков (атласы), микроструктуры различных видов однородного волокнистого материала без примесей, представленных в этих атласах, утрачивается, так как основным сырьем для производства упаковки становится многослойный картон, получаемый из вторичного сырья, состав которого может быть разнообразным. Оптический микроскоп использовался в качестве визуального подтверждения гипотез, представленных известными учеными, работающими в области ЦБП в середине XX века (Д. Кларк, С.Н. Иванов). Основным недостатком оптических микроскопов являлось низкое разрешение, которое удалось немного увеличить с использованием фазово-контрастной микроскопии (конфокальные микроскопы) [2]. Например, А. Робертсон в своей работе [3] использовал фазово-контрастную микроскопию для исследования биоцидов в целлюлозно-бумажной промышленности. Интересные данные в оценке микроструктуры многослойного картона в поперечном сечении были получены с помощью микроинтерферометра [4].

Настоящий прорыв в области исследования микроструктуры бумаги и картона стал возможен благодаря сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Одним из первых ее использовал К. Смит [5], увеличив глубину резкости в 300 раз и разрешение до 3–10 нм. Основная критика использования СЭМ в качестве инструмента для исследования микроструктуры бумаги и картона связана с использованием вакуума, который удаляет влагу из волокон, меняя структуру поверхности. И. Сэш [6] с помощью СЭМ и сушки в замороженном состоянии иллюстрирует поведение микро- и наноприфибрилл на поверхности волокон при удалении влаги под вакуумом. Эти работы стали основой для достоверного описания явлений, происходящих при взаимодействии волокон в целлюлозных материалах. В России наиболее качественно с помощью СЭМ и сушкой в замороженном состоянии исследуется микроструктура бумаги и картона Д.Г. Чухчиным и Я.В. Казаковым [7].

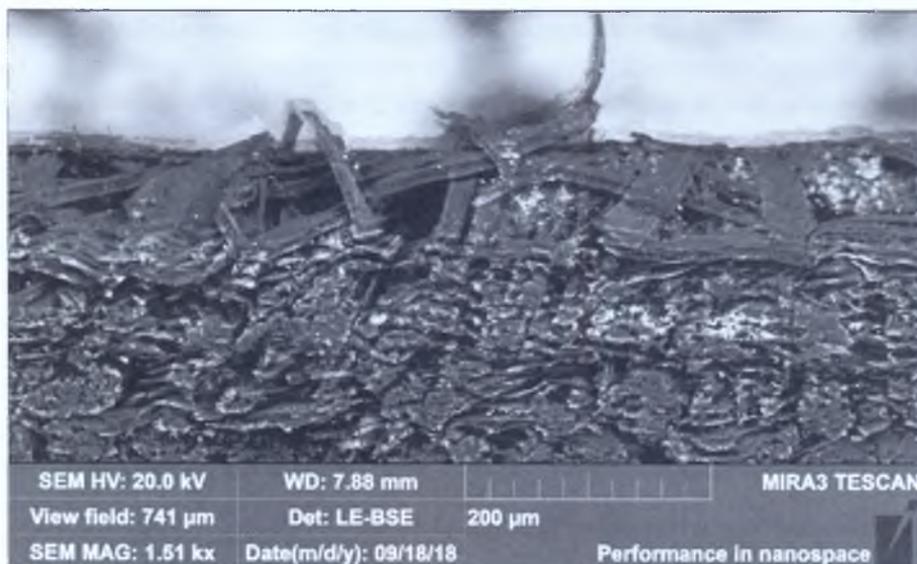


Рис. 1. 3D-изображение поперечного среза двухслойного тест-лайнера, выполненного микротомом (необходимо использовать стереочки)

Важным открытием в развитии СЭМ стало появление детектора отраженных электронов (BSE). Он позволил увидеть элементный состав целлюлозного материала. Отраженные электроны стали ключом для открытия спектров элементного состава волокнистого материала [8]. Представленные карты элементного состава относились к поверхности бумаги и картона, так как для исследования поперечного среза необходима была специальная подготовка волокнистого материала, которой в те времена еще не было.

При исследовании межволоконных сил связи СЭМ также получила широкое применение, так как позволяла оценить их с высоким разрешением. Р. Страттон и Е. Корлсон продемонстрировали возможность СЭМ в определении поверхности контакта волокон в целлюлозном материале [9]. С помощью СЭМ и наличием детектора отраженных электронов анализировался покровный слой из мела и слоя проклейки [10].

В конце XX века благодаря цифровым технологиям был сделан огромный скачок в развитии анализа микроскопических снимков. С помощью графических аналитических программ цифрового изображения, полученного с помощью СЭМ и блока отраженных электронов, были созданы карты распределения элементов печатных красок на поверхности бумаги [11]. По различию в цветовой гамме в соответствии с представленными масштабами стало возможным определить размеры частиц наполнителя. В работе [12] исследователи применили пакет «imagej» для обработки изображений, полученных СЭМ (на примере анализа бумаги), используя различные алгоритмы оцифровки изображения. Однако проводимые исследования осуществлялись на снимках поверхности бумаги, которые оценивают только микроструктуру верхнего слоя, отличающуюся от микроструктуры волокон, находящихся внутри материала. Для полной оценки геометрических характеристик микроструктуры многослойного картона необходим анализ качественного изображения поперечного среза. В работе японских исследователей встречается наиболее качественный срез бумаги, полученный стеклянным ножом [13]. Разные варианты поперечных срезов, полученных с помощью перечисленных инструментов, были представлены в работе Д. Хеллавила и Р. Нельсона [14]. Разрушающее и деформирующее воздействие на микроструктуру волокна ножевыми инструментами является главной проблемой при подготовке поперечных срезов картона. Проблему попытался решить американский исследователь Д. Гиббон [15]. Он использовал смолу для фиксации волокнистого материала с дальнейшей полировкой. Недостатком такого метода является необходимость использования дополнительного химического связующего элемента (смолы, парафина). При полировке или нарезке смола заполняет пустоты между волокнами, снижая качество снимка микроструктуры картона. Для макулатурного многослойного тест-лайнера, который может содержать удаленные элементы внутри картона, этот способ неприменим.

На сегодняшний день существует множество методов подготовки проб волокнистого материала для СЭМ, однако качественного поперечного среза и его анализа не существует. Поэтому использовать микроскопические снимки для прогнозирования механических характеристик невозможно. Для этого необходим метод получения поперечного среза картона, который не должен деформировать волокнистый каркас, частицы наполнителя, красителя и должен давать достоверную карту элементного состава.

Качественные срезы отдельных волокон, фибрилл и микрофибрилл были получены с помощью современных низкотемпературных электронных сканирующих микроскопов [16–20]. Однако низкотемпературный электронный микроскоп не решил проблему подготовки качественного поперечного среза в широкой области исследования картона, которая позволила бы установить зависимость между микроструктурой и механическими, и поверхностными показателями волокон. Микроскопы с высоким разрешением, позволяющие оценить взаимодействие волокон на расстоянии нескольких ангстрем, чаще всего используются для исследования поверхности волокнистого материала или волокон в массе. В макулатурном картоне настолько неопределенный состав, что для достоверной оценки механических и поверхностных показателей потребовалось бы более 100 терабайт оперативной памяти на участок поперечного сечения в несколько миллиметров. Такой объем информации очень сложно уместить в современном компьютере.

Наибольшим разрешением обладает атомный силовой микроскоп [21–23]. Благодаря ему удалось исследовать связь между двумя волокнами на наноуровне. Авторы работы [24] представили энергетическую оценку связи двух волокон. Представленные данные характерны для определенного случая соединения двух одинаковых по природе волокон. В работе исследователей, использующих высокоточное микроскопическое оборудование, оценивается определенный участок волокнистого материала или отдельно взятые волокна. А для того чтобы прогнозировать по микроструктуре картона механические показатели, необходим анализ широкой области поперечного сечения многослойного картона (как минимум в 150 мкм). Эта область охвата, которая фиксирует изменения равномерности распределения волокон в ходе подготовки массы (на стадиях

ропуска, размола, фракционирования, очистки и т.д.), а именно те процессы, которые оказывают влияние на физико-механические показатели картона. Расстояние в 150 мкм (минимальное расстояние), которое необходимо охватить в исследованиях поперечного среза многослойного картона для того, чтобы указать на область сгустков волокон (область поперечного среза картона на месте флокулы) и на область, где повышенное содержание пустот (пористость). Волокнистый материал всегда имеет неравномерность структуры при формировании, поэтому несмотря на высокую точность микроскопов, позволяющих исследовать межволоконную прочность на уровне нескольких ангстрем, эти результаты будут недостоверны для картона с неоднородным составом и с неизвестным распределением волокон в поперечном срезе.

Наиболее предпочтительным является область исследования в несколько миллиметров поперечного среза картона. При этих условиях можно с определенной точностью прогнозировать механические показатели многослойного картона при взаимодействии волокон между собой. Чем больше протяженность охвата поперечного сечения, тем меньше погрешность оценки связывающих факторов, которая определяется неравномерностью распределения волокон и неоднородностью состава картона. Особенно актуально это для многослойного картона, содержащего разное макулатурное сырье в составе и в каждом из слоев.

Для прогнозирования свойств картона по микроструктуре поперечного среза необходимо определение зависимостей между геометрическими характеристиками микроструктуры поперечного среза и физико-механическими показателями, что являлось главной задачей исследований.

Материалы и методы исследования

Для получения верхнего (покровного слоя) тест-лайнера использовалась макулатура офисных видов бумаг, которая в основном состоит из сульфатной беленой целлюлозы лиственных и хвойных пород древесины, прошедшей кислородную отбелку. В макулатуре офисных видов бумаг, кроме волокнистого материала, может содержаться до 15% мела, но при последующих циклах он вымывается, а затем оседает в циклонных аппаратах. Другие добавки (проклеивающие, удерживающие, чернила, флокулянты) содержатся в офисной макулатуре в малых количествах (всего не более 3–5%), поэтому существенного влияния на качество сырья не оказывают [25]. Нижний слой картона существенно отличается по составу от покровного. Сырьем для нижнего слоя тест-лайнера является макулатура преимущественно из гофрокартона, которая содержит волокна хвойных пород древесины, полученных сульфатным способом. Целлюлоза для нижнего слоя не отбеливается, поэтому содержит до 10–15% лигнина, что придает дополнительную жесткость волокнистому материалу. Как правило, первичные волокна небеленой сульфатной целлюлозы хвойных пород древесины имеют большую среднюю длину (около 2–2.5 мм), при повторных циклах использования этот показатель снижается до 1.5 мм [26]. Разница в средней длине волокна между волокнами нижнего и верхнего слоев в 0.5–1 мм отражается на микроструктуре поперечного среза. Это различие позволяет выделить границу раздела слоев, по которой в последующем можно оценить микроструктуру каждого слоя.

Экспериментальные исследования проводились в Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна в соответствии с международными стандартами, где были смоделированы все стадии процесса подготовки массы и формования многослойного картона на производстве. Подробное описание процессов розпуска, размола, грубой и тонкой очистки макулатуры, а также формования, прессования и сушки многослойного картона представлены в работе [27], посвященной исследованию физико-механических свойств двух- и трехслойного картона тест-лайнера.

Поперечный срез многослойного картона получен ионным травлением с помощью установки СЭМ SEMPrep2 (модель SC-2100) (изготовитель Technoorg Linda Ltd.Co. H-1044, Будапешт). Затем с помощью электронного микроскопа компании TESCAN MIRA3 LMH (Чешская Республика) формировались изображения поперечных срезов, которые в последующем обрабатывались с помощью графических программ Adobe Photoshop, AutoCAD. Подробное описание режимов ионного травления для получения поперечного среза высокого качества представлены в [28], а примеры анализа геометрических показателей микроструктуры поперечного среза – в работе [29].

Подготовленные методом ионной резки образцы напылялись хромом в вакуумной камере. Толщина слоя напыления составляла 30 нм. Этот слой позволил обеспечить отток заряда при дальнейшем изучении образца в электронном микроскопе. Подготовленный образец фиксировался на латунной подложке с помощью двухстороннего углеродного скотча и устанавливался в специальный держатель, адаптированный под ионную резку волокнистого материала.

Протяженность среза, которая анализируется в данной работе, в отличие от предыдущих наших исследований, была увеличена до 350 мкм, что позволило получить более достоверные результаты.

Различие в микроструктуре поперечного среза, а именно протяженность линий контакта обозначается использованием различных способов подготовки макулатурной массы. В работе рассматривается четыре варианта подготовки волокон для формирования картона: сухая подготовка макулатуры и аэродинамическое формование; сухая подготовка макулатуры с подачей волокон в водоволокнистую массу с последующим формованием, сухая подготовка макулатуры с подачей в массу, размолот в водной среде и последующим мокрым формованием; традиционная мокрая подготовка макулатуры и формование.

Результаты и обсуждение

Одним из главных преимуществ исследования микроструктуры многослойного картона тест-лайнера является возможность графической обработки поперечного среза, который получен методом ионной резки, благодаря чему были выделены профили границ покровного и нижнего слоев картона, а также линии контактов волокон и стенок волокон (рис. 2).

Ранее было установлено [1], что в большей степени на механические характеристики картона влияет протяженность линии контакта, по которой действуют в совокупности основные факторы, определяющие межволоконные силы связи. По длине этих линий выполняется главное и необходимое условие для возникновения комплекса связеобразующих факторов (сил механического сцепления, водородных связей и др.) – сближение поверхностей волокон.

Экспериментальные данные по общей протяженности линий контактов волокон представлены в таблице 1, из которой видно, что покровный слой, полученный аэродинамическим формованием (АДФ), обладает наименьшим значением протяженности (102 мкм) и совместно с нижним слоем протяженностью в 394 мкм, общая для двухслойного картона в целом составляет 496 мкм.

Протяженность линий контактов волокон для покровного слоя полученного методом сухого диспергирования макулатуры с подачей волокон в массу составила 414 мкм, а в сумме с протяженностью контакта нижнего слоя, подготовленного традиционным способом (452 мкм), общая протяженность составила 866 мкм. Размол волокон, подготовленных сухим способом, в водной среде повысил протяженность линий контактов волокон до 625 мкм в покровном слое. В сумме с протяженностью контактов нижнего слоя 466 мкм, а для двухслойного картона этот показатель составил 1091 мкм. Для двухслойного картона тест-лайнера, подготовленного по традиционной мокрой технологии, протяженность линий контактов волокон практически не отличается от протяженности контактов волокон, соответствующих варианту подготовки макулатуры сухим способом с последующим размолотом в водной среде (1132 мкм). При подготовке волокон макулатуры для обоих слоев традиционным способом определить границу раздела между слоями очень сложно, поэтому для этого варианта рассматривается только протяженность линий контактов двухслойного картона в целом.



Рис. 2. Фрагмент изображения поперечного среза +2-хслойного тест-лайнера, выполненного методом ионной резки с дальнейшей обработкой графическими программами: **■** – профиль покровного слоя; **▬** – граница между покровным и нижним слоем; **▬** – профиль нижнего слоя; **▬** – линии контакта волокон; **▬** – линии контакта стенок волокон

Таблица 1. Общая протяженность линий контакта волокон в поперечном срезе двухслойного картона тест-лайнера

Наименование слоя	Протяженность линий контактов волокон, мкм			
	сухая подготовка волокон и АДФ	сухая подготовка волокон и традиционное формование	сухая подготовка с размол в водной среде	мокрая подготовка волокна и формование
Покровный слой	102	414	625	
Нижний слой	394	452	466	
Двухслойный картон	496	866	1091	1130

Применение макулатурной массы, полученной из волокон, подготовленных сухим способом, позволило сформировать традиционным методом покровный слой, в котором протяженность контактов повысилась более чем в 4 раза. Это объясняется тем, что волокна целлюлозы, перешедшие из стеклообразного состояния в высокоэластичное при взаимодействии с водой, образовали более плотную структуру [30]. Размол в водной среде позволил увеличить протяженность контактов волокон в покровном слое еще в 1.5 раза, до 625 мкм, увеличив механические показатели покровного слоя и двухслойного картона тест-лайнера в целом до значений, соответствующих картону, производимому по традиционному мокрому способу.

Кроме участвующих в связеобразовании линий контактов волокон в поперечном срезе существуют линии контакта между стенками волокон. По этим линиям так же, как и по линиям контакта между волокнами, действует совокупность всех сил. Однако эти линии соединяют внутренние поверхности стенки волокон и практически не влияют на образование межволоконных связей. Линии контакта стенок волокон отмечены на рисунке 2 фиолетовым цветом. Характер распределения линий контакта стенок волокон по размерам определяется в большей степени размерами и расположением волокон относительно плоскости среза, то есть сколько волокон попадает в область среза и как они располагаются. Также важным показателем, определяющим протяженность и распределение линий контакта стенок волокон, является природа волокна, цикл использования волокон и технология подготовки массы. Если волокно по своей природе грубое, то вероятность возникновения линии контакта между стенками ниже, чем для эластичного. Грубое волокно, скорее всего, в поперечном срезе не потеряет форму кольцевого сечения (рис. 3 А). Если волокна эластичны по своей природе и прошли несколько стадий подготовки (волокна, подготовленные из макулатуры), то, вероятнее всего, форма поперечного среза такого волокна выглядит как сплюснутое кольцо (рис. 3С). Существует промежуточный вариант, когда стенки волокна контактируют частично (рис. 3В).

Следует отметить, что степень воздействия каждой из совокупности сил связей (водородные связи и механические силы сцепления) при контакте стенок волокон будут отличаться от степени воздействия при контакте между волокнами. В первую очередь это связано с отличием внешней поверхности волокна от внутренней. Внутренняя поверхность волокон более гладкая, в отличие от внешней, которая может быть покрыта наполнителем или проклеивающим веществом и иметь фибриллированную поверхность. Вероятно, при контакте стенок волокна по внутренней поверхности наиболее значимыми являются водородные силы связи. При контакте волокон внешними поверхностями водородные силы могут быть «заблокированы» наполнителем или проклеивающим веществом. Например, средний размер частиц мела (основного наполнителя для покровного слоя тест-лайнера), который находится между волокнами при их соприкосновении, составляет 1–3 мкм, а для образования водородных связей необходимо 0.25 нм [1]. Таким образом, частица мела может блокировать большую область контактирующей поверхности волокон. В таких условиях важную роль играют механические силы сцепления волокон, находящиеся в напряженном состоянии. Оценить, какую долю воздействия оказывают водородные силы связи или механические силы сцепления, практически невозможно, так как исследуемые образцы имеют неопределенную и неоднородную структуру.

Несмотря на отличие в технологиях подготовки сырья и формования картона, можно говорить о том, что протяженность линий контактов будет существенно влиять на механические показатели. На рисунках 4–8 представлены зависимости между протяженностью линии контактов волокон и механическими показателями картона.

Из рисунков видно, что механические характеристики картона находятся в прямо пропорциональной зависимости от протяженности линий контактов волокон. Сопротивление продавливанию (рис. 4), сжатию на коротком расстоянии (рис. 4) и разрыву (рис. 5) в большей степени зависят от межволоконных сил связей, которых становится больше, когда увеличивается протяженность линий контакта. Подготовка макулатуры традиционным способом включает в себя мокрый размол в мельницах, в результате которого волокна лучше

набухают, становятся более эластичными, за счет чего плотнее прилегают друг к другу, повышая протяженность линий контактов. Такой же эффект наблюдается при мокром размоле подготовленных сухим способом волокон. Поэтому механические показатели и протяженности линий контактов в последних двух вариантах подготовки макулатуры достаточно близки (1091 и 1132 мкм).

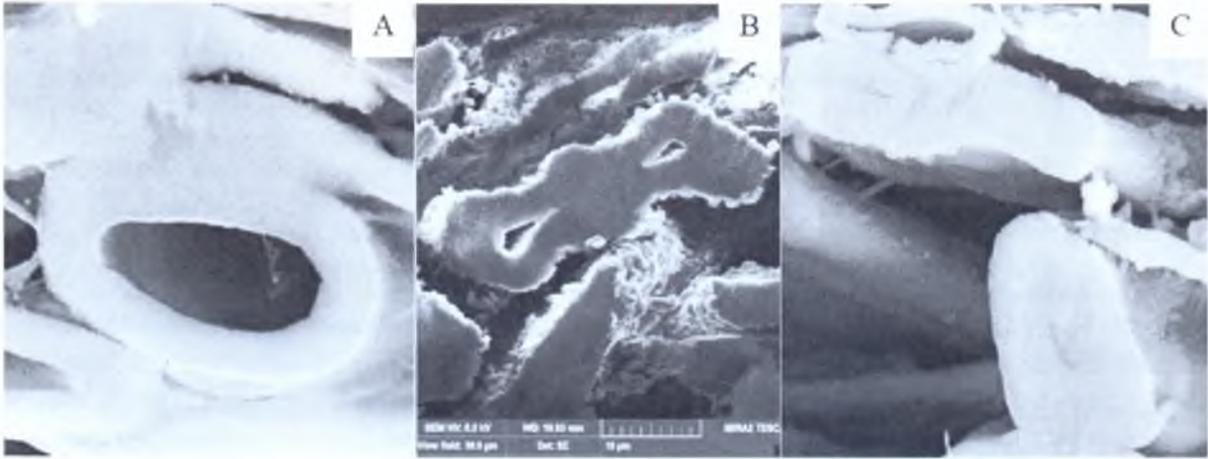


Рис. 3. Варианты поперечных срезов волокон: А – срез волокна в виде кольца; В – сплюснутое волокно с частичным контактом стенок; С – полностью сплюснутое волокно



Рис. 4. Зависимость сопротивления продавливанию от протяженности линий контактов волокон



Рис. 5. Зависимость сопротивления сжатию на коротком расстоянии от протяженности линий контактов волокон

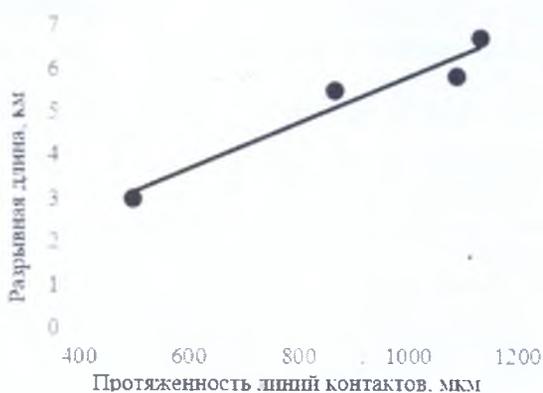


Рис. 6. Зависимость разрывной длины от протяженности + линий контактов волокон



Рис. 7. Зависимость жесткости на изгиб от протяженности линий контактов волокон



Рис. 8. Зависимость сопротивления расслаиванию от протяженности линий контактов волокон

Жесткость при изгибе картона в основном определяется двумя факторами при одинаковой природе волокон и соблюдением условий формования. Первый фактор – это связеобразование волокон, которое находится в прямой зависимости с протяженностью линий контактов, а второй – толщина картона, повышение которой приводит к увеличению сопротивления жесткости в кубе. Ранее было установлено, что толщина картона при аэродинамическом формовании повышается на 30–50% [1], но при этом настолько маленькая протяженность контактирующих между волокнами зон (в 4–5.5 раза в отличие от остальных вариантов, представленных в таблице 1), что механические показатели имеют наименьшее значение. При подаче волокон, подготовленных сухим способом в массу, повышается толщина на 15–30%, но при этом сохраняется протяженность контактов волокон на уровне, соответствующему традиционному формованию слоя. Поэтому на рисунке 5 показатель жесткости при подготовке волокон сухим способом без размола смещен от линии тренда в сторону увеличения жесткости (протяженность контакта – 866 мкм, жесткость при изгибе – 1.25 кН·м).

Важно отметить, что межслоевая прочность при аэродинамическом формовании в 20 Н (рис. 6) крайне мала и на производстве при таком значении картон не удовлетворяет требованиям заказчиков. Разрушение картона при этом проходит не между слоями, а по покровному слою картона [27]. Поэтому с точки зрения практического использования зависимостей при оценке качества картона перспективными являются варианты образцов картона с протяженностью линий контакта более 800 мкм на 350 мкм протяженности среза.

Выводы

На основе микроскопических снимков поперечных срезов двухслойного картона тест-лайнера и их графической обработки были выделены протяженности контактов волокон. Руководствуясь тем, что наиболее значимым показателем из всех геометрических параметров микроструктуры является протяженность контактов волокон, были определены основные механические свойства картона, произведенного по различным технологиям.

Установлено, что практически все механические показатели зависят прямо пропорционально от протяженности линий контактов волокон. Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования механических свойств картона при его производстве на предприятиях отрасли.

Список литературы

1. Мидуков Н.П. Ресурсосберегающая технология тест-лайнера с белым покровным слоем: автореф. дис. ... докт. тех. наук. СПб. 2020. 32 с.
2. Liu C., Marchesini S., Kim M. Quantitative phase-contrast confocal microscope // Optical Society of America. 2014. Vol. 22, no. 15. Pp. 17830–17839. DOI: 10.1364/OE.22.017830.
3. Robertson L.R. The use of phase-contrast microscopy to assess and differentiate the microbial population of paper mill // Tappi Journal. 1993. Vol. 76, no. 3. Pp. 83–87.
4. Zeng X., Vishtal A., Retulainen E., Sivonen E., Fu S. The Elongation Potential of Paper – How Should Fibers be Deformed to Make Paper Extensible // BioResources. 2013. Vol. 8, no. 1. Pp. 472–486.
5. Smith K.C. Scanning electron microscopy in pulp and paper research // Pulp Paper Mag Can. 1959. Vol. 60, no. 12. Pp. 366–371.
6. Sachs I.B. Retaning raised fibrils and micro fibrils on fiber surface // Tappi Journal. 1986. Vol. 69, no. 11. Pp. 124–127.

7. Казаков Я.В., Чухчин Д.Г. Изучение формирования структуры целлюлозных волокнистых материалов с применением криофиксации и лиофилизации // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: матер. II Междунар. науч.-техн. конф. Архангельск, 2013. С. 56–63.
8. Core H.A., Cote W.A., Day A.C. Wood structure and Identification. Syracuse Wood Sci. Ser. 6. Syracuse Univ. Press, Syracuse. New York. 1979. 182 p.
9. Stratton R.A., Corlson N.L. Fiber wall damage during bond failure // Nordic Pulp Paper Res. J. 1993. N2. Pp. 245–249.
10. Peterson R.A., Williams C.L. Determining paper-coating thickness with electron microscopy and image analysis // Tappi J. 1992. Vol. 75, no. 10. Pp. 122–126.
11. Gregerson O.W., Johnsen P.O., Helle T.J. Small-scale topographical variation of newsprint surfaces and their effect on printing ink transfer distribution // Pulp and Paper Sci. 1995. Vol. 21, no. 10. Pp. 331–336.
12. Зильберглейт М.А., Темрук В.И. Применение пакета IMAGEJ для обработки изображений, полученных электронной сканирующей микроскопией (на примере анализа бумаги) // Полимерные материалы и технологии. 2017. Т. 3, №1. С. 71–74.
13. Ma J., Wang Z., Zhou X., Xiao H. Self-reinforced grease-resistant sheets produced by paper treatment with zinc chloride solution // BioRes. 2005. Vol. 10, no. 4. Pp. 8225–8237. DOI: 10.15376/biores.10.4.8225-8237.
14. Hellawell J.M., Nelson T. Scanning electron microscopy studies of paper coating structure in cross-section // Tappi. 1971. Vol. 54, no. 10. Pp. 1647–1654.
15. Gibbon D.L., Simon E.C., Cornelius R.S. New electron and light optical techniques for examining papermaking // Tappi J. 1989. Vol. 72, no. 10. Pp. 87–91.
16. Petrova M.G., Prokhorov V.V., Pozin S.I., Kovaleva N.N., Demikhov E.I. Atomic Force and Scanning Near-Field Optical Microscopy Study of Carbocyanine Dye J-Aggregates // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2014. Vol. 78, no. 12. Pp. 1362–1366. DOI: 10.2174/1573413710666140411000614.
17. Low-Temperature Scanning Electron Microscopy (LTSEM). URL: <http://uni-tuebingen.de/en/6799>.
18. Снигирёва М.Г. Низкотемпературный сканирующий ближнепольный оптический микроскоп. Приборы и методы экспериментальной физики: автореф. дис. ... канд. физ.-матем. наук. М., 2015. 23 с.
19. Низкотемпературный сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп. URL: <http://www.rusnanonet.ru>.
20. Borch J., Lyne M.B., Mark R.E., Habeger C. Handbook of physical testing of paper/second edition. CRC Press, New York. 2001. 560 p.
21. De Oliveira R.L., Albuquerque D.C., Cruz T.S., Yamaji F.M., Leite F.L. Measurement of the Nanoscale Roughness by Atomic Force Microscopy: Basic Principles and Applications. InTech. 2012. 256 p. DOI: 10.5772/37583.
22. Sokolov I. Atomic Force Microscopy in Cancer Cell Research. American scientific publishers. 2007. Pp. 1–17.
23. Belitto V., Craotina R. Atomic force microscopy – imaging, measuring and manipulating surfaces at the atomic scale. 2012. 263 p.
24. Hirn U., Schennach R., Ganser C., Magnusson M., Teichert C., Östlund S. The area in molecular contact in fiber-fiber bonds // Trans. of the 15th Fundamental Research Symposium. Cambridge. 2013. Pp. 201–226.
25. Ванчаков М.В., Кулешов А.В., Александров А.В., Гаузе А.А. Технология и оборудование переработки макулатуры. СПб., 2019. Ч. I. 107 с.
26. Мидуков Н.П., Лялина Ю.А., Куров В.С., Смолин А.С. Морфологические свойства волокон сухого способа подготовки макулатуры при производстве картона // Химия растительного сырья. 2019. №4. С. 109–112. DOI: 10.14258/jcprm.2020014821.
27. Шрайннер Т., Гроссманн Х., Мидуков Н.П., Куров В.С., Смолин А.С. Влияние сухого диспергирования макулатуры на свойства многослойного картона // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 251–260. DOI: 10.14258/jcprm.2020046956.
28. Патент 2723972 (РФ). Способ подготовки поперечного среза для контроля параметров целлюлозосодержащего материала / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, Смолин А.С., Сомов П.А. 18.06.2020.
29. Midukov N.P., Kazakov Ya.V., Heineman S., Kurov V.S., Smolin A.S. Investigation of transverse section of multi layered paperboard by ion cutting technique // Fiber Chemistry. 2020. Vol. 52, no. 1. Pp. 51–57.
30. Smolin A.S., Akim E.L. Role of the relaxation state of polymer components in wood when making composite packaging materials (corrugated cardboard) // Fiber Chemistry. 2018. Vol. 50, no. 4. Pp. 81–88.

Поступила в редакцию 8 февраля 2021 г.

После переработки 12 августа 2021 г.

Принята к публикации 18 августа 2021 г.

Для цитирования: Мидуков Н.П., Куров В.С. Влияние микроструктуры картона на его механические свойства // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 361–371. DOI: 10.14258/jcprm.2021049208.

Midukov N.P.^{*}, Kurov V.S. EFFECT OF MICROSTRUCTURE OF CARDBOARD ON ITS MECHANICAL PROPERTIES
 St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, st. Ivana Chernykh, 4, St. Petersburg, 198095
 (Russia), e-mail: mnp83@mail.ru

The article is devoted to the prediction of mechanical properties on the study of the microstructure of the cross section of cardboard. The results of the work in the future can be used as an addition to standard methods for evaluating the mechanical properties of cardboard. On the basis of images of the microstructure of the cross sections of the two-layer test liner cardboard and their graphic processing using modern computer programs, the lengths of fiber contacts were determined. Guided by the fact that the most significant indicator of all geometric parameters of the microstructure is the length of fiber contacts, the main mechanical properties of cardboard were determined (bursting strength and compression resistance, breaking length, bending stiffness, inter-layer strength) produced according to various technologies (conventional method of preparing recovered paper stock, dry defibration of recovered paper with aerodynamic formation of the top layer, dry defibration of recovered paper with subsequent supply of fibers to the stock and dry defibration of recovered paper with subsequent grinding in the stock). Each of the technologies allows to obtain cardboard with different mechanical parameters. It has been established that almost all mechanical indicators depend directly proportionally on the length of the fiber contact lines. The obtained dependencies can be used to predict the mechanical properties of cardboard in its production at industry enterprises.

Keywords: cardboard, recovered paper, mechanical properties, microstructure, test-liner.

References

1. Midukov N.P. *Resursosberegayushchaya tekhnologiya test-laynera s belym pokrovnym sloyem: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk.* [Resource-saving technology of a test-liner with a white cover layer: a dissertation of the Doctor of Technical Sciences]. St. Petersburg, 2020, 32 p. (in Russ.).
2. Liu C., Marchesini S., Kim M. *Optical Society of America*, 2014, vol. 22, no. 15, pp. 17830–17839. DOI: 10.1364/OE.22.017830.
3. Robertson L.R. *Tappi Journal*, 1993, vol. 76, no. 3, pp. 83–87.
4. Zeng X., Vishtal A., Retulainen E., Sivonen E., Fu S. *BioResources*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 472–486.
5. Smith K.C. *Pulp Paper Mag Can.*, 1959, vol. 60, no. 12, pp. 366–371.
6. Sachs I.B. *Tappi Journal*, 1986, vol. 69, no. 11, pp. 124–127.
7. Kazakov YA.V., Chukhchin D.G. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: mater. II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Problems of the Mechanics of Pulp and Paper Materials: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference]. Arkhangelsk, 2013, pp. 56–63. (in Russ.).
8. Core H.A., Cote W.A., Day A.C. *Wood structure and Identification*. Syracuse Wood Sci. Ser. 6. Syracuse Univ. Press, Syracuse, New York, 1979. 182 p.
9. Stratton R.A., Corlson N.L. *Nordic Pulp Paper Res. J.*, 1993, no. 2, pp. 245–249.
10. Peterson R.A., Williams C.L. *Tappi J.*, 1992, vol. 75, no. 10, pp. 122–126.
11. Gregerson O.W., Johnsen P.O., Helle T.J. *Pulp and Paper Sci.*, 1995, vol. 21, no. 10, pp. 331–336.
12. Zil'bergleyt M.A., Temruk V.I. *Polimernyye materialy i tekhnologii*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 71–74. (in Russ.).
13. Ma J., Wang Z., Zhou X., Xiao H. *BioResources*, 2005, vol. 10, no. 4, pp. 8225–8237. DOI: 10.15376/biores.10.4.8225-8237.
14. Hellowell J.M., Nelson T. *Tappi*, 1971, vol. 54, no. 10, pp. 1647–1654.
15. Gibbon D.L., Simon E.C., Cornelius R.S. *Tappi J.*, 1989, vol. 72, no. 10, pp. 87–91.
16. Petrova M.G., Prokhorov V.V., Pozin S.I., Kovaleva N.N., Demikhov E.I. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2014, vol. 78, no. 12, pp. 1362–1366. DOI: 10.2174/1573413710666140411000614.
17. Low-Temperature Scanning Electron Microscopy (LTSEM). URL: <http://uni-tuebingen.de/en/6799>.
18. Snigirova M.G. *Nizkotemperaturnyy skaniruyushchiy blizhnepol'nyy opticheskiy mikroskop. Pribory i metody eksperimental'noy fiziki: avtoref. dis. ... kand. fiz.-matem. nauk.* [Low-temperature scanning near-field optical microscope. Devices and methods of experimental physics: abstract of the dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences]. Moscow, 2015. 23 p. (in Russ.).
19. *Nizkotemperaturnyy sverkhvysokovakuumnyy skaniruyushchiy tunnel'nyy mikroskop.* [Low-temperature ultra-high-vacuum scanning tunneling microscope]. URL: <http://www.rusnanonet.ru>. (in Russ.).
20. Borch J., Lyne M.B., Mark R.E., Habeger C. *Handbook of physical testing of paper/second edition*. CRC Press, New York, 2001. 560 p.
21. De Oliveira R.L., Albuquerque D.C., Cruz T.S., Yamaji F.M., Leite F.L. *Measurement of the Nanoscale Roughness by Atomic Force Microscopy: Basic Principles and Applications*. InTech, 2012. 256 p. DOI: 10.5772/37583.
22. Sokolov I. *Atomic Force Microscopy in Cancer Cell Research*. American scientific publishers, 2007, pp. 1–17.
23. Belitto V., Craotina R. *Atomic force microscopy – imaging, measuring and manipulating surfaces at the atomic scale*. 2012. 263 p.
24. Hirn U., Schennach R., Ganser C., Magnusson M., Teichert C., Östlund S. *Trans. of the 15th Fundamental Research Symposium*, Cambridge, 2013, pp. 201–226.
25. Vanchakov M.V., Kuleshov A.V., Aleksandrov A.V., Gauze A.A. *Tekhnologiya i oborudovaniye pererabotki makulatury.* [Waste paper processing technology and equipment]. St. Petersburg, 2019, part. I, 107 p. (in Russ.).

^{*} Corresponding author.

26. Midukov N.P., Lyalina YU.A., Kurov V.S., Smolin A.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 4, pp. 109–112. DOI: 10.14258/jcprm.2020014821. (in Russ.).
27. Shraynner T., Grossmann KH., Midukov N.P., Kurov V.S., Smolin A.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 251–260. DOI: 10.14258/jcprm.2020046956. (in Russ.).
28. Patent 2723972 (RU). 18.06.2020. (in Russ.).
29. Midukov N.P., Kazakov Ya.V., Heineman S., Kurov V.S., Smolin A.S. *Fiber Chemistry*, 2020, vol. 52, no. 1, pp. 51–57.
30. Smolin A.S., Akim E.L. *Fiber Chemistry*, 2018, vol. 50, no. 4, pp. 81–88.

Received February 8, 2021

Revised August 12, 2021

Accepted August 18, 2021

For citing: Midukov N.P., Kurov V.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 4, pp. 361–371. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021049208.