



УДК 676.054.6

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109

**ВЛИЯНИЕ ФИБРИЛЛИРОВАНИЯ И УКРОЧЕНИЯ ВОЛОКОН ПРИ РАЗМОЛЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАТИВНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ\****В.В. Гораздова<sup>1</sup>, асп.**Е.В. Дернова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.**Д.А. Дулькин<sup>2</sup>, д-р. техн. наук, ген. директор**Е.О. Окулова<sup>1</sup>, асп.*

<sup>1</sup>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, e.okulova@narfu.ru

<sup>2</sup>Управляющая компания «Объединенные бумажные фабрики», ул. Трудовая, д. 2, пос. Полотняный Завод, Дзержинский р-н, Калужская обл., Россия, 249844;

e-mail: dmdulkin@yandex.ru

Размол волокнистых материалов является одним из ключевых процессов обработки растительных волокон в целях придания им бумагообразующих свойств. При размолу растительных волокон в водной среде происходит как чисто механический (укорачивание и продольное расщепление волокон на фибриллы), так и коллоидно-химический (набухание и гидратация волокон) процессы. Цель работы – изучение влияния преимущественного укорачивающего или фибриллирующего размола, смоделированного в лабораторных условиях, на прочностные и деформационные характеристики волокнистых полуфабрикатов. Преимущественное укорочение волокон наблюдается при размолу массы низкой концентрации, в ходе которого на каждое волокно, попадающее между ножами размалывающего аппарата, приходится большее удельное давление. Для получения сильно фибриллированных волокон, напротив, следует подвергать размолу массу высокой концентрации, в процессе которого каждому волокну будет соответствовать меньшее удельное давление и большее взаимное трение волокон, способствующее их расчесыванию и расщеплению. В связи с этим моделирование укорачивающего или фибриллирующего размола при разной концентрации массы проведено в лабораторных условиях с использованием трех видов размалывающего оборудования – лабораторного ролла, мельниц Йокро и PFI. Объектами исследования служили образцы хвойной небеленой целлюлозы высокого и нормаль-

\*При выполнении исследований использовалось оборудование Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера», Центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» и лаборатории нанотехнологии кафедры теоретической физики Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, созданных при финансовой поддержке Минобрнауки России.

*Для цитирования:* Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А., Окулова Е.О. Влияние фибриллирования и укорочения волокон при размолу на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов // Лесн. журн. 2018. № 2. С. 109–121. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109

ного выхода. Продемонстрирована возможность моделирования преимущественного укорачивания или фибриллирования волокон при лабораторном размоле, что позволяет целенаправленно изменять бумагообразующие свойства волокон и получать бумажный лист с заданными потребительскими свойствами.

*Ключевые слова:* размол, фибриллирование, укорачивание, целлюлоза высокого выхода, целлюлоза нормального выхода, прочность, деформативность, трещиностойкость.

### *Введение*

Назначение размола – придание волокнам определенной структуры и размеров по длине и толщине, гибкости и пластичности, необходимой степени гидратации для обеспечения хорошего формования (просвета) и заданных свойств бумаги. При размоле полуфабрикатов механические процессы вызывают измельчение волокон и обуславливают структуру бумаги, а коллоидно-физические явления, происходящие в результате взаимодействия целлюлозы с водой, обеспечивают связь волокон в бумаге [7–9].

В процессе размола происходит разрушение межмолекулярных связей внутри клеточной стенки и образование зон смещения структурных элементов в волокнах, в результате чего возникают микротрещины, в которые проникает вода, в дальнейшем вступающая во взаимодействие со свободными гидроксильными группами целлюлозного комплекса. Расклинивающее действие воды приводит к более глубокому расщеплению волокон при размоле, увеличивая их гибкость и пластичность. Образование зон смещения в волокнах осуществляется вдоль клеточной стенки и может закончиться расщеплением ее на отдельные фрагменты.

Многими исследователями [11–17] показано, что в процессе размола происходит внешняя и внутренняя фибрилляция волокна. Внешняя фибрилляция заключается в полном или частичном отделении от волокна фибрилл, что способствует увеличению наружной поверхности волокон и числа свободных гидроксильных групп на их поверхности. Вместе с тем внешняя фибрилляция ослабляет прочность самого волокна. Внутренняя фибрилляция приводит к необратимым перегруппировкам структурных элементов внутри набухшей вторичной стенки волокна, не уменьшая его прочности. Процессы внешнего и внутреннего фибриллирования трудно разделить, так как они тесно взаимосвязаны. Косвенно степень внешней фибрилляции оценивают обычно по изменению наружной поверхности волокон, внутренней – по их гибкости.

В процессе размола волокно подвергается также укорачиванию. При размоле жесткие целлюлозные волокна преимущественно фибриллируются, а мягкие укорачиваются, хотя этот процесс в значительной степени определяется режимом (условиями) размола [19, 20, 24].

Цель данной работы – исследование влияния преимущественного укорачивающего или фибриллирующего размола, смоделированных в лабораторных условиях, на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости волокнистых полуфабрикатов.

### *Объекты и методы исследования*

Моделирование различного характера разработки волокон при размоле (преимущественного укорачивания или фибриллирования) осуществляли при помощи следующего лабораторного оборудования:

ролл (концентрация массы 1,0 %) – для большей рубки волокон при двух значениях прижима по механическому воздействию (ролл<sub>min</sub> и ролл<sub>max</sub>);

мельница Йокро (6,0 %) – для получения промежуточного характера помола волокон (укорочение и фибриллирование примерно в равной степени);

мельница PFI (10,0 %) – для большего фибриллирующего воздействия на волокна в режиме присадки (PFI<sub>max</sub> = 2,25 мм) и отсадки (PFI<sub>min</sub> = 7,00 мм) барабана.

В качестве объектов исследования использовали хвойную целлюлозу нормального и высокого выхода (ЦВВ). Полуфабрикаты во всех размалывающих аппаратах размалывали до степени помола 25 °ШР. Для оценки прочностных и деформационных свойств исследуемых полуфабрикатов изготавливали лабораторные образцы массой 100 г/м<sup>2</sup>.

Для определения структурно-морфологических характеристик волокон использовали анализатор свойств волокна системы Fiber Tester, разработанный компанией «Lorentzen & Wettre». С помощью этого прибора оценивали следующие показатели: длина и ширина волокна ( $l$ , мм, и  $w$ , мкм); средний фактор формы ( $F$ , %); доля мелочи ( $M$ , %); грубость волокна ( $G$ , мкг/м); средний угол излома ( $Y_{изл}$ ); количество изломов на волокно ( $N_b$ ); средняя длина сегмента ( $l_{сегм}$ , мм).

Стандартные лабораторные образцы (отливки) из предварительно подготовленной волокнистой массы изготавливали в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 на листоотливном аппарате типа Rapid-Köthen BBS-2 Estantit [4].

Прочность волокон в структуре образцов ( $P_0$ , Н/см) определяли на приборе The Pulmac Zero-Span Tensile Tester согласно TAPPI T 231 sm-96 и TAPPI T 273 pm-95 [22, 23].

Величину межволоконных сил связи ( $F_{св}$ , МПа) устанавливали по методу С.Н. Иванова путем измерения внешнего усилия, необходимого для сдвига в плоскости соприкосновения слоев двухслойных отливок массой 1 м<sup>2</sup> каждого слоя 100 г.

Показатели качества лабораторных образцов исследовали, используя стандартные методы:

толщину образцов – по ГОСТ 27015–86 [5];

прочность на разрыв и удлинение при растяжении – по ГОСТ 13525.1–79 [1] при помощи лабораторного испытательного комплекса, включающего разрывную машину ТС 101-0,5 (г. Иваново) и ПЭВМ. Программное обеспечение Комплекс для математической обработки индикаторной диаграммы «нагрузка–удлинение» позволяет рассчитывать такие характеристики, как плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>); напряжение при разрушении ( $\sigma_p$ , МПа); деформация разрушения ( $\epsilon_p$ , %); разрывная длина ( $L$ , м); работа разрушения ( $A_p$ , мДж) [10];

прочность на излом при многократных перегибах ( $N$ , ч.д.п.) – по ГОСТ 13525.2–80 на приборе марки FRANK-PTI [2];

сопротивление продавливанию ( $\Pi$ , кПа) – по ГОСТ 13525.8–80 на приборе марки Lorentzen & Wettre [3];

сопротивление сжатию на коротком расстоянии ( $SCT$ , кН/м) – по ГОСТ Р ИСО 9895–2013 на приборе марки FRANK-PTI [6];

трещиностойкость ( $FT$ , Дж/м) – согласно ISO/TS 17958:2013 на приборе марки Lorentzen & Wettre [18, 21].

*Результаты исследования и их обсуждение*

Сравнительный микроскопический анализ образцов полуфабрикатов до и после лабораторного размола наглядно демонстрирует различный характер помола волокон в зависимости от вида размалывающего аппарата (рис. 1).

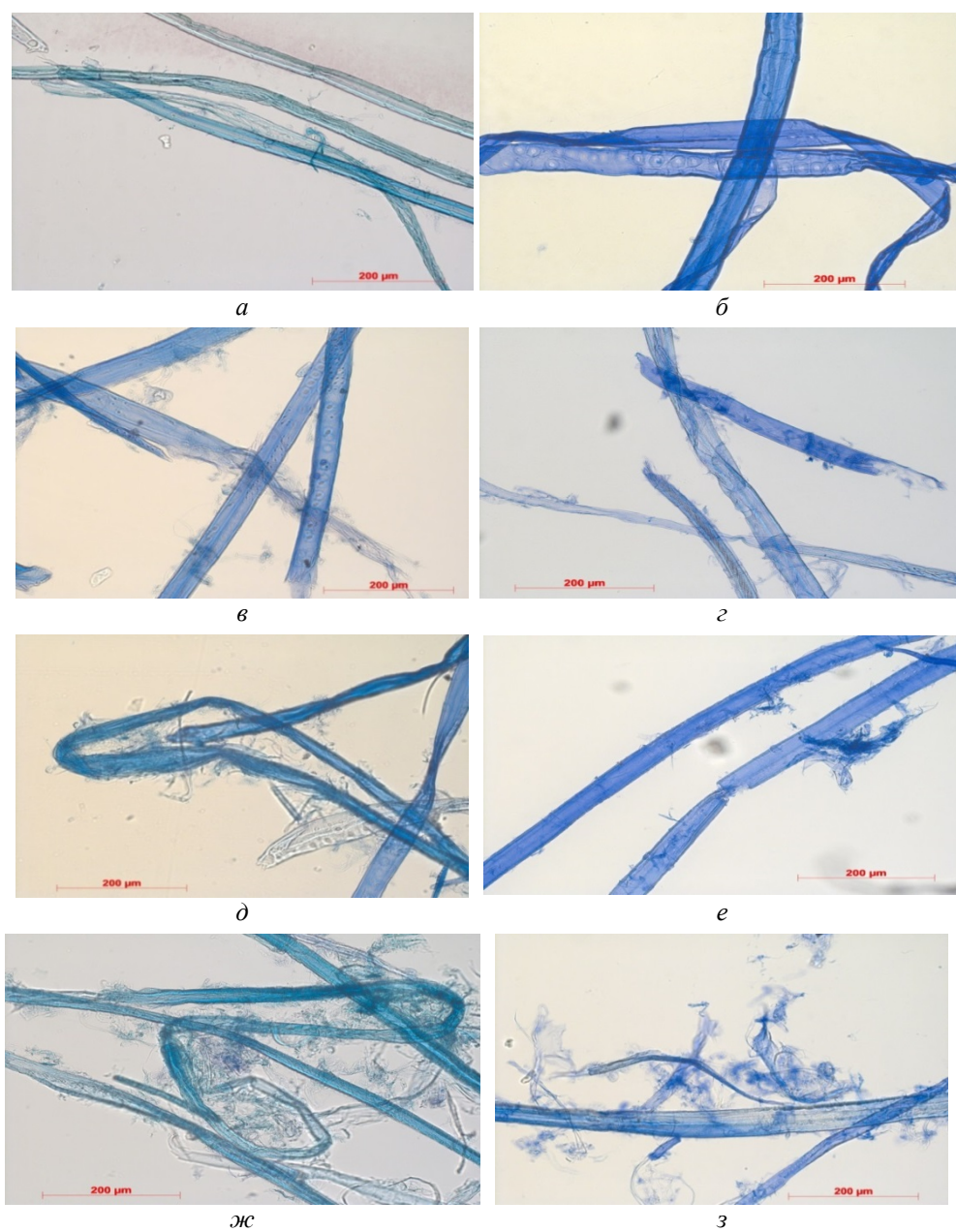


Рис. 1. Микрофотографии волокон полуфабрикатов до размола (а, б), после размола в ролле (в, г), мельницах Йокро (д, е) и PFI (ж, з): а, в, д, ж – ЦВВ; б, г, е, з – целлюлоза нормального выхода

Количественный анализ изменения структурно-морфологических свойств волокон в исследуемых условиях размола представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты, полученные на анализаторе волокна Fiber Tester для ЦВВ и целлюлозы нормального выхода

Образец	l, мм	w, мкм	F	M	Г, мкг/м	У <sub>изл</sub>	N <sub>в</sub>	l <sub>сегм</sub> , мм
			%					
<i>Целлюлоза высокого выхода</i>								
Исходный	2,41	32,7	89	2,4	192	52	0,444	1,99
После размола:								
ролл <sub>max</sub>	2,01	33,4	90	8,2	162	52	0,316	1,79
ролл <sub>min</sub>	2,02	33,0	91	7,9	156	51	0,241	1,87
ЦРА	2,18	32,8	89	7,0	168	56	0,396	1,88
PFI <sub>min</sub>	2,23	32,9	86	6,6	145	54	0,709	1,70
PFI <sub>max</sub>	2,21	32,8	86	7,3	156	54	0,694	1,70
<i>Целлюлоза нормального выхода</i>								
Исходный	2,26	30,0	82	4,9	199	56	1,239	1,25
После размола:								
ролл <sub>max</sub>	1,75	30,4	89	6,4	147	52	0,443	1,48
ролл <sub>min</sub>	2,09	29,6	89	5,3	146	55	0,359	1,84
ЦРА	1,77	27,8	87	4,7	143	55	0,571	1,38
PFI <sub>min</sub>	2,13	29,9	83	4,2	131	57	0,859	1,48
PFI <sub>max</sub>	2,12	29,7	84	4,1	145	57	0,959	1,41

В целом исходные (неразмолотые) волокна хвойных полуфабрикатов отличаются лентообразной формой с тупыми или заостренными концами и узкими полостями, наличием окаймленных пор. Длина волокон в среднем составляет 2,2...2,4 мм, ширина – около 30 мкм.

Волокна ЦВВ в силу технологии производства характеризуются более высокими значениями длины, ширины и фактора формы и относительно низкими значениями доли мелочи и степени дефектности волокон по сравнению с волокнами целлюлозы нормального выхода.

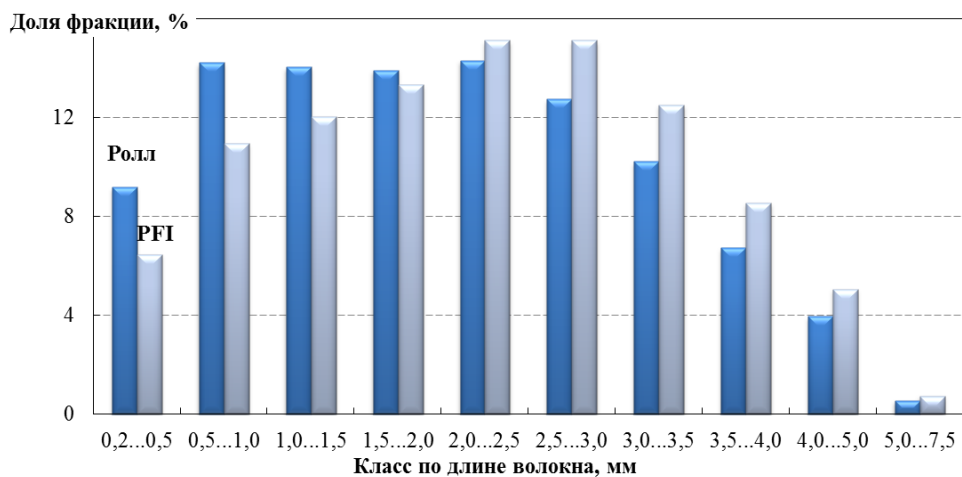
Проведение процесса размола в трех разных размалывающих аппаратах до одинаковой степени помола волокон позволило смоделировать характер их разработки. При размоле полуфабрикатов в ролле наблюдаются снижение их длины на 17 % для ЦВВ и 23 % для целлюлозы нормального выхода и закономерное существенное повышение доли мелкой фракции (в 3,5 и 1,3 раза соответственно). При этом отмечается «выпрямление» волокон (фактор формы для обоих видов полуфабрикатов составил 89...91 %) за счет обрывания крайних сегментов, о чем, в свою очередь, свидетельствует уменьшение числа изломов на волокне.

Противоположный характер разработки волокон получен при проведении процесса размола в мельнице PFI. Высокая концентрация массы при размоле обуславливает разработку поверхности волокон с сохранением их длины. Так, при размоле ЦВВ и целлюлозы нормального выхода до 25 °ШР отмечено снижение средней длины волокон лишь на 8 и 6 % соответственно. Преимущес-

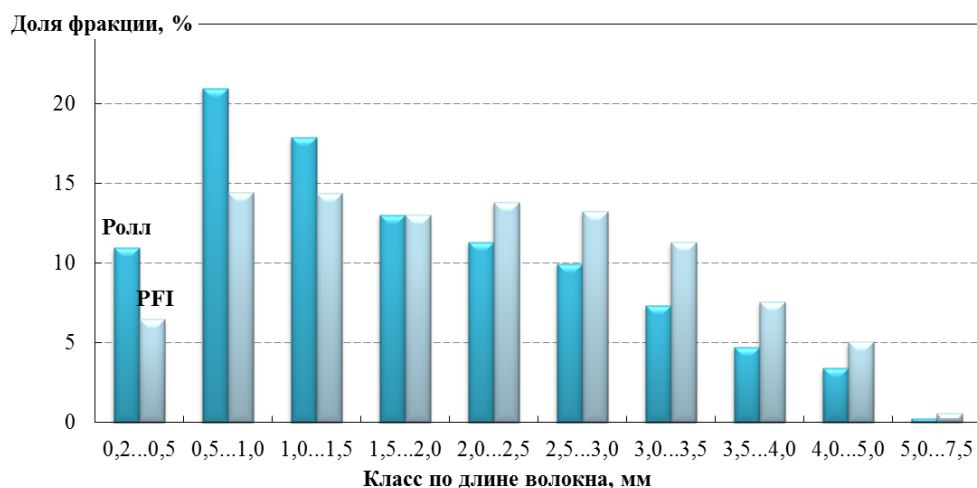
твенное фибриллирующее воздействие подтверждается изменением гибкости (фактор формы и число изломов на волокне) и грубости волокон, которая уменьшается от 192...199 до 131...145 мкг/м в данных условиях размола.

Данные об изменении свойств волокон в процессе размола в мельнице Йокро логично занимают промежуточное положение. Обработка волокон в этом аппарате в большей степени оказывает влияние на изменение свойств целлюлозы нормального выхода, что обусловлено более интенсивной степенью воздействия на клеточную стенку в процессе глубокой варки.

Дополнительным подтверждением преимущественного укорачивания или фибриллирования волокон при моделировании процесса размола полуфабрикатов в различных размалывающих аппаратах являются данные о распределении фракций волокон по длине в ролле и мельнице PFI (рис. 2).

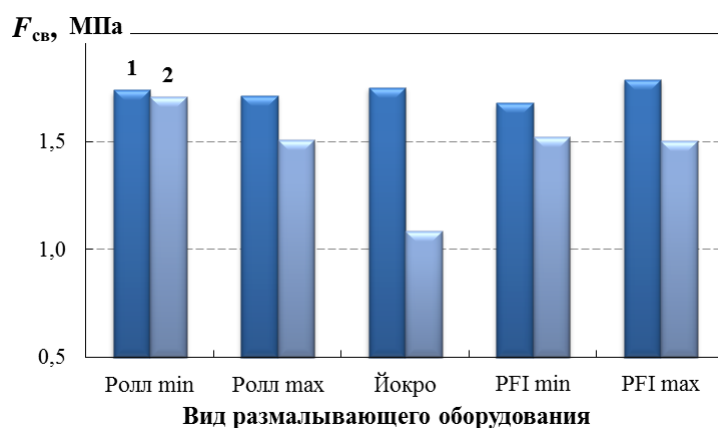


а

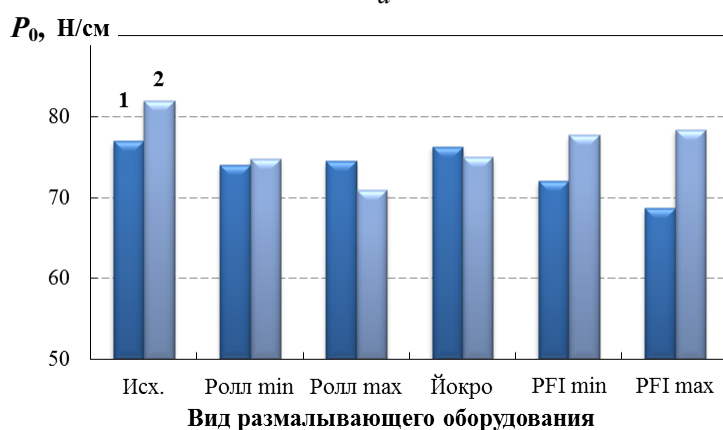


б

Рис. 2. Фракционный состав полуфабрикатов после размола: а – ЦВВ; б – целлюлоза нормального выхода



а



б

Рис. 3. Изменение интенсивности межволоконных взаимодействий (а) и собственной прочности волокон (б) полуфабрикатов после размола: 1 – ЦВВ; 2 – целлюлоза нормального выхода (исх. – исходный образец)

На рис. 3 представлено изменение фундаментальных свойств волокон (интенсивности межволоконных взаимодействий  $F_{св}$  и собственной прочности  $P_0$ ) в моделируемых процессах размола полуфабрикатов.

Отметим, что любой режим размола приводит к снижению прочности волокон в образцах ЦВВ. В большей степени отрицательный эффект размола для данного полуфабриката проявляется при проведении процесса, направленного на преимущественное фибриллирование волокон ( $P_0$  снижается на 11 %). Это, очевидно, обусловлено наличием в технологии получения ЦВВ стадии горячего размола, которая приводит к росту дефектности волокон. Высокая концентрация массы при моделировании фибриллирующего размола, в свою очередь, провоцирует снижение прочности волокон и их разрушение по местам дефектов, о чем свидетельствует повышенная доля мелочи в полуфабрикате.

В случае целлюлозы нормального выхода фибриллирующий характер размола позволяет сохранить прочность волокон на достаточно высоком уровне, что обусловлено повышенной гибкостью длинных лентообразных волокон целлюлозы с низким остаточным содержанием лигнина. Такие волокна

в большей степени подвержены рубящему действию размалывающей гарнитуры, но легче поддаются внутреннему фибриллированию без критичного нарушения целостности клеточной стенки.

Как укорачивающий, так и фибриллирующий характер размола волокон увеличивает уровень межволоконных сил связи в образцах. В большей степени данный эффект наблюдается у образцов целлюлозы нормального выхода, что является логичным следствием повышенной гибкости и существенного снижения грубости трахеид в условиях глубокой сульфатной варки. Наименьший уровень межволоконных сил связи отмечен у образцов, размолотых в мельнице Йокро, так как данный размалывающий аппарат обеспечивает «мягкое» воздействие на волокно с позиции не только его укорочения, но и фибриллирования и в меньшей степени интенсифицирует развитие межволоконных взаимодействий.

Уровень значений характеристик прочности, деформативности и трещиностойкости исследуемых полуфабрикатов в зависимости от характера помола волокна представлен в табл. 2.

Таблица 2

**Показатели физико-механических свойств лабораторных образцов ЦВВ и целлюлозы нормального выхода**

Размалывающее оборудование	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_p$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	$L$ , м	$FT$ , Дж/м	$A_p$ , мДж	$N$ , ч.д.п.	$SCT$ , кН/м	$\Pi$ , кПа
<i>Целлюлоза высокого выхода</i>									
Ролл <sub>min</sub>	0,377	37,7	2,71	8 950	0,367	219	980	3,84	640
ЦРА	0,399	39,5	2,84	9 200	0,505	237	1 100	4,24	720
PFI <sub>min</sub>	0,395	37,2	3,06	9 450	0,456	252	2 390	4,02	700
<i>Целлюлоза нормального выхода</i>									
Ролл <sub>min</sub>	0,754	80,8	3,00	10 800	0,811	272	2 930	4,18	610
ЦРА	0,755	70,3	3,93	9 300	0,976	311	2 720	3,47	800
PFI <sub>min</sub>	0,833	83,9	3,42	10 100	0,813	314	3 600	3,83	780

В целом для целлюлозы нормального выхода в моделируемых процессах размола оптимальный характер разработки волокон с позиций их средней длины и прочности наблюдается при преимущественном фибриллировании волокон. Такие лабораторные образцы целлюлозы отличаются наивысшей прочностью ( $\sigma_p$ ,  $A_p$ ,  $N$ ) и трещиностойкостью ( $FT$ ), что связано с уплотнением структуры образцов ( $\rho$ ), повышением их равномерности и сомкнутости за счет разработки волокон. Для целлюлозы нормального выхода максимальная деформационная способность ( $\varepsilon_p$ ) отмечена в случае проведения процесса размола в мельнице Йокро, которая обеспечивает получение массы с оптимально укороченными и фибриллированными волокнами одновременно.

Свойства ЦВВ изменяются незначительно из-за сохранности исходного лигноуглеводного комплекса клеток древесины в условиях короткой варки.

Для ЦВВ проведение размола в мельнице Йокро позволяет, с одной стороны, сохранить на достаточно высоком уровне среднюю длину и собственную прочность волокон, с другой – интенсифицировать развитие межволоконных взаимодействий. В совокупности данные факторы приводят к получению максимальных значений показателей качества ЦВВ (сопротивление



продавливанию, сопротивление сжатию по методу *SCT*, трещиностойкость). Максимальные значения разрывной длины, сопротивления излому, работы и деформации разрушения закономерно обнаруживаются в случае преимущественного фибриллирования волокон при размол в мельнице PFI при сохранении их длины.

Проведение процесса размола ЦВВ в лабораторном ролле, т. е. с выделением преимущественной рубки волокон, не позволяет получить высокий уровень значений ни по одному исследуемому показателю.

### *Заключение*

Установлено, что размол волокнистых полуфабрикатов существенно влияет на равномерность макроструктуры бумаги, поскольку изменяет содержание мелкой фракции, среднюю длину волокон, их прочность, гибкость и способность к связеобразованию.

Показано, что при размолу волокнистых полуфабрикатов в лабораторном ролле (при низкой концентрации массы) укорачивание волокон происходит в большей степени, в мельнице Йокро наравне с укорочением наблюдается фибриллирование клеточных стенок, в мельнице PFI (при высокой концентрации массы) в основном происходит фибриллирование волокон с образованием небольшого количества обрывков и мелких элементов.

Представлена возможность различных вариаций размола в целях придания готовой продукции требуемых физико-механических показателей полуфабрикатов для бумаги и картона.

Продемонстрирована простота и легкость моделирования размола в лабораторных условиях с преимущественным выделением определенного характера размола, что позволяет добиваться заданных бумагообразующих свойств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 13525.1–79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага, картон. Метод определения прочности на разрыв и удлинение при растяжении. Взамен ГОСТ 13525.1–68; введ. 1980-07-01. М.: Стандартиформ, 2007. 5 с.
2. ГОСТ 13525.2–80. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на излом при многократных перегибах. Взамен ГОСТ 13525.2–68; введ. 1981-06-30. М.: Стандартиформ, 2007. 4 с.
3. ГОСТ 13525.8–86. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения сопротивления продавливанию. Взамен ГОСТ 13525.8–78, ГОСТ 13648.7–784; введ. 1988-01-01. М.: Стандартиформ, 2007. 6 с.
4. 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.
5. 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.
6. ГОСТ Р ИСО 9895–2013. Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартиформ, 2014. 12 с.
7. 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: моногр., под ред. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2011. 176 с.

8. Дьякова Е.В., Комаров В.И., Носкова Е.С. Устойчивость к инициированию и росту трещин в структуре целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн. 2007. № 1. С. 126–141. (Изв. высш. учеб. заведений)
9. Иванов С.Н. Технология бумаги. 3-е изд. М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.
10. Казаков Я.В., Комаров В.И. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2001610526 от 10 мая 2001 г.
11. Карлссон Х. Гид по волокну. Анализ волокна и его применение в ЦБП: справочное руководство. Швеция: АВ Lorentzen & Werrte, 2006. 118 с.
12. Кларк Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытаний). М.: Лесн. пром-сть, 1983. 456 с.
13. Комаров В.И., Казаков Я.В. Связь фундаментальных свойств (по Кларку) неразмолотой сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // Лесн. журн. 1993. № 2-3. С. 112–116. (Изв. высш. учеб. заведений).
14. Комаров В.И., Казаков Я.В. Влияние размолта на корреляцию фундаментальных свойств (по Кларку) сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // Актуальные проблемы рационального использования природных и энергетических ресурсов Европейского Севера: сб. науч. тр. Архангельск: АЛТИ, 1994. С. 105–111.
15. Лумиайнен Д., Пузырев С.С., Чижов Г.И. Размол при низкой концентрации М.: Изд-во ЦИНТИхимнефтемаш, 1992. 23 с. (Целл.-бум. машиностроение: обзор. информ.).
16. Материалы компании «Advanced Fiber Technology» (AFT): информ. сообщение // 8-й Междунар. науч.-техн. конф. «Pap-Fog». СПб., 2004. 217 с.
17. Пузырев С.С., Коростелев С.А., Ковалева О.П. Размол при низкой концентрации // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 5. С. 54–58.
18. ISO/TS 17958:2013. Paper and Board. Determination of Fracture Toughness. Constant Rate of Elongation Method. Technical Committee, Subcommittee SC 2, 2013. 16 p.
19. Mäkelä P., Fellers C. An Analytic Expression for Determination of Fracture Toughness of Paper Materials // Innventia Report. 2010. No. 54.
20. Mäkelä P., Nordhagen H., Gregersen Ø.W. Validation of Isotropic Deformation Theory of Plasticity for Fracture Mechanics Analysis of Paper Materials // Nordic Pulp Paper Res. J. 2009. No. 24. Pp. 388–394.
21. SCAN-P77-95. Papers and Boards. Fracture Toughness. Scandinavian Pulp, Paper and Board. Testing Committee. 8 p.
22. TAPPI Standard T 231 pm-96. Zero-Span Breaking Strength of Pulp (Dry Zero-Span Tensile). Test Method T 231 cm-07. Atlanta, USA: TAPPI Press, 1996.
23. TAPPI T Standard 273 pm-95. Wet Zero-Span Tensile Strength of Pulp. Atlanta, USA: TAPPI Press, 1995.
24. Varanasi S., Batchelor W.J. Rapid Preparation of Cellulose Nanofibre Sheet // Cellulose. 2013. Vol. 20, no. 1. Pp. 211–215.

Поступила 24.10.17

UDC 676.054.6

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109

**The Effect of Fiber Brushing and Shortening when Beating on the Strength, Deformation and Fracture Toughness Properties of Cellulosic Materials***V.V. Gorazdova<sup>1</sup>, Postgraduate Student**E.V. Dernova<sup>1</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor**D.A. Dul'kin<sup>2</sup>, Doctor of Engineering Sciences, General Director**E.O. Okulova<sup>1</sup>, Postgraduate Student*<sup>1</sup>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, e.okulova@narfu.ru

<sup>2</sup>United Paper Factories, ul. Trudovaya, 2, Polotnyanny Zavod village, Dzerzhinskiy district, Kaluga region, 249844, Russian Federation; e-mail: dmdulkin@yandex.ru

Beating of fibrous materials is one of the key stages of plant fibers processing in order to obtain paper-forming properties. When beating plant fibers in an aqueous medium we can observe two main processes: a purely mechanical (fiber shortening and longitudinal splitting into fibrils) and colloid-chemical (fiber swelling and hydration). The goal of research is to study the effect of the preferential shortening or fibrillating beating simulated in laboratory conditions on the strength and deformation characteristics of fibrous semifinished products. A preferential shortening of fibers occurs when thin stock beating and each fiber entering between the knives of the beater has a higher specific pressure. To obtain highly fibrillated fibers, by contrast, thick stock should be subjected to beating, and each fiber comes under minimal specific pressure and a greater mutual frequency of fibers, which facilitates their combing and splitting. Simulation of shortening or fibrillating beating at different mass concentration is conducted in laboratory conditions using three types of beaters – laboratory beating engine, Jokro mills and PFI. The study subjects are the samples of coniferous unbleached high-yield and average-yield pulp. The paper demonstrates the possibility of simulation of fiber preferential shortening or fibrillation under circumstances of laboratory beating. This allows purposefully modifying papermaking characteristics of fibers and obtaining a paper sheet with desired application properties.

**Keywords:** beating, brushing, shortening, high-yield pulp, average-yield pulp, strength, deformability, fracture toughness.

## REFERENCES

1. *GOST 13525.1–79. Polufabrikaty voloknistye, bumaga, karton. Metody 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.

2. *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.

3. *GOST 13525.8–86. Polufabrikaty voloknistye, bumaga i karton. Metod opredeleniya soprotivleniya prodavlivaniyu* [State Standard 13525.8–86. Fibre Intermediate Products, Paper and Board. Method for Determination of Resistance to Bursting]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 6 p.

---

*For citation:* Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dul'kin D.A., Okulova E.O. The Effect of Fiber Brushing and Shortening when Beating on the Strength, Deformation and Fracture Toughness Properties of Cellulosic Materials. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 2, pp. 109–121. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109

4. 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.

5. 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.

6. GOST R ISO 9895–2013. *Bumaga i karton. Opredelenie soprotivleniya szhatiyu. Metod ispytaniya na korotkom rasstoyanii mezhdz zazhimami* [State Standard R ISO 9895–2013. Paper and Board. Compressive Strength. Short-Span Test]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p.

7. 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 the Physical and Mechanical Characteristics of Paper and Paperboard]. Ed. by V.I. Komarov. Arkhangelsk, NARFU Publ., 2011. 176 p. (In Russ.)

8. D'yakova E.V., Komarov V.I., Noskova E.S. *Ustoychivost' k initsirovaniyu i rostu treshchin v strukture tsellyulozno-bumazhnykh materialov* [Stability to Crack Initiating and Growth in Structure of Pulp-and-paper Materials]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2007, no. 1, pp. 126–141.

9. Ivanov S.N. *Tekhnologiya bumagi* [Paper Technology]. Moscow, Shkola bumagi Publ., 2006. 696 p. (In Russ.)

10. Kazakov Ya.V., Komarov V.I. *Programmnoe obespechenie laboratornogo ispytatel'nogo kompleksa dlya otsenki deformativnosti i prochnosti tsellyulozno-bumazhnykh materialov* [The Software of the Laboratory Test Complex for the Deformability and Strength Assessment of Pulp-and-Paper Materials]. Certificate of the Computer Software Official Registration, no. 2001610526, 2001.

11. Karlsson H. *Fiber Guide. Fiber Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. Kista, Sweden, AB Lorentzen & Werre, 2006. 120 p.

12. Clark J. d'A. *Pulp Technology and Treatment for Paper*. San Francisco, M. Freeman Publ., 1978. 751 p.

13. Komarov V.I., Kazakov Ya.V. *Svyaz' fundamental'nykh svoystv (po Klarku) n-razmolotoy sul'fatnoy nebelenoy tsellyulozy s kharakteristikami deformativnosti i prochnosti* [Relationship of Fundamental Properties (According to Clark) of Unrefined Sulphate Unbleached Cellulose with Deformation and Strength Properties]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 1993, no. 2-3, pp. 112–116.

14. Komarov V.I., Kazakov Ya.V. *Vliyanie razmola na korrelyatsiyu fundamental'nykh svoystv (po Klarku) sul'fatnoy nebelenoy tsellyulozy s kharakteristikami deformativnosti i prochnosti* [Influence of Beating on the Correlation of Fundamental Properties (According to Clark) of Sulphate Unbleached Pulp with Deformation and Strength Properties]. *Aktual'nye problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnykh i energeticheskikh resursov Evropeyskogo Severa* [Actual Problems of Rational Use of Natural and Energy Resources of the European North]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1994, pp. 105–111. (In Russ.)

15. Lumiaynen D., Puzyrev S.S., Chizhov G.I. *Razmol pri nizkoy kontsentratsii* [Beating under Circumstances of Low Concentration]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1992. 23 p. (In Russ.)

16. Materialy kompanii «Advanced Fiber Technology» [Reports of “Advanced Fiber Technology”]. *8-ya Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Pap-For»* [8th Intern. Sci. Techn. Conf. “Pap-For”]. Saint Petersburg, 2004. 217 p. (In Russ.)

17. Puzyrev S.S., Korostelev S.A., Kovaleva O.P. *Razmol pri nizkoy kontsentratsii* [Grinding under Circumstances of Low Concentration]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Board], 2006, no. 5, pp. 54–58.

18. ISO/TS 17958:2013. *Paper and Board. Determination of Fracture Toughness. Constant Rate of Elongation Method*. Technical Committee, Subcommittee SC 2, 2013. 16 p.

19. Mäkelä P., Fellers C. *An Analytic Expression for Determination of Fracture Toughness of Paper Materials*. *Innventia Report*, 2010, no. 54.

---

20. Mäkelä P., Nordhagen H., Gregersen Ø.W. Validation of Isotropic Deformation Theory of Plasticity for Fracture Mechanics Analysis of Paper Materials. *Nordic Pulp Paper Res. J.*, 2009, no. 24, pp. 388–394.

21. SCAN-P77-95. *Papers and Boards. Fracture Toughness. Scandinavian Pulp, Paper and Board*. Testing Committee. 8 p.

22. TAPPI Standard T 231 pm-96. *Zero-Span Breaking Strength of Pulp (Dry Zero-Span Tensile). Test Method T 231 cm-07*. Atlanta, USA, TAPPI Press, 1996.

23. TAPPI T Standard 273 pm-95. *Wet Zero-Span Tensile Strength of Pulp*. Atlanta, USA, TAPPI Press, 1995.

24. Varanasi S., Batchelor W.J. Rapid Preparation of Cellulose Nanofibre Sheet. *Cellulose*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 211–215.

Received on October 24, 2017

---