



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.16.022.6.031

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.119

**ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
ФОРМОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН***А.В. Поташев¹, инж.**А.В. Гурьев¹, канд. техн. наук, доц.**И.Б. Филиппов², канд. техн. наук, гл. технолог – зам. директора по производству**В.Г. Мосеев², начальник производства целлюлозы*¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: a.potashov@narfu.ru, a.guriev@narfu.ru²АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», ул. Мельникова, д. 1, г. Новодвинск, Архангельская область, Россия, 164900; e-mail: filippov.ilya@arpm.ru, moseev.vadim@arpm.ru

Формованные изделия из растительных волокон (в соответствии с международной терминологией – *molded pulp*), являющиеся ресурсосберегающими и экологичными, в настоящее время все чаще используются в качестве альтернативной первичной упаковки и вспомогательных упаковочных средств взамен полимерных материалов. Сырьем для их изготовления служат волокна макулатуры, а также целлюлозные волокна, выделенные из древесины и однолетних растений. В качестве еще одного источника сырья для формованных изделий нами рассматриваются волокна из отходов грубого сортирования («сучковая масса»), образующиеся при производстве сульфатной лиственной или хвойной целлюлозы. Их количество может достигать до 0,5...1,0 % от брутто-массы целлюлозы после варки. Подобные отходы могут утилизироваться в многотопливных котлах с получением тепла и электроэнергии, повторно направляться на варку целлюлозы, подвергаться рафинированию с возвращением в основной производственный поток, а также использоваться в композиции технических и тароупаковочных картонов. Однако преимущественно они складываются на полигонах промышленных отходов предприятия. Одной из простых и востребованных разновидностей формованных изделий из волокон сучковой массы считаются ячейки для выращивания и посадки саженцев лесных культур с закрытой корневой системой. К таким ячейкам не предъявляются особые требования по качеству формования. Однако для успешного применения в практике лесовосстановления необходимы изучение и контроль комплекса их прочностных и деформационных свойств. Исследованы модельные лабораторные образцы формованных ячеек из волокон отходов грубого сортирования, подвергнутых рафинированию до степени помола от 16 до 20 °ШР. Определены основные физико-механические характеристики материала изделий массой 1 м² 400 г при растяжении, сжатии и изгибе, а также характеристики при сжатии самих формованных изделий. Установлена линейная зависимость между деформационно-прочностными показателями формованных изделий и аналогичными показателями материала их стенок.

Финансирование: При выполнении исследований использовано оборудование Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова), созданного при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Для цитирования: Поташев А.В., Гурьев А.В., Филиппов И.Б., Мосеев В.Г. Особенности деформирования структуры формованных изделий из целлюлозных волокон // Лесн. журн. 2019. № 2. С. 119–129. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.119

Ключевые слова: бумажное литье, волокно, целлюлоза, отходы грубого сортирования, растяжение, сжатие, изгиб.

Введение

Формованная из целлюлозных волокон продукция представляет собой изделия сложной геометрической формы, повторяющие контур упаковываемой продукции. Поэтому прочность их будет зависеть не только от физико-механических характеристик используемого сырья, но и от геометрических размеров основных структурных единиц формованного изделия и их базовых параметров, изученных в работах [6, 8].

Основными структурными и конструктивными параметрами формованных изделий из растительных волокон являются толщина стенки, угол наклона боковой стенки, высота изделия, радиус пересекающихся стенок.

Большая часть известных исследований физико-механических свойств формованных изделий сосредоточена, главным образом, на анализе экспериментальных кривых, полученных при одноосном статическом сжатии, и сравнении с подобными упаковочными материалами [4, 7].

Перспективным направлением исследований в данной области является прогнозирование особенностей деформирования и прочностных показателей готовых изделий на основе компьютерного моделирования [5, 9]. Однако следует отметить, что для успешного применения данного подхода необходимо накопление глобальных баз данных и дальнейшее изучение прочностных и деформационных свойств структур формованных изделий, полученных из различного сырья.

Объекты и методы исследования

В экспериментах для изготовления формованных изделий на основе разработанного авторами способа [2] в качестве сырья использованы отходы грубого сортирования сульфатной небеленой целлюлозы (СНЦ) как из лиственных, так и хвойных пород древесины. Исходные образцы сучковой массы представляют собой частично делигнифицированную древесину (сучки, непровар), не разделившуюся после варки целлюлозы на отдельные волокна, поэтому их технологические свойства могут быть оценены только после гидромеханической обработки.

Производственную сучковую массу подвергали разволокнению в лабораторном центробежном размалывающем аппарате при концентрации 6 %. Разработку волокон отходов проводили до степени помола 16, 18 и 20 °ШР. Далее из полученной волокнистой суспензии (концентрация 1 %) изготавливали образцы формованных изделий, имеющих форму усеченной пирамиды (рис. 1) с расчетной массой 12,5 г. При этом масса 1 м² стенки изделия составляла 400 г.

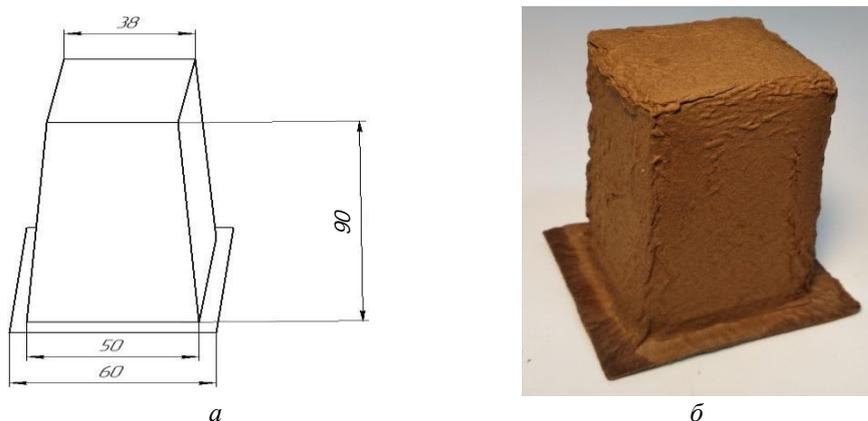


Рис. 1. Геометрические размеры (а) и внешний вид (б) лабораторных образцов формованных изделий (размеры приведены в миллиметрах)

Fig. 1. Physical dimensions (a) and appearance (b) of laboratory molded product samples (dimensions are in centimeters)

Для оценки физико-механических и деформационных свойств волокнистых материалов использовали стандартные методы испытаний, принятые для целлюлозно-бумажных материалов. Образцы для определения деформативности и прочности структуры собственно изделия вырезали из боковых стенок лабораторных образцов.

Толщину образцов определяли микрометром Lorentzen & Wettre SE 250 (ГОСТ 27015–86), жесткость при изгибе (S_b) – на приборе Messmer Buchel 116-BD (ГОСТ 30435–96 (ИСО 5628–90)), сопротивление торцевому сжатию (ECT) – на лабораторном прессе FRANK-PTI (ГОСТ 20683–97 (ИСО 3037–94)), растяжение – на лабораторной разрывной машине «Тестсистема 101» (ГОСТ 13525.1–79), сопротивление сжатию – на машине универсальной ИТС 8111-0,2 (ГОСТ 18211–72 (ИСО 12048–94)). Испытания на растяжение материала стенки и сжатие самого изделия проводили с дальнейшим получением и обработкой кривой зависимости «напряжение (σ_p)–деформация (ϵ_p)» и установлением значений следующих основных характеристик: нагрузка разрушения (F), жесткость при растяжении (S_t), энергия, поглощаемая при разрушении образца (TEA), разрушающее напряжение (σ_p), деформация разрушения (ϵ_p), модуль упругости (E_t).

Обработку и анализ полученных результатов выполняли с применением стандартных статистических процедур.

Результаты исследования и их обсуждение

В связи с тем, что при степени помола 14 °ШР в массе присутствует большое количество костры и не разделившихся волокон, препятствующих формированию равномерной структуры изделий, в экспериментах был принят диапазон степени разработки волокон сучковой массы от 16 до 20 °ШР.

Значения характеристик при растяжении, сжатии и изгибе образцов материала формованных изделий из отходов сортирования лиственной и хвойной СЩ в зависимости от степени помола волокон представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики прочности и деформативности при растяжении, сжатии и изгибе материала стенок формованных изделий из отходов сортирования СНГ

Степень помола, °ШР	Продолжительность размола, мин	F , Н	E_t , МПа	S_t , кН/м	σ_p , МПа	ϵ_p , %	TEA , МПа	ECT , кН/м	S_b , Н/см ²
<i>Лиственная СНГ</i>									
16	8	75	300	470	2,80	1,27	34,3	0,90	6,2
18	10	85	325	525	3,54	1,74	60,1	1,08	6,8
20	12	130	530	700	6,51	1,81	91,9	1,38	7,3
<i>Хвойная СНГ</i>									
16	10	70	180	410	2,14	2,00	59,3	0,90	5,9
18	14	80	245	475	2,78	1,94	64,0	1,18	6,4
20	18	110	260	520	3,74	2,24	100,2	1,26	7,6

Для достижения максимальных показателей прочности в случае использования отходов сортирования лиственной целлюлозы требуется в 1,5 раза меньшая продолжительность размола до заданной степени разработки волокон по сравнению с образцами из отходов сортирования хвойной целлюлозы. Установлено, что такие характеристики прочности и жесткости при растяжении, как F , E_t , S_t , σ_p , имеют более высокие значения у образцов из лиственных волокон. Это обусловлено значительным уплотнением структуры изделий (плотность возрастает на 20 %), приводящим к резкому увеличению прочности.

Для образцов из отходов сортирования хвойной целлюлозы наблюдается иная динамика изменения свойств. Их плотность практически не меняется при увеличении степени помола в заданном диапазоне, что обуславливает более низкий уровень характеристик прочности, упругости и жесткости при растяжении.

Подобное различие объясняется особенностями структурно-размерных параметров образцов и нетрадиционной формой распределения размерных характеристик волокон, что было показано в предыдущих исследованиях [3]. В частности, средняя длина волокна в выбранном диапазоне степени помола в случае использования отходов лиственной целлюлозы составляет 0,81...0,78 мм, а для отходов хвойной целлюлозы – 1,20...1,12 мм, что существенно ниже, чем у товарных видов целлюлозы: у лиственной этот показатель обычно варьирует от 1,0 до 1,2 мм, у хвойной – от 2,0 до 2,4 мм.

Результаты испытаний лабораторных формованных изделий на одноосное статическое сжатие с постоянной скоростью представлены в табл. 2.

Сопротивление сжатию образцов формованных изделий в отличие от характеристик сопротивления растяжению зависит от плотности и толщины материала. При этом четкая зависимость от структурно-размерных характеристик волокон не прослеживается. Максимальными прочностными характеристиками обладают образцы из отходов сортирования лиственной СНГ.

Таблица 2

**Характеристики прочности и деформативности при сжатии
лабораторных образцов формованных изделий из отходов сортирования СНГ**

Степень помола, °ЩР	Продолжительность размола, мин	F , Н	E_t , МПа	σ_p , МПа	ϵ_p , %	TEA , МПа
<i>Лиственная СНГ</i>						
16	8	110	5,67	0,28	8,2	1050
18	10	170	7,52	0,47	9,5	2000
20	12	235	10,15	0,81	11,7	4100
<i>Хвойная СНГ</i>						
16	10	140	4,74	0,23	11,1	1700
18	14	155	4,17	0,36	12,5	2000
20	18	160	4,41	0,37	12,0	2200

Последовательность разрушения образцов формованных изделий при сжатии условно можно разделить на несколько стадий, что на рис. 2 проиллюстрировано с помощью отдельных кадров (1–7) видеофиксации.

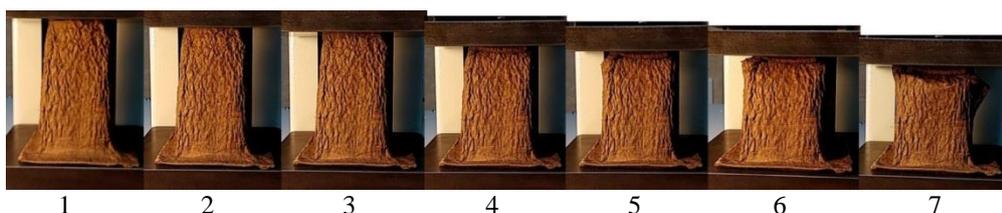
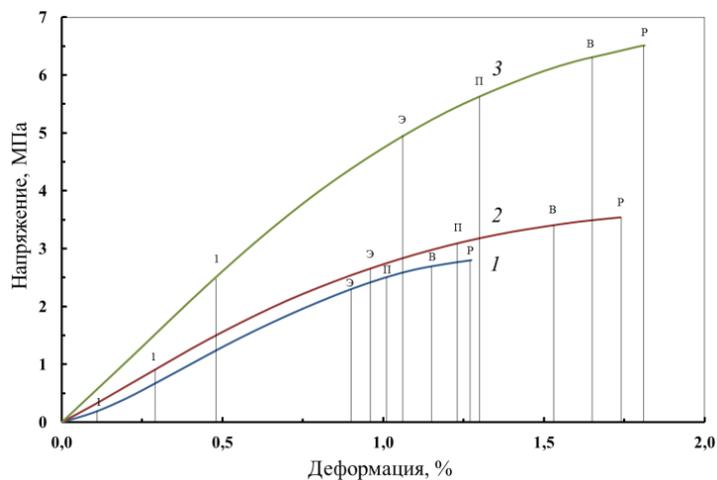


Рис. 2. Процесс разрушения образцов формованных изделий при одноосном статическом сжатии

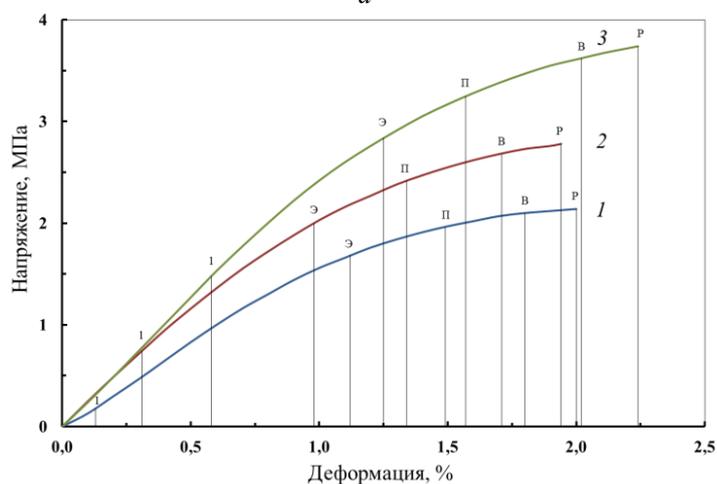
Fig. 2. Destruction of molded product samples under monoaxial static compression

На первой стадии (кадры 1–3) происходит вдавливание плоскости (дна) образца в корпус формованного изделия и постепенное перераспределение нагрузки на его стенки. Дальнейшее разрушение образцов наблюдается в верхней части испытуемого изделия, имеющей минимальную площадь сечения. При этом стенки деформируются в виде гармошки (кадры 4–6) вплоть до полной потери устойчивости образца, окончательного его смятия и разрушения на отдельных участках структуры (кадр 7).

На основе методики, предложенной В.И. Комаровым [1], была выполнена оценка динамики изменения стадий развития деформаций при растяжении, предшествующих окончательному разрушению, в зависимости от степени разработки волокон. Данные приведены на рис. 3, где т. 1 – предел упругости; т. Э – эффективная точка, усредненно характеризующая замедленно-упругую составляющую вязкоупругой зоны; т. П – начало пластических деформаций; т. В – начало дополнительной вытяжки; т. Р – разрушение образца. Максимальный уровень деформационно-прочностных свойств при одноосном статическом растяжении материалов структуры формованных изделий достигается на верхней границе принятого диапазона степени помола волокон.



а



б

Рис. 3. Зависимости σ_p – ε_p , полученные при одноосном статическом растяжении стенок образцов формованных изделий из отходов грубого сортирования лиственной (а) и хвойной (б) ШЦ при степени помола 16 (1); 18 (2); 20 °ШР (3)

Fig. 3. Dependences σ_p – ε_p , obtained by monoaxial static stretching of walls of molded product samples made of coarse screening wastes of hardwood (а) and softwood (б) unbleached sulfate pulp with a Shopper-Riegler grinding degree of 16 (1); 18 (2); 20 (3)

Как видно из рис. 3, при минимальной степени разработки волокон упругая зона деформирования (от $\varepsilon_p = 0$ до т. 1) составляет лишь 8 % от общей деформации в случае лиственной целлюлозы и 6 % в случае хвойной, а замедленно-упругая (участок от т. 1 до т. П) – соответственно 70 и 68 %. Пластическая зона (участок от т. П до т. Р) для указанных образцов имеет вклад соответственно около 22 и 26 %, что свидетельствует о преимущественном хрупком характере деформирования и разрушения структуры формованных изделий из неразработанных волокон сучковой массы. При увеличении степени разработки волокон до 20 °ШР наблюдается перераспределение зон деформирования: упругая составляющая деформации (как для лиственной, так и для

хвойной целлюлозы) последовательно возрастает в относительном выражении на 300 %, в абсолютном – с 6–8 до 26 процентных пунктов; замедленно-упругая составляющая остается преобладающей, хотя ее доля снижается с 70 до 45 %; доля пластической составляющей – возрастает до 30 %.

Таким образом, умеренная разработка волокон позволяет повысить эластичность структуры формованных изделий из отходов грубого сортирования небеленой целлюлозы за счет развития упругой составляющей деформации.

Зависимости σ_p – ε_p , полученные при сжатии формованных изделий (рис. 4), имеют схожий характер с представленными ранее зависимостями при растяжении.

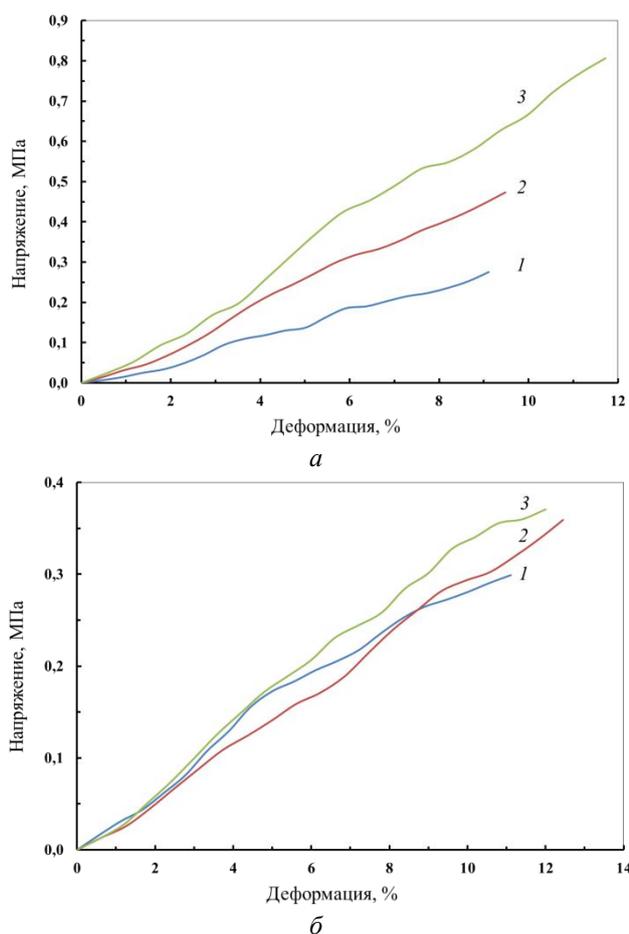


Рис. 4. Зависимости σ_p – ε_p , полученные при одноосном статическом сжатии образцов формованных изделий из отходов грубого сортирования лиственной (а) и хвойной (б) ШЦ при степени помола 16 (1); 18 (2); 20 °ШР (3)

Fig. 4. Dependences of σ_p – ε_p obtained by monoaxial static compression of molded product samples made of coarse screening wastes of hardwood (a) and softwood (b) unbleached sulfate pulp with a Shopper-Riegler grinding degree of 16 (1); 18 (2); 20 (3)

Типичные зависимости σ_p – ε_p , полученные при сжатии формованных изделий, включают в себя два участка: на основном участке напряжение возрастает до максимального, на нисходящем – снижается, что обусловлено разрушением образца. Применительно к обсуждаемым результатам нисходящая часть графиков не рассматривается, поскольку интерес представляет максимальный уровень прочности и деформативности исследуемых образцов.

Следует отметить, что при достижении максимальной степени разработки волокон образцы формованных изделий из отходов грубого сортирования лиственной целлюлозы сопоставимы по уровню общей деформации с образцами из отходов хвойной целлюлозы, имея прочность структуры в два раза выше – соответственно 0,8 и 0,4 МПа.

В случае сжатия формованных изделий оценить изменение стадий развития деформаций, предшествующих окончательному разрушению, не представилось возможным из-за немоного изменения формы кривых σ_p – ε_p .

Для установления зависимостей между показателями, полученными при испытаниях материала и самих формованных изделий из отходов сортирования СНЦ, выполнен парный корреляционный анализ. Расчетные значения парных коэффициентов корреляции при доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы 4 представлены в табл. 3, где значимые коэффициенты выделены полужирным шрифтом.

Таблица 3

Расчетные коэффициенты корреляции

Основные характеристики материала стенок формованных изделий	Основные характеристики при сжатии формованных изделий					
	F , Н	TEA , Дж/м ²	σ_p , МПа	ε_p , %	E_t , МПа	A , Дж
F , Н	0,85	0,88	0,84	0,44	0,63	0,82
L , м	0,89	0,90	0,91	0,41	0,70	0,81
S_t , кН/м	0,89	0,91	0,98	0,22	0,86	0,70
TEA , Дж/м ²	0,72	0,72	0,56	0,75	0,23	0,88
σ_p , МПа	0,91	0,93	0,97	0,25	0,86	0,74
ε_p , %	0,32	0,29	0,03	0,85	–0,29	0,64
E_t , МПа	0,81	0,83	0,95	0,01	0,93	0,54
A , мДж	0,72	0,72	0,56	0,75	0,23	0,88
E_{CT} , кН/м	0,84	0,85	0,82	0,66	0,46	0,86
S_b , Н/см ²	0,64	0,63	0,64	0,38	0,38	0,63

Примечание. A – работа, мДж; L – разрывная длина, м.

Как видно из данных табл. 3, существуют линейные зависимости между аналогичными базовыми характеристиками, описывающими процессы упруго-пластического деформирования при растяжении материала стенок и сжатии самого формованного изделия. Подобные эмпирические взаимосвязи позволяют анализировать и регулировать обсуждаемые свойства, не прибегая к испытаниям объемных изделий, а основываясь на данных, полученных при использовании стандартных методов испытаний листовых целлюлозно-бумажных материалов.

Заключение

Установлены уровни прочностных и деформационных характеристик структур формованных изделий из отходов сортирования лиственной и хвойной СЩ в узком диапазоне изменения степени разработки волокон. Подтверждена возможность использования отходов грубого сортирования СЩ, являющихся экологически безопасным первичным волокном, в качестве сырья для производства формованных изделий различного назначения.

Выявлены зависимости между аналогичными базовыми характеристиками, описывающими процесс при растяжении материала стенок и сжатии самого формованного изделия, что позволяет анализировать и регулировать деформационно-прочностные свойства объемных изделий, не прибегая к их испытаниям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Комаров В.И.* Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов: моногр. Архангельск: АГТУ, 2002. 440 с.
2. Пат. 2634235 Российская Федерация. Способ переработки отходов сортирования сульфатной целлюлозы в формованные изделия / А.В. Гурьев, А.В. Поташев; САФУ им. М.В. Ломоносова. № 2016144373; заявл. 11.11.2016; опубл. 24.10.2017.
3. *Поташев А.В., Гурьев А.В.* Физико-механические свойства структуры формованных изделий из отходов сортирования сульфатной целлюлозы // Системы, методы, технологии. 2017. № 3(35). С. 120–126. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-3-120-126
4. *Eagleton D.G., Marcondes J.A.* Cushioning Properties of Moulded Pulp // Packaging Technology and Science. 1994. Vol. 7, iss. 2. Pp. 65–72. DOI: 10.1002/pts.2770070203
5. *Gurav S.P., Bereznitski A., Heidweiller A., Kandachar P.V.* Mechanical Properties of Paper-Pulp Packaging // Composites Science and Technology. 2003. Vol. 63, iss. 9. Pp. 1325–1334. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00104-0
6. *Hoffmann J.* Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging // Packaging Technology and Science. 2000. Vol. 13, iss. 5. Pp. 211–220. DOI: 10.1002/1099-1522(200009)13:5<211::AID-PTS515>3.0.CO;2-0
7. *Ji H., Wang H.* Short Span Compressive Stress-Strain Relation and Model of Molded Pulp Material // Key Engineering Materials. 2011. Vol. 450. Pp. 202–205. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.202
8. *Ma X., Soh A.K., Wang B.* A Design Database for Moulded Pulp Packaging Structure // Packaging Technology and Science. 2004. Vol. 17, iss. 4. Pp. 193–204. DOI: 10.1002/pts.658
9. *Wang Z.-W., Li X.-F.* Effect of Strain Rate on Cushioning Properties of Molded Pulp Products // Materials and Design. 2014. Vol. 57. Pp. 598–607. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.01.019

Поступила 21.11.18

UDC 676.16.022.6.031

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.119

Structure Deformation Features of Molded Pulp Products**A.V. Potashev¹**, Engineer**A.V. Gur'ev¹**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor**I.B. Filippov²**, Candidate of Engineering Sciences, Chief Technologist – Deputy Director for Production**V.G. Moseev²**, Head of Pulp Production¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: a.potashev@narfu.ru, a.guriev@narfu.ru²Arkhangelsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk region, 164900, Russian Federation; e-mail: filippov.ilya@apm.ru, moseev.vadim@apm.ru

Molded pulp products in comparison with products made of traditional raw materials are resource saving and environmentally friendly. Nowadays, they are increasingly used as alternative primary package and auxiliary packaging materials instead of polymer materials. Waste paper fibers as well as cellulose fibers obtained from wood and annual plants are the raw materials for the manufacturing of such products. As another potential fiber source for molded products we consider fibers of coarse screening waste (screening) formed during the sulphate hardwood or softwood pulp production. These rejected materials are large-tonnage (up to 0.5 – 1.0 % of the gross weight after pulping). Such wastes can be disposed of in multi-fuel boilers with getting heat and electrical energy and then redirected to pulping, refined with afterward return to the main stock flow or used in the composition of different types of cardboard. However, they are mainly stored in industrial waste landfills of enterprises. Cells for growing and planting of forest crop seedlings with the closed root system can be considered as one of the simplest and most popular types of molded articles made of screening. These cells do not have special requirements for the quality of molding. However, in order to use molded articles efficiently for reforestation purposes, it is necessary to study the strength and deformation properties of the structure of molded articles made of various raw materials. Model laboratory samples of molded cells made of coarse screening waste fibers refined from 16 to 20 Shopper-Riegler grinding degrees were studied. The basic physicomachanical characteristics of the material of products with 400 g weight of 1 m² under stretching, compression and bending, as well as the characteristics during compression of the molded products are determined. A linear dependence between deformation and strength characteristics of the molded articles and the similar characteristics of their wall's material is detected.

Acknowledgements: The equipment of the Engineering and Innovation Center “Advanced Northern Bioresources Processing Technologies” (Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov) created with the financial support of the Russian Ministry of Education and Science was used.

For citation: Potashev A.V., Gur'ev A.V., Filippov I.B., Moseev V.G. Structure Deformation Features of Molded Pulp Products. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 119–129. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.119

Keywords: molded pulp, fiber, cellulose, coarse screening wastes, stretching, compression, bending.

REFERENCES

1. Komarov V.I. *Deformation and Destruction of Fibrous Pulp and Paper Materials*: Monography. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 440 p.
2. Gurev A.V., Potashev A.V. *Method of Processing Waste Sorting of Sulphate Cellulose in Molded Products*. Patent RF, no. 2634235, 2016.
3. Potashev A.V., Guryev A.V. Physico-Mechanical Properties of the Structure of Molded Articles from Sulfate Cellulose Screening Waste. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 3(35), pp. 120–126.
4. Eagleton D.G., Marcondes J.A. Cushioning Properties of Moulded Pulp. *Packaging Technology and Science*, 1994, vol. 7, iss. 2, pp. 65–72. DOI: 10.1002/pts.2770070203
5. Gurav S.P., Bereznitski A., Heidweiller A., Kandachar P.V. Mechanical Properties of Paper-Pulp Packaging. *Composites Science and Technology*, 2003, vol. 63, iss. 9, pp. 1325–1334. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00104-0
6. Hoffmann J. Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging. *Packaging Technology and Science*, 2000, vol. 13, iss. 5, pp. 211–220. DOI: 10.1002/1099-1522(200009)13:5<211::AID-PTS515>3.0.CO;2-0
7. Ji H., Wang H. Short Span Compressive Stress-Strain Relation and Model of Molded Pulp Material. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 450, pp. 202–205. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.202
8. Ma X., Soh A.K., Wang B. A Design Database for Moulded Pulp Packaging Structure. *Packaging Technology and Science*, 2004, vol. 17, iss. 4, pp. 193–204. DOI: 10.1002/pts.658
9. Wang Z.-W., Li X.-F. Effect of Strain Rate on Cushioning Properties of Molded Pulp Products. *Materials and Design*, 2014, vol. 57, pp. 598–607. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.01.019

Received on November 21, 2018
