

УДК 676.017

**В.И. КОМАРОВ, И.Б. ФИЛИППОВ**

Архангельский государственный технический университет

Филиппов Илья Борисович родился в 1969 г., окончил в 1992 г. Архангельский лесотехнический институт, аспирант кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет более 10 научных работ в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.



### СМЕСИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА БУМАЖНОЙ МАССЫ

Рассмотрены вопросы формирования свойств бумажной массы при смешивании полуфабрикатов, отличающихся по свойствам и способу выработки; показаны основные закономерности изменения свойств смесей при смешивании целлюлозных волокнистых полуфабрикатов, механических масс и целлюлоз между собой; предложено использовать для трактовки механического поведения волокнистых полуфабрикатов основы теории прочности полимерных и композитных материалов.

The questions on forming the properties of paper pulp when mixing half-finished products different in properties and production methods have been considered. The main regularities in changing the properties of mixtures when mixing cellulose fibrous half-finished products are presented. The use of fundamentals of the strength theory of polymer and composite materials has been suggested for interpreting the mechanical behaviour of fibrous half-finished products.

Уникальность структуры бумаги позволяет в первом приближении использовать для трактовки экспериментальных данных основные положения механики разрушения как полимерных, так и композиционных материалов [1, 4, 8–10, 14–16]. Структура бумаги, которая является сложной неоднородной системой (полидисперсность размеров и поли-

вариантность свойств элементов структуры, неоднородность их пространственной ориентации, неравномерность плотности в объеме, неравномерность величины и формы связей между элементами структуры), предопределяет наличие целого комплекса различных факторов, обуславливающих механическое поведение бумаги. К таким факторам можно отнести соотношение и свойства исходных полуфабрикатов, образующих структуру бумаги [7, 11, 12].

В исследуемой технологической схеме производства бумаги используется пять видов беленых волокнистых полуфабрикатов, обладающих различными свойствами (сульфатные хвойная и лиственная целлюлозы, хвойная и лиственная ХТММ, ТММ). Таким образом, представлялась возможность изучить влияние состава смеси волокнистых полуфабрикатов на свойства бумажной массы.

Правило смесей для полимерных и композиционных материалов в большинстве случаев отражается линейным аддитивным законом. Устанавливаются, например, следующие приближенные зависимости при определении модуля упругости и напряжения для волокнистых композитов:

$$E_1 = \alpha E_A V_A + E_M V_M; \quad (1)$$

$$\sigma_p = \beta \sigma_A V_A + \sigma_M V_M, \quad (2)$$

где  $E_1$  и  $\sigma_p$  – начальный модуль упругости и разрушающее напряжение для композита;

$\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от расположения волокна (при случайном расположении волокон они примерно равны 0,375);

$E_A$  и  $E_M$  – начальный модуль упругости волокна и матрицы;

$V_A$  и  $V_M$  – объемное содержание фаз;

$\sigma_A$  – разрушающее напряжение для волокна;

$\sigma_M$  – напряжение в матрице, соответствующее разрушающей деформации волокна.

Из теории смесей полимеров [10] известно, что многофазные системы (каковой является и бумага) редко деформируются однородно. Причем если модули упругости фаз (компонентов смеси) сильно отличаются, то перенапряжения на границе раздела фаз, возникающие при нагружении образца, могут привести к отслаиванию частиц дисперсной фазы (отличающейся определенными свойствами и геометрическими размерами) от структурной матрицы материала, что в конечном итоге снижает его прочность. Таким образом, чем ближе по величине будут модули упругости компонентов смеси, тем прочнее будет материал. В теории смесей полимеров утверждается, что в интервале соотношения полимеров от 0,43 до 2,33 надежное прогнозирование механических свойств смеси с учетом свойств только смешиваемых полимеров в настоящее время невозможно.

С точки зрения механики разрушения композитов большое значение имеет прочность связи между армирующим элементом и матрицей. Структуру бумаги трудно разделить на составляющие (армиру-

ющие волокна и волокна матрицы) [2, 13]. Очевидно, длинные волокна, имеющие в каждом отдельном случае свой размер, будут работать как армирующие, а свойства матрицы будут обусловлены короткими волокнами. Длина волокна каждой из двух составляющих может быть определена по методике, предложенной в работе [6]. Для минимизации напряжений на границе раздела армирующих элементов и матрицы, а следовательно, и для повышения прочности композита соотношение начального модуля упругости армирующего элемента и начального модуля упругости матрицы  $E_A/E_M$  должно быть как можно выше [8].

Для проверки возможности применения вышеуказанных положений к целлюлозным волокнистым материалам были отобраны образцы разных полуфабрикатов и приготовлены их смеси с различным соотношением начальных модулей упругости.

В первой серии исследований готовили в производственных условиях и испытывали смеси из хвойной (40 %) и лиственной (60 %) целлюлозы.

Таблица 1

Влияние смешивания целлюлозных полуфабрикатов  
на физико-механические характеристики бумажной массы

Характеристики	Значение характеристик при различном соотношении $E_{1A}/E_{1M}$											
	0,73				1,01				1,20			
	A	M	AM	CB	A	M	AM	CB	A	M	AM	CB
Фундаментальные:												
$S_V$ , МПа	2,08	2,07	2,70	2,07	2,99	2,59	3,44	2,75	3,11	2,61	4,16	2,81
$F_z$ , Дж/м <sup>2</sup>	145	140	150	142	98	88	128	92	170	115	160	135
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,53	1,73	1,58	1,65	1,58	1,56	1,80	1,57	1,77	1,79	1,67	1,78
$L_0$ , м	1830	1800	1820	1810	3460	2620	2690	2960	3130	1780	3030	2320
Прочностные:												
$P$ , Н	31,9	37,0	36,1	35,0	40,0	31,8	34,8	35,1	36,4	29,3	38,5	32,1
$L$ , м	4240	4750	4630	4550	5350	4030	4780	4560	4720	3650	4860	4080
$A_p$ , мДж	22,0	26,3	27,1	25,2	51,1	21,1	31,0	33,1	49,2	22,3	46,0	33,1
Деформационные:												
$E_1$ , МПа	3780	5180	4350	4620	4550	4520	3320	4530	4300	3570	4360	3860
$E_2$ , МПа	1960	2900	2400	2520	2060	2220	1950	2160	1700	1920	2100	1830
$E_3$ , МПа	980	1100	910	1050	660	780	900	730	520	700	620	630
$\sigma_1$ , МПа	14,0	15,4	16,1	14,8	15,9	13,8	13,1	14,6	14,1	12,8	13,4	13,3
$\sigma_2$ , МПа	19,2	19,4	19,8	19,3	20,6	16,6	18,8	18,2	17,4	15,4	18,3	16,2
$\sigma_p$ , МПа	24,7	28,7	27,7	27,1	32,7	23,6	27,1	27,2	27,5	21,5	29,1	23,9
$\epsilon_1$ , %	0,38	0,31	0,38	0,34	0,36	0,32	0,40	0,34	0,34	0,36	0,32	0,35
$\epsilon_2$ , %	0,58	0,45	0,51	0,50	0,54	0,43	0,63	0,47	0,48	0,48	0,52	0,48
$\epsilon_p$ , %	1,08	1,08	1,16	1,08	1,84	1,04	1,36	1,36	1,88	1,16	1,68	1,45

Примечание. А – армирующий элемент (хвойная целлюлоза); М – матрица (лиственная целлюлоза); АМ – смесь; СВ – расчетный средневзвешенный уровень.

С известным приближением хвойная целлюлоза обладающая большей средней длиной волокна, принята в качестве армирующей (А) составляющей смеси, а более коротковолокнистая лиственная целлюлоза — матрицы (М). Испытаны образцы смесей, у которых соотношение начальных модулей упругости А и М ( $E_{1A}/E_{1M}$ ) имело следующие значения: 0,73, 1,01 и 1,20. Результаты испытаний образцов исходных компонентов (А и М) и их смесей (АМ), а также расчетный средневзвешенный уровень (СВ) характеристик смеси представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

При анализе экспериментальных данных было необходимо во-первых, оценить степень отклонения полученных экспериментально значений характеристик от их расчетного СВ; во-вторых, проследить влияние возрастания соотношения  $E_{1A}/E_{1M}$  на прочность материала.

Из данных табл. 1 следует, что при смешивании фундаментальные (по Кларку) характеристики  $SV$  и  $F_2$ , зависящие от межволоконных сил связи, имеют экспериментальные значения больше расчетных, что подтверждает известный эффект структурирования при смешивании коротко- и длиноволокнистых компонентов [3]. Пухлость полученного материала  $V$  при этом, как правило, снижается. Экспериментальные значения характеристик прочности оказываются выше расчетных.

Начальный модуль упругости является важной характеристикой в материаловедении как полимеров, так и композитов. Использование этой характеристики для интерпретации процесса разрушения образцов целлюлозно-бумажных материалов [5] позволяет рассматривать его с новой точки зрения.

В отличие от характеристик прочности начальный модуль упругости, определенный экспериментально, у материала из смеси в двух случаях из трех оказался ниже с расчетного СВ.

Как видно из рис. 1, механическое поведение целлюлозного материала, изготовленного из смеси полуфабрикатов, зависит от соотношения  $E_{1A}/E_{1M}$ . В первом случае, когда  $E_{1M} > E_{1A}$ , кривая 3, характеризующая поведение смеси полуфабрикатов, приближается к кривой 2, т.е.

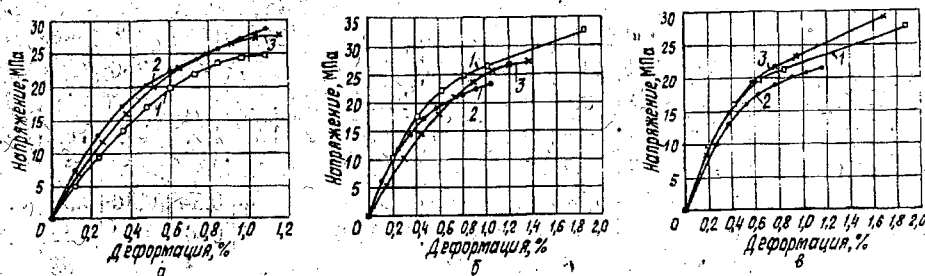


Рис. 1. Влияние соотношения  $E_{1A}/E_{1M}$  на механическое поведение смеси: а — соотношение равно 0,73; б — 1,01; в — 1,20; 1 — хвойная целлюлоза; 2 — лиственная целлюлоза; 3 — смесь

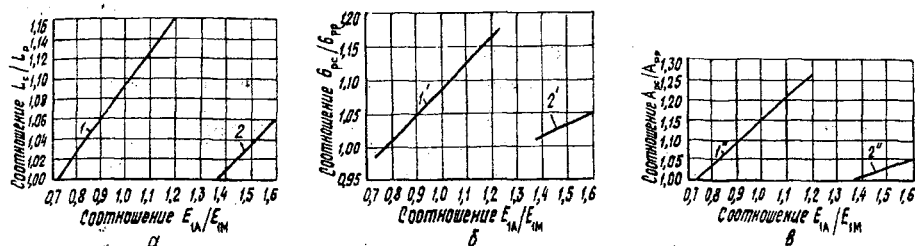


Рис. 2. Влияние соотношения  $E_{1A}/E_{1M}$  на изменение характеристик прочности бумажной массы из смеси полуфабрикатов по отношению к расчетной средневзвешенной величине:  $a$  – разрывная длина  $L$ ;  $б$  – разрушающее напряжение  $\sigma_p$  ( $б$ );  $в$  – работа разрушения  $A_p$ ; 1, 1', 1'' – смесь целлюлоз; 2, 2', 2'' – смесь целлюлоз и механических масс;  $1 - y = 0,34x + 0,75$ ;  $1' - y = 0,39x + 0,70$ ;  $1'' - y = 0,57x + 0,58$ ;  $2 - y = 0,26x + 0,64$ ;  $2' - y = 0,16x + 0,79$ ;  $2'' - y = 0,21x + 0,72$

свойства смеси определяются свойствами целлюлозы-матрицы, имеющей более низкие величины модулей упругости. Во втором случае, когда  $E_{1A} = E_{1M}$ , механические свойства материала из смеси в упругой области ниже, чем у исходных компонентов, а в зоне предразрушения несколько выше, чем у матрицы. В третьем случае, когда  $E_{1A} > E_{1M}$ , материал из смеси приобретает лучшие механические свойства по сравнению с исходными компонентами.

Таким образом, принимая во внимание данные рис. 2 (повышение прочности с ростом соотношения  $E_{1A}/E_{1M}$ ), можно констатировать, что при смешивании технических целлюлоз с заметно различающимися свойствами получают материалы, проявляющие свойства композитов.

Во второй серии эксперимента смешивание механических масс в технологическом потоке осуществляли в следующем процентном соотношении:

- 1) хвойная ХТММ (50 %) + лиственная ХТММ (50 %);
- 2) хвойная ХТММ (40 %) + лиственная ХТММ (40 %) + ТММ (20 %);

При смешивании по первому варианту композицию образуют два близких по свойствам полуфабриката, обладающие рядом специфических особенностей (табл. 2, рис. 3). В этом случае более длиноволокнистый полуфабрикат имеет большую пухлость и, как правило, меньший начальный модуль упругости [7]. Принимая это во внимание, а также учитывая соотношение полуфабрикатов при смешивании, в качестве армирующего компонента можно рассматривать как хвойную, так и лиственную ХТММ в зависимости от того, который из этих полуфабрикатов в каждом конкретном случае обладает большей средней длиной волокна.

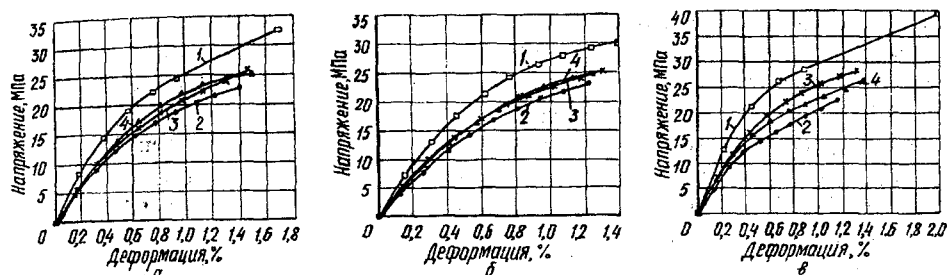


Рис. 5. Влияние смешивания целлюлозных полуфабрикатов и механических масс на механическое поведение смеси с различным соотношением  $E_{1A}/E_{1M}$ : а – соотношение равно 1,38; б – 1,43; в – 1,60; 1 – смесь целлюлозных полуфабрикатов; 2 – смесь механических масс; 3 – смесь исходных компонентов; 4 – расчетная средневзвешенная кривая

Из рис. 2 (см. с. 49) следует, что и в случае материала, изготовленного из смеси целлюлоз и механических масс, с увеличением соотношения  $E_{1A}/E_{1M}$  механическая прочность образцов возрастает, хотя и не в такой степени, как у материала из смеси целлюлоз.

#### Выводы

1. Численные значения модуля упругости  $E_1$  смешиваемых целлюлозных материалов и соотношение модулей упругости исходных компонентов позволяют прогнозировать механическое поведение смеси при приложении растягивающей нагрузки.
2. Прочность целлюлозных материалов при невысоких степенях помола подчиняется законам, постулированным теорией прочности композитов.
3. При смешивании большого количества полуфабрикатов (два вида целлюлоз и три вида механических масс) получаемый материал имеет свойства, близкие к средневзвешенному расчетному уровню.
4. Учитывая, что любой вид технической целлюлозы представляет собой смесь фракций волокон с различной длиной и свойствами, особое значение для производства бумаги может иметь процесс фракционирования поступающих полуфабрикатов с последующим приданием отдельным фракциям заданного начального модуля упругости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аким Э.Л. Обработка бумаги (основы химии и технологии обработки и переработки бумаги и картона). - М.: Лесн. пром-сть, 1979. - 232 с.
- [2]. Бышев А.В., Левшина В.В., Мельничук Н.М. Влияние композиционного состава бумаги на когезию ее листа // Целлюлоза, бумага, картон. - 1995. - № 7 - 8. - С. 18 - 19. [3]. Кларк Дж. Технология целлюлозы. - М.: Лесн. пром-сть, 1983. - 456 с. [4]. Ковернинский И.Н. Упрочнение бумажно-картонных материалов поверхностной обработкой модифицированными

Таблица 2

**Влияние смешивания ХТММ  
на физико-механические характеристики бумажной массы**

Характеристики	Значение характеристик							
	А*	Б	АБ	СВ	А	Б*	АБ	СВ
<b>Фундаментальные:</b>								
$SV$ , МПа	3,52	3,48	3,52	3,50	3,94	3,39	3,61	3,67
$F_z$ , Дж/м <sup>2</sup>	115	100	120	108	140	130	135	135
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,94	1,81	1,96	1,88	1,88	2,11	2,16	2,00
$L_0$ , м	2280	2290	2370	2285	2750	2470	2510	2610
$l_{cp}$ , мм	2,11	1,50	1,57	1,81	1,43	1,77	1,65	1,60
<b>Прочностные:</b>								
$P$ , Н	31,0	32,5	30,3	31,8	32,2	30,7	31,8	32,6
$L$ , м	3850	3950	4130	3900	4160	3930	3850	4050
$A_p$ , мДж	26,2	23,7	24,5	25,0	26,5	28,2	26,9	27,4
<b>Деформационные:</b>								
$E_1$ , МПа	2890	3150	2430	3220	2630	2140	2030	2390
$E_2$ , МПа	1420	1980	1560	1700	1830	1320	1350	1580
$E_2$ , МПа	470	760	720	620	780	500	670	640
$\sigma_1$ , МПа	9,2	11,2	9,5	10,2	9,9	9,3	7,2	9,6
$\sigma_2$ , МПа	12,8	17,3	14,5	15,1	17,1	14,4	13,4	15,8
$\sigma_p$ , МПа	19,3	23,3	20,7	21,3	23,5	19,8	18,8	21,7
$\epsilon_1$ , %	0,35	0,36	0,40	0,36	0,38	0,45	0,36	0,42
$\epsilon_2$ , %	0,58	0,63	0,66	0,61	0,72	0,77	0,71	0,75
$\epsilon_p$ , %	1,32	1,16	1,32	1,24	1,32	1,48	1,40	1,40

Примечания. 1. А – хвойная ХТММ; Б – лиственная ХТММ; АБ – смесь. 2. Цифры в столбиках, обозначенных звездочкой, относятся к материалу с большей средней длиной волокна, являющемуся армирующим.

Из табл. 2 следует, что при смешивании механических масс экспериментально определенные значения фундаментальных и прочностных характеристик материала из смеси полуфабрикатов близки к расчетным СВ. Меньшее, по сравнению с расчетным, значение получено для начального модуля упругости.

Оба исследуемых образца из смеси полуфабрикатов (рис. 3) относятся к случаю, когда  $E_{1M} > E_{1A}$ . В отличие от целлюлозных образцов

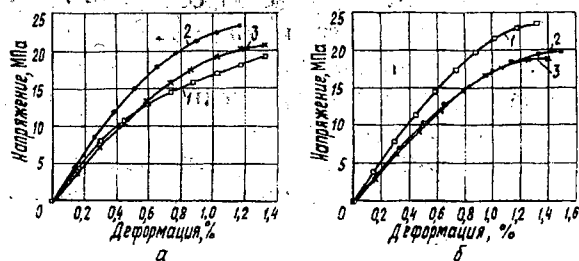


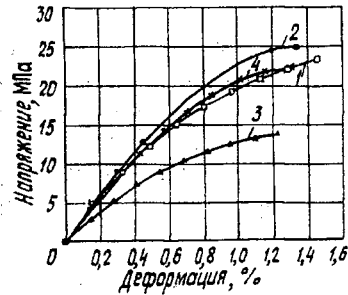
Рис. 3. Влияние смешивания ХТММ на механическое поведение смеси с различным армирующим элементом: а – хвойная ХТММ; б – лиственная ХТММ; 1 – хвойная ХТММ; 2 – лиственная ХТММ; 3 – смесь

блица 2

Б	СВ
51	3,67
55	135
16	2,00
10	2610
55	1,60
8	32,6
50	4050
9	27,4
30	2390
50	1580
70	640
2	9,6
4	15,8
8	21,7
36	0,42
71	0,75
40	1,40

4М; АБ - материалу  
 масс.экстрочности к располучено  
 ис. 3) от образцов  
 шивания  
 ническое  
 зличным  
 том: а -  
 - лист-  
 - хвой -  
 - листвен-  
 - смесь

Рис. 4. Влияние смешивания механических масс на механическое поведение смеси: 1 - хвойная ХТММ; 2 - лиственная ХТММ; 3 - ТММ; 4 - смесь



(см. рис. 1, а) кривая 3, характеризующая механическое поведение смеси механических масс, приближается к кривой, отражающей поведение армирующего компонента.

При смешивании трех механических масс поведение образцов смеси определяется свойствами ХТММ (табл. 3, рис. 4), что при указанном выше соотношении компонентов представляется закономерным. Необходимо отметить, что, когда в композиции смеси присутствуют полуфабрикаты, значительно отличающиеся по свойствам (ХТММ и ТММ), практически все представленные характеристики образцов смесей близки к расчетному СВ. По-видимому, в данном случае можно утверждать об усреднении свойств смеси.

Таблица 3

Влияние смешивания механических масс на физико-механические характеристики бумажной массы

Характеристики	Значение характеристик				
	А	Б	В	АБВ	СВ
<b>Фундаментальные:</b>					
$SU$ , МПа	3,50	3,53	3,00	3,53	3,41
$F_z$ , Дж/м <sup>2</sup>	140	125	110	140	130
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,92	1,84	2,21	1,95	1,95
$L_0$ , м	2300	2250	1850	2230	2190
$l_{cp}$ , мм	1,82	1,48	1,60	1,57	1,64
<b>Прочностные:</b>					
$P$ , Н	33,9	35,7	24,0	32,2	32,6
$L$ , м	4360	4470	3000	4210	4130
$A_p$ , мДж	30,5	30,3	18,2	26,1	28,0
<b>Деформационные:</b>					
$E_1$ , МПа	2810	2920	1930	2760	2680
$E_z$ , МПа	1640	1760	1210	1700	1600
$E_2$ , МПа	710	800	510	750	700
$\sigma_1$ , МПа	10,0	12,0	6,6	10,7	10,1
$\sigma_z$ , МПа	14,9	17,8	9,4	15,2	15,0
$\sigma_p$ , МПа	23,2	25,1	13,9	22,3	22,1
$\epsilon_1$ , %	0,37	0,42	0,36	0,40	0,39
$\epsilon_z$ , %	0,63	0,68	0,58	0,62	0,64
$\epsilon_p$ , %	1,45	1,35	1,22	1,30	1,36

Примечание. А - хвойная ХТММ; Б - лиственная ХТММ; В - ТММ.



Таблица 4

Влияние смешивания целлюлозных полуфабрикатов и механических масс на физико-механические характеристики бумажной массы

Характеристики	Значение характеристик при различном соотношении $E_{1A}/E_{1M}$											
	1,38				1,43				1,60			
	A	M	AM	CB	A	M	AM	CB	A	M	AM	CB
Фундаментальные:												
$SV$ , МПа	3,08	3,81	3,29	3,63	3,37	3,57	3,50	3,52	3,70	3,56	3,47	3,59
$F_2$ , Дж/м <sup>2</sup>	165	130	150	140	140	130	140	135	165	150	160	155
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,59	1,97	1,82	1,88	1,65	1,86	1,81	1,81	1,56	1,84	1,87	1,77
$L_0$ , м	2340	2230	2150	2260	2640	2210	2320	2320	3180	2130	2480	2390
Прочностные:												
$P$ , Н	38,6	33,5	34,4	34,8	37,3	32,3	33,6	33,6	44,2	32,9	40,7	35,7
$L$ , м	5020	4300	4480	4480	4720	4180	4430	4320	6230	4520	5250	4950
$A_p$ , мДж	42,9	29,7	32,0	33,0	34,4	24,5	28,7	27,0	64,1	23,7	35,1	33,8
Деформационные:												
$E_1$ , МПа	4010	2910	2990	3190	4250	2970	3430	3290	5680	3540	3980	4080
$E_3$ , МПа	2020	1640	1790	1740	2370	1900	1910	2020	2540	2020	2050	2150
$E_2$ , МПа	750	700	820	710	840	900	780	890	670	900	800	840
$\sigma_1$ , МПа	14,1	10,3	11,0	11,3	14,6	10,5	12,1	11,5	16,6	10,4	14,2	12,0
$\sigma_3$ , МПа	20,7	14,8	16,8	16,3	20,0	15,4	16,5	16,6	23,9	13,5	18,5	16,1
$\sigma_p$ , МПа	32,6	22,8	25,8	25,3	30,0	23,0	25,1	24,8	39,2	22,6	28,2	26,8
$\varepsilon_1$ , %	0,36	0,37	0,37	0,37	0,36	0,36	0,37	0,36	0,31	0,31	0,37	0,31
$\varepsilon_3$ , %	0,65	0,61	0,67	0,62	0,56	0,59	0,57	0,58	0,55	0,46	0,54	0,48
$\varepsilon_p$ , %	1,69	1,39	1,46	1,47	1,39	1,22	1,32	1,26	2,00	1,16	1,32	1,37

Примечание. А – армирующий элемент (смесь целлюлозных полуфабрикатов); Б – матрица (смесь механических масс); АМ – смесь.

В третьей серии экспериментов, в которой изучены смеси целлюлозы (25 %) и механических масс (75 %), также отмечено усреднение свойств, особенно когда соотношение модулей упругости не превышает 1,50 (табл. 4). При соотношениях 1,38 и 1,43 физико-механические характеристики смесей практически совпадают с расчетными СВ, а ход кривых, характеризующих механическое поведение образцов смеси (кривая 3, рис. 5, а, б), совпадает с расчетными средневзвешенными кривыми (кривая 4).

При соотношении 1,60 большинство прочностных и деформационных характеристик смесей имеют положительное отклонение от закона аддитивности, а ход кривой зависимости  $\sigma$ – $\varepsilon$  оказывается более крутым, чем у расчетной (рис. 5, в.).

Таким образом, при смешивании целлюлозы и механических масс для получения материала с более высокими показателями механической прочности и лучшими вязкоупругими свойствами необходимо обеспечить более высокий начальный модуль упругости дисперсного армирующего компонента (целлюлозы).

карбамидными олигомерами: Дис... д-ра техн. наук. - М., 1993. - 382 с. [5]. Комаров В.И. Анализ зависимости напряжение-деформация при испытаниях на растяжение целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн. - 1993. - № 2 - 3. - С. 123 - 131. [6]. Комаров В.И. Критическая длина волокна - фактор деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн. - 1993. - № 4. - С. 79 - 83. - (Изв. высш. учеб. заведений). [7]. Комаров В.И., Филиппов И.Б. Деформативность и прочность полуфабрикатов, используемых при производстве бумаги для офсетной печати // Лесн. журн. - 1995. - № 4 - 5. - С. 104 - 121. - (Изв. высш. учеб. заведений). [8]. Композиционные материалы: В 8 т. / Пер. с англ; Под ред. Л. Браутман, Р. Крок. - М.: Мир, 1978. - [Т.] 6. - 244 с; [Т.] 5. - 484 с. [9]. Кулезнев В.Н., Гуль В.Е. Структура и механические свойства полимеров // Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1972. - 320 с. [10]. Кулезнев В.Н. Смеси полимеров. - М.: Химия, 1980. - 304 с. [11]. Филиппов И.Б., Комаров В.И. Влияние процесса размола на деформативность и прочность механических масс, используемых для производства книжно-журнальной бумаги для офсетного способа печати // Лесн. журн. - 1996. - № 6. - С. 111 - 123. - (Изв. высш. учеб. заведений). [12]. Филиппов И.Б., Комаров В.И. Влияние процесса размола на деформативность и прочность целлюлозных полуфабрикатов, используемых для производства книжно-журнальной бумаги для офсетного способа печати // Лесн. журн. - 1996. - № 3. - С. 96 - 114. - (Изв. высш. учеб. заведений). [13]. Филиппов И.Б., Комаров В.И. Деформативность и прочность различных по длине волокна фракций товарной сульфатной небеленой целлюлозы // Актуальные проблемы рационального использования природных и энергетических ресурсов Европейского Севера. - Архангельск: РИО АЛТИ, 1994. - С. 111 - 115. [14]. Фляте Д.М. Свойства бумаги. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Лесн. пром-сть, 1986. - 680 с. [15]. Фляте Д.М., Финкельштейн Г.Э. Структура бумаги. - М.: ЦНИИТЭИлеспром, 1969. - 57 с. [16]. Фудзии Т., Дзакко М. Механика разрушения композиционных материалов / Пер. с японск. - М.: Мир, 1982. - 232 с.

Поступила 8 апреля 1996 г.