

// Докл. АН СССР.—1968.—Т. 130, № 2.—С. 356—358. [7]. Леонович А. А. Применение термомеханического метода к изучению древесного волокна // Химическая и механическая переработка древесины и древесных отходов: Межвуз. сб. науч. тр.—Л., 1976.—Вып. 2.—С. 74—80. [8]. Молекулярно-кристаллическая структура целлюлозы / О. К. Нугманов, А. И. Перцин, Л. В. Забелин, Г. Н. Марченко // Успехи химии.—1987.—Т. XVI, вып. 8.—С. 1339—1357. [9]. О надмолекулярной структуре целлюлозы, выделенной из луба и заболони *Daphne bholua* / А. В. Оболенская, А. А. Леонович, М. И. Королева, А. А. Шашилов // Химия древесины.—1990.—№ 1.—С. 43—48. [10]. Определение степени кристалличности целлюлозы методом ЯМР<sup>13</sup>С высокого разрешения в твердой фазе / Р. Г. Жбанков, М. Я. Иоелович, А. П. Трейманис и др. // Химия древесины.—1986.—№ 4.—С. 3—6. [11]. Целлюлоза и ее производные / Под ред. Н. Байкласа, Л. М. Сегала.—М.: Мир, 1974.—499 с. [12]. Шашилов А. А., Иванов М. А. Анализ структуры древесной целлюлозы // Субмикроскопическое строение древесины и его роль в процессах делигнификации: Тез. докл. 2-го научного семинара.—Рига, 1983.—С. 107—112. [13]. Якобсон М. К., Эриньш П. П. Температурные переходы целлюлозы // Химия древесины.—1983.—№ 3.—С. 3—19. [14]. Atalla R. H. Polymorphy in cellulose: recent developments // Proceeding of the International Symposium on Wood and Pulping chemistry.—Japan, 1983.—Vol. 1.—P. 42—47.

Поступила 30 мая 1990 г.

УДК 676.1.026.5

## ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БУМАГИ В ХОДЕ ЕЕ СУШКИ

Л. Ф. ЛЕВИНА, Б. Д. ЛЕВИН

Сибирский технологический институт

Одна из заключительных стадий производства бумаги — сушка, в значительной мере определяющая качество готового продукта. Целью работы являлось изучение изменений показателей механической прочности бумажного листа в ходе теплового обезвоживания.

Исследования по сушке типографской бумаги № 1 проводили на экспериментальной цилиндрической сушилке [5].

Образцы бумаги для опытов после отлива и прессования имели сухость 32...33 %. Первую отливку от начальной до конечной сухости высушивали на воздухе, вторую подвергали тепловой сушке на одном цилиндре установки, третью — на двух, четвертую — на трех и т. д. После этого отливки извлекали и досушивали на воздухе. Влажность отливок в момент изъятия из сушилки определяли по соответствующей кривой сушки, для построения которой у образцов, находившихся в сушилке различное время, в момент извлечения определяли влажность. На основе полученных результатов строили зависимость  $u = f(\tau)$  ( $u$  — абсолютная влажность бумаги, %;  $\tau$  — длительность тепловой сушки образца, с) [6].

Отливки, относительная влажность которых при извлечении из сушилки была выше 45...50 %, при досушивании на воздухе коробились. При подготовке к испытаниям для определения показателей механической прочности гладкость им придавали путем увлажнения и последующего каландрирования. Высушенные отливки после каландрирования подвергали испытаниям на механическую прочность в условиях, соответствующих требованиям ГОСТа [3].

В ходе работы определяли воздействие начальной температуры греющей поверхности  $t_n$  и натяжения сушильного сукна  $P$  при различных продолжительностях цикла  $\tau_n$  [4] на разрывную длину бумаги  $L$  и сопротивление излому  $U$ .

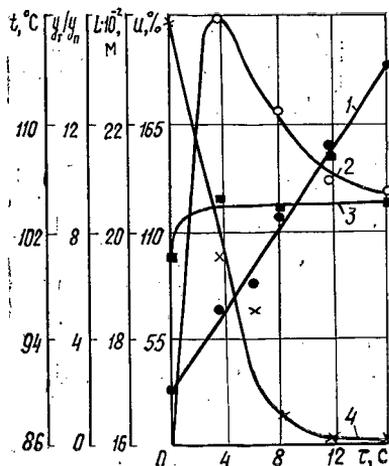
Начальную температуру греющей поверхности в проведенных опытах изменяли от 60 до 105 °С, натяжение сушильного сукна — от 980 до 2940 Н/м. Средняя температура греющей поверхности цилиндров  $t_{ср}$  зависит от  $t_n$  и  $\tau_n$ . При  $\tau_n = 0,9$  с и начальной температуре 60 и 105 °С  $t_{ср}$  равна соответственно 82,5 и 111,0 °С, а при  $\tau_n = 1,8$  с и тех же пределах изменения начальной температуры  $t_{ср} = 77$  и 109 °С.

Опытные данные по динамике сопротивления разрыву (разрывная длина) и излому (число двойных перегибов) приведены в табл. 1.



шенных на воздухе в заданном диапазоне влажности (при  $\tau = 0$  с), разрывная длина несколько меньше, чем у подвергнутых хотя бы кратковременному обезвоживанию на цилиндрах. По абсолютной величине эта разность обычно не превышает 10 %, и, следовательно, укладывается в ошибку опыта. Однако то, что она имеет место при всех исследованных режимах, свидетельствует о закономерности некоторого возрастания  $L$  в начальной стадии тепловой сушки.

Динамика температуры греющей поверхности  $t$ , соотношения между усадкой по толщине и плоскостной усадкой 2, разрывной длиной 3 и абсолютной влажностью 4 бумаги в ходе сушки при  $\tau_{\text{ц}} = 0,9$  с,  $P = 1960$  Н/м,  $t_{\text{н}} = 90$  °С



Графически изменение  $L$  представлено на рисунке. Кривая 3 состоит из двух характерных участков: начального — криволинейного, соответствующего некоторому повышению разрывной длины бумаги в первые 3...4 с теплового обезвоживания, и прямолинейного на протяжении всего последующего процесса удаления влаги. Для более четкого анализа протекающих явлений на рисунке даны графики изменения температуры греющей поверхности соотношения между плоскостной усадкой  $u_{\text{п}}$  и усадкой по толщине  $u_{\text{т}}$ , а также кривая влажности. Видно, что наблюдаемое изменение  $L$  протекает при температуре поверхности цилиндров 90...95 °С и абсолютной влажности бумаги 215...125 %.

При контакте отливки с греющей поверхностью идет теплообмен, интенсивность которого зависит и от натяжения сукна. За счет теплоты, снимаемой с цилиндра, бумага нагревается. В указанном диапазоне значений влажности испаряется межволоконная свободная влага и образование водородных связей не происходит. Параллельно, из-за возникающего градиента влажности по толщине, вода, текучесть которой при нагреве возрастает, диффундирует из толщи материала в контактный слой. Следствием этой убыли влаги является «похудение» образца — сжатие его по толщине, усиленное воздействием натянутого сукна. Если при обезвоживании в сушилке в течение 3,6 с  $u_{\text{п}}$  достигает величины 1,3 %, то  $u_{\text{т}}$  — 21,1 %, т. е. в начальном временном интервале происходит скачкообразный всплеск усадки по толщине (кривая 2).

Используя результаты работы [7], можно сделать вывод, что уплотнение листа по толщине в начальной стадии теплового обезвоживания тем сильнее, чем больше натяжение сукна. Волокна сближаются и создаются благоприятные условия для возникновения прочностных связей при последующем снижении влажности.

При сушке на воздухе в том же интервале значений  $u$  усадка по толщине меньше, а упаковка волокон в образующейся структуре менее плотная. В итоге при конечной влажности толщина бумаги, подвергнутой хотя бы кратковременной тепловой сушке под сукном, в восьми случаях из одиннадцати оказалась меньше, чем у высушенной на воздухе. Дальнейшее увеличение продолжительности сушки образцов на цилиндрах не оказывает влияния на разрывную длину (кривая 3), хотя

температура греющей поверхности возрастает до  $114^\circ\text{C}$  (прямая 1), т. е. образовавшаяся структура при последующем тепловом воздействии заметных изменений не претерпевает, и на процесс возникновения прочностных связей в листе обогрев не сказывается.

При анализе экспериментальных данных установлено, что увеличение начальной температуры греющей поверхности не влияет на сопротивление разрыву (при  $\tau_{II} = 0,9$  с и изменении  $t_{II}$  от 60 до  $105^\circ\text{C}$  расхождение в численных значениях  $L$  составляет 5 %, а при  $\tau_{II} = 1,8$  с — 8 %).

Полученные результаты можно объяснить тем, что, во-первых, с ростом  $t_{II}$  продолжительность сушки существенно укорачивается. Так, при  $\tau_{II} = 1,8$  с,  $P = 1960$  Н/м и  $t_{II} = 60^\circ\text{C}$  ( $t_{cp} = 82,5^\circ\text{C}$ ) продолжительность сушки до конечной влажности  $\tau_c$  равна 29,5 с, а при  $t_{II} = 105^\circ\text{C}$  ( $t_{cp} = 111^\circ\text{C}$ ) — 11 с. При  $\tau_{II} = 0,9$  с,  $P = 1960$  Н/м и  $t_{II} = 60^\circ\text{C}$  ( $t_{cp} = 77^\circ\text{C}$ )  $\tau_c = 18,3$  с, а при  $t_{II} = 105^\circ\text{C}$  ( $t_{cp} = 109^\circ\text{C}$ ) она снижается до 6,5 с. Таким образом, при увеличении средней температуры греющей поверхности приблизительно на  $30^\circ\text{C}$  продолжительность сушки сокращается в 2,8 раза, что и является одной из причин постоянства численной величины сопротивления разрыву.

Во-вторых, сушка образцов на экспериментальной сушилке сопровождалась непрерывным подогревом сукна, позволяющим поддерживать на постоянном и минимальном уровне его влажность. По этой причине сохранялись высокая впитываемость сукна и малое сопротивление выходу паров испаряемой влаги. В результате температура бумаги оказывалась ниже, чем при сушке с влажным сукном, а продолжительность — короче. С этим также связано постоянство  $L$ . Влияние  $\tau_{II}$  и  $P$  на разрывную длину не прослеживается.

Анализ опытных результатов по динамике сопротивления излому ( $I$ ) типографской бумаги № 1 в ходе сушки (табл. 1) показывает, что число двойных перегибов при изложенных выше условиях не зависит от технологических параметров процесса.

Особо следует отметить полученные в процессе эксперимента высокие численные значения и постоянство  $I$  при пересушивании образцов до конечной влажности 0,5...1,0 % и начальной температуре греющей поверхности  $90$  и  $105^\circ\text{C}$ , так как сопротивление излому в первую очередь зависит от прочности и гибкости волокон [1, 8], весьма чувствительных к повышению  $t_{II}$ .

Статистическую обработку экспериментальных результатов по динамике показателей механической прочности бумаги в ходе сушки производили путем оценки гомогенности комплекта  $K$  выборочных средних при  $K > 2$  [2].

Результаты представлены в табл. 2.

Гипотезу о том, что показатели механической прочности бумаги не зависят от продолжительности нахождения ее в сушилке, принимали при  $F < F_{0,05}$  ( $F$  — критерий Фишера). Когда  $F \geq F_{0,05}$ , проводили сравнение средних по величине  $s$ , являющихся функцией  $t$  распределения Стьюдента и  $m$  (число сравнений между оцениваемыми средними). При  $s < s_{0,05}$  гипотезу также считали верной. Значения  $F_{0,05}$  и  $s_{0,05}$  определяли по литературным данным [2].

Из таблицы следует, что гипотеза о независимости показателей прочности от длительности тепловой сушки справедлива в 9 случаях из 11 для сопротивления разрыву и в 10 — для сопротивления излому. Учитывая, что  $L$  и  $I$  являются величинами, для которых разброс опытных данных считается допустимым в довольно широких пределах, зависимости  $L = f(\tau)$  и  $I = f(\tau)$ , подтверждаемые результатами статистического анализа опытов 8 и 9, нельзя признавать существенными.

Таблица 2

№ п/п	$\tau_{ц},$ с	$P, Н/м$	$t_{п},$ °С	F	$F_{0,05}$	c	$c_{0,05}$
1	1,8	1960	60	0,39	2,66	—	—
				3,58	2,66	2,84	3,80
2	1,8	980	75	3,99	3,11	2,03	3,65
				3,40	3,11	3,64	3,65
3	1,8	1960	75	2,36	2,85	—	—
				2,50	2,85	—	—
4	1,8	2940	75	3,10	3,11	—	—
				4,49	3,11	3,14	3,65
5	1,8	1960	90	2,10	3,11	—	—
				4,10	3,11	3,19	3,65
6	1,8	1960	105	2,27	3,11	—	—
				2,45	3,11	—	—
7	0,9	1960	60	1,22	3,11	—	—
				4,10	3,11	3,58	3,65
8	0,9	1960	75	4,00	3,11	3,65	3,65
				4,99	3,11	3,98	3,65
9	0,9	1960	90	4,13	3,11	4,54	3,65
				0,83	3,11	—	—
10	0,9	1960	105	2,39	3,48	—	—
				3,39	3,48	—	—
11	0,9	980	75	1,68	3,11	—	—
				6,41	3,11	3,46	3,65

Примечание. В числителе данные для сопротивления разрыву; в знаменателе — излому.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что при сушке с непрерывным подогревом сукна продолжительность процесса невелика, а перегрев бумаги, обусловленный малым сопротивлением гигроскопической подложки, незначителен. Отсюда длительность теплового воздействия на материал при указанных условиях может быть сокращена путем увеличения температуры греющей поверхности, при сохранении высоких значений показателей механической прочности бумаги.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аликвин В. П. Физико-механические свойства природных целлюлозных волокон.— М.: Лесн. пром-сть, 1969.— 140 с. [2]. Бернштейн А. Л. Справочник статистических решений.— М.: Статистика, 1968.— 164 с. [3]. Испытание бумаги и картона / С. А. Пузырев, М. Д. Иншаков, Е. Я. Балмасов, Н. Ф. Зотова-Спановская.— М.: Лесн. пром-сть, 1966.— 412 с. [4]. Красников В. В. Кондуктивная сушка.— М.: Энергия, 1973.— 288 с. [5]. Левина Л. Ф. Исследование сушки с непрерывным подогревом сукна и ее влияния на свойства типографской бумаги № 1: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Красноярск, 1975.— 18 с. [6]. Левина Л. Ф., Левин Б. Д. Исследование влияния режимных параметров сушки на свойства бумаг и интенсивность процесса при непрерывном подогреве сукна // Межвуз. сб. науч. тр.— Л.: ЛТА, 1978.— Вып. 6.— С. 17—21. [7]. Левина Л. Ф., Левин Б. Д. Динамика усадки бумаги при сушке // Лесн. журн.— 1990.— № 6.— С. 86—89.— (Изв. высш. учеб. заведений). [8]. Фляте Д. М. Свойства бумаги.— М.: Лесн. пром-сть, 1986.— 680 с.

Поступила 30 марта 1990 г.