

Распределение механических свойств в бумажном листе.

Механические свойства бумаги машинной выработки—крепость (активное) и растяжимость (пассивное), как известно, различны для продольного направления (а) в листе по ходу бумажной ленты в машине, и поперечного (б), перпендикулярного первому. По направлению (а) крепость всегда больше, а растяжимость меньше соответств. величин для напр. (б), где наоборот крепость меньше, а растяжимость больше. Бумажный лист следовательно есть анизотропное в механическом отношении образование. Поэтому при механическом испытании бумаги производят таковое по этим двум главным направлениям и характеризуют бумагу средними значениями, вычисленными из двух крайних. Это замедляет работу и требует большого количества бумаги для испытания. Естественно возникает стремление найти прямой способ оценки механических свойств бумаги. Если факт зависимости их крайних значений от двух главных направлений вполне уже установлен, то вероятно существование в листе бумаги и такого среднего направления, где эти свойства обладают промежуточной величиной, совпадающей с средним арифметическим из двух первых. Замечено, что это направление совпадает с диагональным, т.е. под углом в 45° к обоим главным направлениям. На это указывали еще в 1902 г. *O. Winkler* и д-р. *H. Karstens* в своем руководстве по испытанию бумаги,¹⁾ рекомендуя, в случае недостатка бумаги для испытания по двум направлениям, брать пробный образец в диагональном, под углом 45° , направлении, в котором разрывная длина (мера крепости) и % растяжимости приблизительно совпадают с средними значениями из двух главных направлений. *Sindall*, на основании такого испытания бумаги, однако, пришел к выводу, что разрывная длина, средняя для двух взаимно-перпендикулярных направлений, под углом 45° всегда меньше (до 36%), чем средняя из главных направлений. Опыты *Н. И. Шевлягина*²⁾, хотя и подтвердили это заключение, но было установлено, что наибольшее отклонение величины разрывной длины под 45° от среднего для главных направлений не превышает 10% , т.е. остается в пре-

1) *O. Winkler* и *Dr. H. Karstens*. *Papier Untersuchung*, Leipzig 1902, S. 52.

2) *Н. И. Шевлягин*. *Практика испытания бумаги*. Сиб, 1911 г., стр. 109 и 154—155.

делах, допускаемых от неточности приборов ошибок опыта. Приведем здесь вычисленные нами средние данные для 22-х сортов бумаги, испытанных Шевлягиным.

Таблица 1-ая.

Среднее для направле- ний.	C Разр. дли- на км.	S Растяжи- мость %.	Палом обо- ротов.
1) Главных $\frac{a+b}{2}$	3,095	2,53	15
2) Под 45° $\frac{x+y}{2}$	2,986	2,17	16
Разница абсолютн.	— 0,109	— 0,36	+ 1
„ в % от (1).	— 3,5	— 14,2	+ 6,6

Вычислив по этим данным модуль M работы сопротивления бумаги по формуле $M = \frac{2}{3} C \cdot \delta$ для главных и диагональных направлений, найдем:

$$M_1 = 7,83$$

$$M_2 = 6,48$$

$$M_1 - M_2 = 1,35 \text{ или } 17,1\% \text{ от } M_1.$$

Но модуль работы характеризует „удельную энергию“, запас сопротивления в единице массы бумажного листа, и поэтому не должен зависеть от направления. Отклонение в 17,1% в этом случае не может служить доказательством обратного, так как оно получено только для двух пар направлений и к тому же из малого числа опытов.

Для освещения такого немаловажного, как для практики испытания, так и для производства вопроса о распределении механических свойств в бумажном листе, мною была предложена эта тема в качестве экспериментальной работы инж.-технологу *Я. И. Закроевской*, слушательнице Научно-Исследовательских Курсов при Московском Инст. Нар. Хозяйства. Работа выполнялась в 1922 г. на Государственной Бумажной Испытательной Станции ТЭС'а под моим непосредственным руководством и общим наблюдением заслуж. профессора *П. П. Петрова*. Материалом послужили десять образцов разных бумаг, выработанных на Троицко-Кондровских, ныне госуд. фабриках, б. К-° Говард в 1908—1909 г.г. и в 1915—1918 г.г.

Механические свойства бумаги определялись по 16 направлениям под углами в 22,5°, включая и главные, при чем для каждого направления было сделано по четыре испытания на разрывной машине и фальцовке Schorpp'er'a, по одному на автографическом разрывном приборе Leupner'a, и кроме того из каждой бумаги по 4 образца были испы-

таны на продавливание прибором Müllen'a. Одновременно было проделано определение толщины, состава бумаги, количества золы и числа волокон в месте разрыва. Разрывная длина и модуль работы вычислялись для каждого направления и затем из них выводились средние значения.

Многочисленный цифровой материал работы в виде таблиц и диаграмм не может быть помещен здесь полностью (копии таковых имеются в библиотеке ТЭС'а). Ниже приводим лишь сводку средних данных и сделаем из них возможные выводы.

Таблица (2) составлена таким образом, что восемь исследованных направлений сгруппированы в четыре пары взаимно-перпендикулярных и соответственно для каждой пары из данных опыта найдены средние значения для сопротивления разрыву, растяжимости, разрывной длины и т. д.

В нашу задачу не входит рассмотрение механических свойств для отдельных сортов бумаги. Предоставляя читателю самому сделать заключения о колебаниях величин этих свойств в зависимости от направления на основании таблицы 3-ей для бумаг разной композиции и плотности, мы не будем на этом останавливаться, ибо конечная цель работы в получении обезличенных средних выводов, независимо от сорта. В данном случае исследованная группа относится главным образом, к лучшим сортам. Композиция всей группы 31% тряпья, 55% целлюлозы, 14% древесной массы. При средней толщине 0,135 мм., вес кв. метра равен 0,961 гр. Сопротивление разрыву образца, шириной 15 мм. для главных направлений оказывается наибольшим (4,29 кгр.) и для диагональных под углом 45°—наименьшим (4,11 кгр.); растяжимость (2,48%), разрывная длина (3,02 км.) и модуль Hartig'a (11,65 кгр. км.)—для этих же диагональных направлений также имеют минимум, тогда как в главных направлениях растяжимость (2,74%) и модуль (12,38 кгр. км.) не являются наибольшими величинами.

Отклонения для других направлений от главных значений тех же величин нигде не превышают 10%, что подтверждает опыты Н. И. Шевлягина и опровергает выводы Sindall'a.

Общий вывод здесь напрашивается сам собой: механические свойства, поскольку они оцениваются средним из двух значений для пары взаимно-перпендикулярных направлений, в листе бумаги распределяются настолько равномерно, что для практики испытания нет особых оснований придерживаться обязательно так наз. главных и возможно брать любую пару других направлений.

В таблице 3-ей помещены для полноты результаты испытаний сопротивления бумаг излому на фальцовке Шоппера в числе двойных перегибов и продавливанню—на приборе Müllen'a в кгр.: кв. см. Кроме того вычислены два значения удельной энергии сопротивления бумаги в единице массы: I—по модулю Hartig'a A делением на вес кв. метра a и ширину образца 1,5 см. и II—умножением разрыв-

Средние результаты исследования механических свойств по 2-м

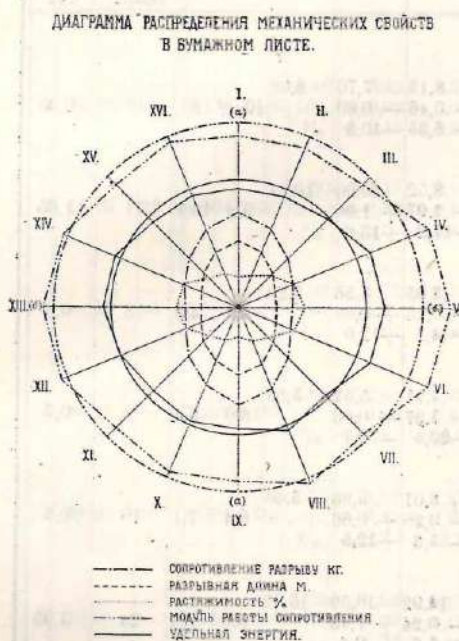
№ бумаги.	Состав %.			Толщина м/м.	Вес кв. м. гр.	Р. Сопротивление разрыву в кг. при 15 мм. шир.					δ. Растяжимость %.				
	Грамме.	Др. цел.	Др. мас.			Глав.	22,5°	45°	67,5°	Всех.	Глав.	22,5°	45°	67,5°	Всех.
1	25	75	—	0,146	0,530	3,40 абс. % +0,02 +0,59	3,42 -0,03 -0,88	3,37 -0,13 -3,81	3,27	3,22	2,70	2,70 0 0	2,40 -0,3 -11,1	2,40 -0,3 -11,1	2,50
2	15	60	25	0,064	0,697	4,30 абс. % -0,18 -3,0	4,17 -0,15 -3,5	4,15 +0,17 +4,0	4,47	4,27	2,55	2,70 +0,15 +5,9	2,17 -0,38 -14,9	2,57 +0,02 +0,78	2,50
3	—	50	50	0,073	0,487	1,92 абс. % -0,2 -10,4	1,72 -0,17 -8,8	1,75 -0,12 -6,2	1,80	1,80	1,72	1,97 +0,25 +14,5	1,75 +0,03 +1,74	2,02 +0,30 +17,4	1,80
4	45	55	—	0,229	0,592	2,82 абс. % -0,22 -7,8	2,6 -0,4 -16,0	2,42 -0,25 -8,8	2,57	2,6	2,22	2,32 +0,1 +4,5	2,02 -0,2 -9,0	2,05 -0,17 -7,66	2,25
5	20	40	40	0,070	0,588	2,75 абс. % -0,13 -4,7	2,62 -0,38 -13,8	2,37 -0,15 -5,4	2,60	2,59	2,2	2,62 +0,42 +19,1	2,02 -0,18 -8,2	2,37 +0,17 +7,7	2,30
6	20	80	—	0,230	1,660	5,30 абс. % -0,10 -1,90	5,20 -0,13 -2,46	5,17 -0,33 -6,25	4,97	5,20	3,17	3,42 +0,25 +7,9	2,87 -0,30 -9,4	3,32 +0,15 +4,7	3,30
7	100	—	—	0,139	1,267	9,65 абс. % -1,1 -1,1	8,55 -0,73 -7,5	8,82 -0,58 -6,0	9,07	9,10	5,97	5,47 -0,5 -8,3	4,77 -1,2 -2,0	5,92 -0,05 -0,8	5,50
8	40	60	—	0,070	1,434	5,50 абс. % -0,15 -2,7	5,35 -0,10 -1,8	5,40 +0,17 -3,1	5,67	5,50	2,20	2,05 -0,15 -6,3	2,15 -0,05 -2,2	2,10 -0,10 -4,5	2,20
9	25	60	15 сол. лед.	0,230	1,522	4,95 абс. % -0,18 -3,6	4,77 -0,33 -7,7	4,57 -0,37 -7,5	4,58	4,75	2,30	2,57 +0,27 +11,7	2,50 +0,2 +8,7	2,42 +0,12 +5,2	2,45
10	20	55	25	0,097	0,829	2,32 абс. % +0,90 +37	3,22 +0,78 +32	3,10 +0,90 +37	3,22	3,20	2,40	2,25 -0,15 -6,2	2,10 -0,30 -12,4	2,27 -0,13 -5,4	2,20
Ср	31	55	14	0,135	0,961	4,29 абс. % -0,13 -3,0	4,16 -0,18 -4,2	4,11 -0,07 -1,6	4,22 -0,07 -1,6	4,22	2,74	2,81 +0,07 +2,5	2,48 -0,26 -9,5	2,74 0 0	2,70 -0,04 -1,4

Таблица 2.

взаимно - перпендикулярным направлениям в бумажном листе.

С. Разрывная длина км.				А. Модуль Hartig'a $\frac{2}{3}$ Р. δ кг. км.				Удельн. энергия.		Сопротивление			
Глав.	22,5°	45°	67,5°	Всех.	Глав.	22,5°	45°	67,5°	Всех.	I	II	налому. Schopper др. обор.	прожал. Mullen кг. кв. см.
4,02	3,84 -0,18 -4,47	4,09 +0,07 +1,74	3,79 -0,23 -5,72	3,87	8,59	7,86 -0,63 -7,3	8,13 -0,46 -5,35	7,70 -0,89 -10,3	8,08	10,02	9,7	16	0,95
4,20	4,09 -0,11 -2,62	4,06 -0,14 -3,33	4,34 +0,14 +3,33	4,17	9,59	10,39 +0,79 +8,2	8,52 -1,07 -11,2	10,90 +1,30 +13,6	10,21	9,8	10,8	71	1,65
2,82	2,50 -0,32 -11,3	2,63 -0,18 -6,3	2,70 -0,12 -4,2	2,66	3,18	3,39 +0,1 +3,14	3,05 -0,13 -4,1	3,56 +0,38 +12,0	3,29	4,5	4,8	8	0,6
3,09	2,87 -0,22 -7,1	2,70 -0,39 -12,6	2,88 -0,21 -6,8	2,88	6,18	5,83 -0,35 -3,66	4,91 -1,27 -20,5	5,52 -0,66 -10,7	5,55	6,0	6,4	8	0,7
3,26	3,19 -0,07 -2,3	2,71 -0,55 -17,3	2,61 -0,65 -20,1	3,11	5,29	6,50 +1,21 +22,9	5,01 -0,28 -5,3	5,96 +0,66 +12,5	5,60	6,4	7,1	10	0,9
2,27	2,27 0 0	2,26 -0,01 -0,44	2,10 -0,17 -7,5	2,22	15,16	16,92 +0,76 +5,0	14,92 -0,24 -1,6	16,59 +1,43 +9,4	16,02	6,5	7,3	24	1,95
5,02	4,73 -0,29 -5,8	4,74 -0,28 -5,6	4,93 -0,09 -1,8	4,9	47,12	46,55 -0,57 -1,2	42,21 -4,91 -10,4	55,96 +8,84 +18,6	47,96	25,2	26,9	1187	3,8
2,34	2,24 -0,12 -5,1	2,34 0 0	2,39 +0,05 +2,1	2,32	10,42	10,50 -0,92 -8,1	11,76 +0,26 +2,3	11,77 +0,27 +2,4	11,34	5,2	5,1	10	1,6
2,27	2,27 0 0	2,12 -0,15 -6,6	2,17 -0,10 -4,4	2,19	9,83	11,49 +1,66 +16,9	11,43 +1,60 +16,3	12,14 +2,31 +23,5	11,24	4,9	5,3	4	1,6
2,74	2,66 -0,08 -2,9	2,51 -0,23 -8,4	2,63 -0,11 -4,0	2,64	7,41	6,45 -0,96 -13,0	6,59 -0,82 -11	6,79 -0,62 -8,3	6,50	5,2	5,8	10	0,9
3,22	3,07 -0,15 -4,6	3,02 -0,20 -6,2	3,05 -0,17 -5,3	3,1	12,38	12,59 +0,21 +1,7	11,65 -0,73 -0,6	13,68 +0,30 +10,5	12,58 +0,2 +1,6	8,4	8,4	135	1,5

ной длины на растяжимость; коэффициент $\frac{2}{3}$ в обоих случаях опущен. Исходные цифры взяты из средних для всех 8 направлений. Значения I и II достаточно близко совпадают между собой для отдельных бумаг, а в среднем совершенно точно дают одно значение 8,4 кв. см.: кв. сек.



Как мы неоднократно указывали, удельная энергия сопротивления должна быть главным критерием при оценке механических свойств материалов, как величина, независимая от направления. На диаграмме распределения механических свойств в бумажном листе, графически представляющей данные таблицей 3-й, это наше представление получает наглядное подтверждение. Соответственные каждому направлению величины табл. 3-ой отложены в диаграмме по своим радиусам от центра в одинаковом масштабе.

Действительно, здесь мы видим, что поскольку кривые изменения сопротивления разрыву в кг., разрывной длины в м. и

растяжимости в % от направления имеют вид эллипсов, постольку линии, изображающие изменение модуля Hartig'a и особенно—удельной энергии сопротивления, —приближаются к форме круга. Удельная энергии сохранения целостности какого-либо однородного естественного или искусственного образования (в данном случае—бумажного листа) есть такая же индивидуальная его константа, как и удельная масса—плотность, независимая от направления или места выборки пробы. Но отдельные факторы удельной энергии для бумаги: активный—сопротивление, крепость или интенсивность сохранения целостности, и пассивный—приспособление, растяжимость или экстенсивность сохранения целостности—зависят от направления, достигая в продольном направлении „по ходу“ бумаги в машине первый—своего максимума, а второй—минимума, и в поперечном—наоборот.

Чтобы закончить вопрос, приведем еще табл. 4-ую, где с средним из двух главных направлений $(a + b) : 2$ сравнены значения крепости и растяжимости, вычисленные на основании опытов для трех разных направлений, к которым сводятся двенадцать лучей (16—4), именно под углом 22,5°, 45° и 67,5° к направлению „а“.

Таблица 3.

Средние значения механических свойств для отдельных направлений.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	Средн.
Крепость—кг.	5,6	5,03	4,11	3,13	3,18	3,4	4,16	5,20	5,78	4,94	4,20	3,35	3,14	3,40	4,09	4,59	4,30
Растяжимость—%	1,80	2,02	2,58	3,53	3,90	3,55	2,50	2,16	1,79	2,13	2,40	3,31	3,65	3,48	2,48	2,10	2,65
Разрывная длина—см.	3,88	3,5	2,86	2,38	2,21	2,36	2,89	3,61	3,98	3,43	2,92	2,83	2,18	2,36	2,81	3,47	2,95
Мод. Натяг'a.	10,08	10,15	10,2	12,1	12,4	12,05	10,4	11,2	10,25	10,50	10,08	11,20	11,45	11,8	10,15	10,5	11,5
Уд. энергия.	6,98	7,07	7,58	8,4	8,6	8,37	7,22	7,80	7,12	7,3	7,0	7,43	7,95	7,85	7,03	7,07	7,54

Таблица 4.

Сравнение основных механических свойств по разным направлениям с средними из главных.

Направление среднее из	a	b	л	ж	б	з	e	r	0°	22,5°	45°	Главные.	
												67,5°	б : а
Крепость—кг.	5,66	4,98	4,08	3,39	3,16	3,40	4,12	5,10	4,38	5,01	4,10	3,39	2,1
Отклонение абсол.	+1,28	+0,60	-0,30	-0,99	-1,22	-0,98	-0,26	+0,72	0	+0,66	-0,28	-0,99	a : б
в %	+29,2	+13,7	-6,8	-22,6	-27,9	-22,4	-5,9	+16,4	0	+15,1	-6,4	-22,6	1,8
Растяж.—%	1,8	2,1	2,5	3,6	3,8	3,5	2,5	2,1	2,7	2,1	2,5	3,5	
Отклонение абсол.	-0,9	-0,6	-0,2	+0,9	+1,1	+0,8	-0,2	-0,6	0	-0,6	-0,2	+0,8	
в %	-33,4	-22,2	-7,4	+33,4	+41,5	+29,7	-7,4	-22,2	0	-22,2	-7,4	+29,6	

Отсюда видим, что под углом 45° отклонение отдельного показания от среднего значения из двух главных показаний наименьшее, именно для сопротивления разрыву— $6,4\%$ и для растяжимости— $7,4\%$. Следовательно практический совет О. Winkler'a и Н. Karstens'a вполне подтверждается: в случае надобности с неточностью, не превышающей 10% , т.-е. лежащей в пределах ошибок опыта, можно испытание механических свойств бумаги по двум главным направлениям заменить одним по диагональному под углом 45° к первым.

Вышепоказанное изменение крепости и растяжимости по эллиптическому закону свидетельствует о возможности для каждого рода бумаги, вернее для отношения $a:b$, установить такой угол, при коем показание, полученное для одного образца, взятого в этом направлении, будет с наибольшей вероятностью иметь наименьшее отклонение от среднего значения для главных направлений.

В этом смысле американский испытательный аппарат Müllen'a¹⁾, еще мало применяемый в Европе (в настоящее время по сообщению Papier-Fabrikant'a в Германии имеется только один такой аппарат), сулит нам более простой, быстрый и достаточно точный способ испытания механических свойств бумаги, чем достигается принятым методом испытания на машине Schorpp'a. Но об этом—в следующий раз.

Ф. Ф. Бобров и Я. И. Закроевская.

¹⁾ Имеется на Государственной Бумажной Испытательной Станции ТЭС'a.