

УДК 625.731

Е. В. Наливко, ассистент (БГТУ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С МАЛОЖЕСТКИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

В статье представлены прочностные показатели структурных элементов облегченного щита с бумажным сотовым наполнителем: растяжение-сжатие, изгиб и кручение обшивок; устойчивость сотового наполнителя при сжатии. Результаты исследований позволяют проводить оценочные расчеты и разработать аналитическую модель оценки эксплуатационных показателей слоистых панелей.

In the article sufficiently studied the strength characteristics of structural elements of lightweight boards with paper honeycomb: tension, compression, bending and torsion facings; shift of adhesive bonding and the stability of a paper honeycomb under compression. The results allow for further assessment calculations and time-run analytical model to assess the performance indicators of lightweight panels.

**Введение.** В настоящее время в мире наблюдается широкое развитие рынка сотовых наполнителей. Так, например, в странах Западной Европы, в Соединенных Штатах Америки, Канаде 45% мебельных и дверных полотен производится с использованием бумажного сотового наполнителя. Такая же тенденция наблюдается и в Китае, где существует государственная программа поддержки развития этого направления.

Такое стремительное внедрение сотового наполнителя в различные отрасли экономики, в том числе и мебельную, объясняется многими причинами, основными из которых являются экологическая чистота, относительно низкая стоимость, технологическая простота и обладание уникальными потребительскими свойствами. Также в изделиях мебели с сотовым наполнителем обеспечиваются все необходимые параметры по устойчивости, жесткости, прочности на изгиб и т. д.

Облегченные щиты с бумажным сотовым наполнителем являются не новым материалом. Они сравнительно давно используются для изготовления дверей, а конструкции подобного типа на протяжении многих десятилетий применяются в космической и автомобильных отраслях промышленности. Однако информация, касающаяся физико-механических свойств таких материалов, является ограниченной.

**Основная часть.** Облегченный щит в самом простом виде состоит из тонких внешних обшивок, связанных между собой слоем относительно легкого мало жесткого наполнителя. При правильном выборе материалов обшивок, их толщин и параметров наполнителя можно создать трехслойный щит с высокой прочностью и малым весом.

Если бы жесткость среднего слоя была сопоставима с жесткостью обшивок, то поведение панели в достаточной мере можно было бы описать стандартными моделями механики де-

формирования изотропного тела, для которого справедлива гипотеза о прямых нормалях при деформировании. Однако из-за малой жесткости сотового наполнителя в трехслойной панели могут возникать значительные по величине нормальные и угловые деформации, заметно влияющие на работу конструкции в целом.

Поэтому при проектировании и изготовлении трехслойных панелей с мало жестким бумажным наполнителем следует учитывать ряд специфических свойств как отдельных компонентов, так и конструкции в целом.

Для разработки и обоснования напряженно-деформированного состояния модели облегченного щита необходимо знать механические характеристики обшивок и внутреннего слоя облегченного щита, а именно их упругие постоянные: модули упругости при растяжении-сжатии, изгибе, коэффициенты поперечной деформации (коэффициенты Пуассона) и модули сдвига. Информация по ним весьма ограничена или отсутствует полностью.

Таким образом, в настоящее время нет ни опытных данных для разработки оптимальной конструкции облегченного щита с сотовым наполнителем, ни отдельных показателей свойств его структурных элементов, по которым можно было бы ее определить расчетным методом.

*Определение прочностных и упругих характеристик сотового наполнителя.* Сотовый наполнитель представляет собой ячеистую структуру конструкционного назначения, которая формируется из тонколистного материала бумаги и представляет собой множество смежных изолированных друг от друга каналов, по форме напоминающих пчелиные соты. Сечение каналов или ячеек может быть шестигранным, четырехгранным, а также более сложным (флекс-ячейка). Наибольшее распространение нашли сотовые наполнители с шестигранной формой ячейки.

Механические свойства сотового наполнителя зависят от толщины и плотности используемой

бумаги и размера ячеек заполнителя. Равную прочность можно получить, варьируя толщину бумаги и размер ячейки.

На кафедре технологии и дизайна изделий из древесины изучали свойства сотового заполнителя, производимого по стандартной технологии с раскаткой из переработанной непропитанной бумаги для гофрирования марки Б-0 (плотность бумаги 110 г/м<sup>2</sup>, размер ячеек 15, 25, 35 мм) производства ОАО «Светлогорский ЦКК» (Республика Беларусь).

Бумагу, используемую для изготовления заполнителя, рассматривали как анизотропный материал, свойства которого неравномерны в разных направлениях и зависят от ориентации волокон сырья.

Механические свойства бумаги определяли на образцах при испытаниях на растяжение по ГОСТ ИСО 1924-1-96 на горизонтальной разрывной машине SE 062/064 (фирма Lorentzen and Wettre, Швеция, рис. 1).

Относительная погрешность определения показателей не превышала 5%.

Результаты испытания представлены в табл. 1.



Рис. 1. Горизонтальная разрывная машина SE 062/064

Таблица 1  
**Прочностные и упругие показатели бумаги, используемой для изготовления сотового заполнителя**

Наименование показателя	Бумага для гофрирования марки Б-0 толщиной 0,22 мм, плотностью 110 г/м <sup>2</sup>
Предел прочности при растяжении, кН/м:	
вдоль волокон	12,27
поперек волокон	6,56
Модуль упругости, $E_{xx}$ , ГПа:	
вдоль волокон	6,362
поперек волокон	2,320

Наиболее важным показателем при изготовлении трехслойных щитов является прочность сотового заполнителя на сжатие. Так как давле-

ние при склеивании щита не должно превышать максимальной прочности при сжатии, которую обеспечивает бумажный сотовый заполнитель. При неправильном выборе силового режима получить качественный облегченный щит невозможно. Высокое давление при склеивании приведет к неплоскостности лицевых поверхностей щита и неоднородности его свойств.

Определение условного предела прочности заполнителя при сжатии в направлении оси ячеек производили по ГОСТ 23233-78, используя универсальную разрывную машину [1].

Результаты исследований по определению условного предела прочности при смятии представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Условный предел прочности при смятии  $\sigma_{см}$  бумажного сотового заполнителя (БСЗ)**

Размер ячейки БСЗ, мм	Высота БСЗ, мм	Максимальная нагрузка $F_{ср\ max}$ , Н	$\sigma_{см}$ , кПа	Деформация $\Delta h_{max}$ , мм
15	15	101,9	1,59	0,64
	25	91,7	1,43	0,63
	35	83,5	1,31	0,62
25	15	51,4	0,85	0,74
	25	49,2	0,81	0,70
	35	46,8	0,77	0,69
35	15	48,6	0,80	0,89
	25	46,9	0,77	0,84
	35	44,6	0,73	0,82

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что с увеличением высоты бумажного сотового заполнителя прочность при сжатии этих материалов убывает. Условный предел прочности при смятии бумажного сотового заполнителя высотой 15 мм, с размером ячейки 15 мм составил 1,59 кПа, при высоте 35 мм – 1,31 кПа.

Такой же характер зависимости мы наблюдаем и в отношении бумажного сотового заполнителя с размером ячеек 25 и 35 мм.

Во всех случаях без исключения с увеличением размера ячейки заполнителя прочность уменьшается. Это однозначно свидетельствует об увеличении жесткости заполнителя с уменьшением размера ячейки. Наличие деформации при сжатии у исследуемых материалов – очень важное и ценное свойство, полезное при использовании их в конструкции облегченного щита. Оно означает, что допуск по толщине заполнителя при разрезке его на бруски определенной толщины не должен превышать  $\pm 0,3$  мм для ячейки размером 15 мм,  $\pm 0,35$  мм размером 25 мм,  $\pm 0,42$  мм размером 35 мм.

*Определение эксплуатационных характеристик несущих обшивок.* Деревообрабатывающей промышленностью выпускается большой ассортимент древесных плитных материалов с широким диапазоном физико-механических свойств. Для разработки модели конструкции облегченного щита и ее анализа необходимы конкретные значения свойств плитных материалов. Поэтому были проведены уточняющие эксперименты, а именно испытания на изгиб, растяжение и кручение квадратной пластины.

В процессе изучения свойств обшивок было принято следующее допущение: древесностружечные и древесноволокнистые плиты в общем виде представили как бесконечную систему склеенных древесных частиц, ориентированных случайным образом и определенным образом взаимодействующих между собой. Размеры этих частиц малы по сравнению с размерами плит. Следовательно, эти материалы можно рассматривать как однородную сплошную среду. Для расчета однородных тел с хаотичным расположением малых частиц используют теорию упругости изотропного тела, согласно которой свойства материалов в их плоскости могут считаться одинаковыми.

При испытании на изгиб для определения прочности по ГОСТ 4648-71 [2] и модуля упругости по ГОСТ 9550-81 применяли образцы длиной 120 мм, шириной  $(30 \pm 0,5)$  мм, толщина зависит от типа панели. Модуль упругости при изгибе устанавливали при нагружении образца по трехточечной схеме.

Для определения упругих характеристик материалов с полимерной матрицей при испытаниях на растяжение по ГОСТ 11262-80 применяли образцы в виде полосы прямоугольного сечения [3].

Модуль сдвига материалов может быть определен различными способами [4]:

- 1) из опытов на перекашивание пластины;
- 2) при растяжении пластины под углом к главным осям симметрии;
- 3) при кручении стрижней и трубок;
- 4) при кручении квадратной пластины.

Относительно просто можно определить модуль сдвига по 4-му способу. Различают опорную и четырехточечную схемы нагружения пластины.

При нагружении пластины со стороны квадрата  $a$  силой  $F$  (рис. 2) измеряют прогиб в точке приложения силы  $W_p$ . Из решения соответствующей задачи теории упругости анизотропного тела следует, что при данном способе нагружения прогиб  $W_p$  обратно пропорционален модулю сдвига. В результате получают отношение для вычисления модуля сдвига:

$$G_{12} = \frac{3F^2 a}{4h^3 W_p}. \quad (1)$$

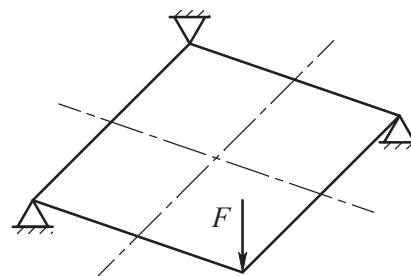


Рис. 2. Нагружение пластины по опорной схеме

Нагружение осуществляют в диапазоне усилий, не превышающих 30% от разрушающих. При этом прогиб не должен превышать  $(1-2)h$ , а толщина пластины  $h - (1/15)a$ , в противном случае, возможно, увеличивается влияние поперечного сдвига на прогиб и возможна потеря устойчивости.

Образцы были плоскими, без начальных прогибов и искривлений и равнотолщинными. Расстояние от точек опоры до края пластины принимали равным  $(1-2)h$ .

При нагружении по опорной схеме, показанной на рис. 2, средняя точка пластины также перемещается. При четырехточечной схеме (рис. 3) ее перемещение равно нулю.

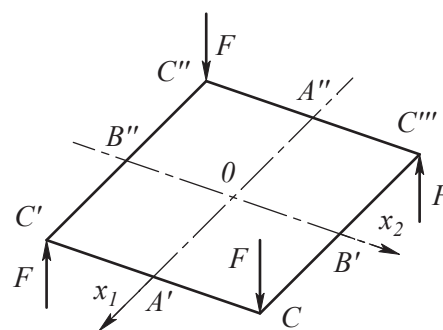


Рис. 3. Нагружение пластины по четырехточечной схеме

Зависимость между прогибом  $W$  в произвольной точке с координатами  $x_1, x_2$  и нагрузкой задана соотношением

$$W = \frac{3F}{h^3} (S_{16}x_1^2 + S_{26}x_2^2 + S_{66}x_1x_2), \quad (2)$$

где  $S_{16}, S_{26}, S_{66}$  – элементы матрицы упругих податливостей:

$$\begin{aligned} S_{16} &= \frac{n_{1,12}}{G_{12}} = \frac{n_{12,1}}{E_1}, \\ S_{26} &= \frac{n_{2,12}}{G_{12}} = \frac{n_{12,2}}{E_2}, \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $n_{12,2}, n_{12,1}$  – коэффициенты взаимного влияния второго рода, характеризующие сдвиг в плоскости  $(x_1, x_2)$ , вызванный растяжением в направлениях осей  $x_1, x_2$  соответственно (напряжениями  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$ );  $n_{1,12}, n_{2,12}$  – коэффициенты взаимного влияния первого рода, характеризующие удлинения в направлениях, обозначенных первым индексом, вызванных сдвигом в плоскости  $(x_1, x_2)$  – напряжением  $\sigma_{12}$ ;  $E_1, E_2$  – модули Юнга в направлении осей  $x_1$  и  $x_2$ .

Измеряя прогибы в точках с различными координатами, определяли все постоянные упругости, входящие в формулу (1). А именно:

$$\begin{aligned} S_{16} &= \frac{4h^3}{3F^2a} W_1; \\ S_{26} &= \frac{4h^3}{3F^2a} W_2; \\ S_{66} &= \frac{4h^3}{3F^2a} W_c, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $W_1$  – перемещение оси  $x_3$  точек  $A'$  и  $A''$ ;  $W_2$  – перемещение точек  $B'$  и  $B''$ ;  $W_c$  – суммарный прогиб углов, расположенных на диагоналях (точек  $C$  и  $C'$ ,  $C$  и  $C''$  соответственно).

С учетом (4) коэффициенты влияния в формулах (3) имеют следующие величины:

$$n_{12,i} = \frac{4E_i W_i h^3}{3F a^2}; \quad n_{i,12} = \frac{4G_{12} W_i h^3}{3F a^2} = \frac{W_i}{W_c}; \quad (i = 1, 2).$$

Следовательно, коэффициенты влияния находили непосредственно из опыта. Их можно также вычислить, используя соотношения (3) и экспериментально найденные постоянные упругости в главных осях симметрии материала.

Особенностью четырехточечной схемы является равенство нулю прогиба в центре. Метод непосредственно определения коэффициентов влияния из формулы (5) можно использовать и при трехточечной схеме нагружения, если измерить прогиб в центре пластины и вычесть его значение из измеренных значений прогибов точек  $A$ . При трехточечном опирании перемещение угловой точки, в которой приложена сила, в силу симметрии деформаций в 4 раза больше прогиба в центре, т. е.  $W_0 = W_p / 4$ . Тогда измеренное перемещение точек  $A$  и  $B$  равно  $W = W + W_0$ ,  $W = W + W_0$ . Следовательно, перемещения  $W_i$ , входящие в формулу (5), могут быть найдены по результатам измерений перемещений точек приложения силы и точек, расположенных на осях  $x_1$  и  $x_2$ . Перемещение  $W_c$ , входящее в формулу (5), может быть найдено как  $W_c = W_p - W_0$ .

Коэффициент Пуассона  $\mu$  рассчитывается по формуле

$$\mu = \left( \frac{E}{2G_{12}} - 1 \right), \tag{6}$$

где  $E$  – модуль упругости при изгибе.

Для каждого типа материала испытывали не менее трех образцов. По результатам измерения прогибов в различных точках образцов, вырезанных под разными углами по отношению к главным осям симметрии структуры материала, находили все постоянные, характеризующие упругие свойства материала в плоскости.

Экспериментальные данные по упругим и прочностным характеристикам для пластин обшивок приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Упругие и прочностные характеристики различных материалов обшивок**

Наименование показателя	Материал обшивки		
	ДВП (толщина 3,2 мм, плотность 900 кг/м <sup>3</sup> )	МДФ (толщина 7,6 мм, плотность 750 кг/м <sup>3</sup> )	ДСП (толщина 8 мм, плотность 675 кг/м <sup>3</sup> )
Прочность при изгибе $\sigma_{из}$ , МПа	15	25	38
Модуль упругости при изгибе $E_{из}$ , ГПа	4,3	5,1	6,0
Прочность при растяжении $\sigma_p$ , МПа	12	17	27
Мгновенный модуль упругости при растяжении $E$ , ГПа	2,8	4,8	5,4
Длительный модуль упругости при растяжении $H$ , ГПа	1,5	3,4	4,3
Модуль упругости в плоскости изотропии, ГПа	3,8	4,9	6,1
Модуль сдвига в плоскости пластины $G$ , ГПа	1,7	2,1	2,5
Коэффициент Пуассона, $\mu$	0,12	0,17	0,22

Как видно из таблицы, значения модуля упругости в плоскости изотропии (плоскости пластинки) достаточно хорошо соотносятся с данными для модуля упругости при изгибе, что свидетельствует о правильности выбора метода оценки сдвиговых характеристик материалов.

**Заключение.** В результате проведенных исследований определены прочностные показатели структурных элементов облегченного щита сотовым наполнителем: растяжение-сжатие, изгиб и кручение обшивок; устойчивость сотового наполнителя при сжатии. Результаты ис-

следований позволяют проводить в дальнейшем оценочные расчеты и разработать аналитическую модель оценки эксплуатационных показателей слоистых панелей, разработать методику выбора древесных плитных материалов и сотового заполнителя, которая позволяла бы определять напряжения и деформации в щите при действии нагрузок, и на их основе определять оптимальные параметры ячеистого щита, обеспечивающие его необходимую прочность и устойчивость при минимальном весе.

#### Литература

1. Заполнитель сотовый бумажный. Технические условия: ГОСТ 23233-78. – 01.01.1979. –

М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1978. – 4 с.

2. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб: ГОСТ 4648-71: – 25.11.1971. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1971. – 12 с.

3. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262-80: – 01.12.1980. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – 10 с.

4. Ставров, В. П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие / В. П. Ставров – Минск: БГТУ, 1996 – 164 с.

*Поступила 01.04.2010*