

МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕТА РАБОТЫ ОБШИВКИ ПРИ РАСЧЕТЕ СЖАТО-ИЗГИБАЕМЫХ КЛЕЕФАНЕРНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Жаданов В.И., Украинченко Д.А., Яричевский И.И.
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Практика отечественного и зарубежного строительства жилых и производственных объектов различного назначения доказала техническую возможность и экономическую целесообразность применения плит покрытия и панелей стен на деревянном каркасе, совмещающих несущие и ограждающие функции, когда основные продольные ребра выполняют роль колонн или балок перекрытий, а обшивки, включенные в общую работу конструкции, вместе со вспомогательными элементами являются ограждениями зданий и сооружений.

Характерным отличием совмещенных стеновых панелей от ограждений, навешенных на колонны, является совместная работа на сжатие с изгибом, когда сжимающая нагрузка от вышерасположенных конструкций передается непосредственно на продольные ребра, а изгибающая ветровая нагрузка может быть приложена как к основным ребрам, так и по всей площади конструкции в зависимости от конкретного конструктивного решения панели. В отличие от изгибаемых плит на основе древесины, методика расчета которых изучена достаточно подробно / 1-3 /, существующие алгоритмы проектирования ребристых сжато-изгибаемых панелей недостаточно достоверно отражают условия совместной работы обшивок и ребер, особенно при наличии подкрепляющих элементов. Во многих случаях это приводит к несоответствию расчетных моделей реальному поведению конструкции при воздействии эксплуатационных нагрузок.

С целью адекватной оценки напряженно-деформированного состояния сжато-изгибаемых панелей с учетом работы их обшивок авторами предпринята попытка усовершенствования алгоритмов расчета рассматриваемого класса конструкций. Рассмотрим «балочную» расчетную схему, соответствующую продольно-поперечному изгибу шарнирно-опертой или защемленной одним концом балки.

По аналогии с расчетом большеразмерных изгибаемых плит / 3 / будем полагать, что обшивка лишь частично вовлекается в работу сечения совместно с основными ребрами. В этом случае степень участия обшивки в общей работе конструкции оценивается коэффициентом приведения $k_{об}$. Экспериментально-теоретические исследования, проведенные авторами, показали, что коэффициент $k_{об}$ может быть определен по формуле:

$$k_{об} = k_b \cdot k_e \cdot k_E \cdot k_l \cdot k_{np} , \quad (1)$$

где k_b – коэффициент приведения обшивки для изгибаемых элементов, зависящий от шага основных ребер b_p и толщины обшивки δ_ϕ :

$$k_b = 0,042\delta_\phi^2 + 0,227\delta_\phi + 0,556 \quad - \text{ при } b_p = 750 \text{ мм,}$$

$$k_b = 0,029\delta_\phi^2 + 0,151\delta_\phi + 0,337 \quad - \text{ при } b_p=1500\text{мм}, \quad (2)$$

$$k_b = 0,014\delta_\phi^2 + 0,076\delta_\phi + 0,199 \quad - \text{ при } b_p=3000\text{мм};$$

k_e – корректировочный коэффициент, учитывающий действие продольных сжимающих сил;

k_E – корректировочный коэффициент, учитывающий фактическую степень анизотропии материала;

k_l – корректировочный коэффициент, учитывающий соотношение шага основных ребер b_p к пролету панели a_n ;

k_{np} – корректировочный коэффициент, учитывающий работу стеновой панели в составе пространственной системы здания.

Значение коэффициент k_e можно определить с достаточной для практических целей точностью (степень погрешности не более 3%) по аппроксимационной формуле:

$$k_e = 1 - 0,09 \sqrt{\frac{N \cdot c}{M}}, \quad (3)$$

где N – расчетное продольное усилие, кН;
 M – расчетный изгибающий момент, кНм;
 $c = l_m$ – коэффициент на единицы измерения.

Сравнивая значения коэффициентов приведения обшивки для базового варианта ($E/E_{90}=1,5$) и рассматриваемой конструкции ($E/E_{90}=1,0 \dots 1,5$), можно получить значения коэффициента коррекции по степени ортотропности обшивки k_E , которые можно представить в виде формулы:

$$k_E = k(\nu_E) / k_{\delta_{az}}, \quad (4)$$

где $k(\nu_E)$ – коэффициент приведения обшивки для рассматриваемого случая;
 $k_{\delta_{az}}$ – то же, для базовой плиты ($\nu_E=1,5$).

Коэффициент k_l зависит от фактического соотношения b_p/a_n и его значение можно записать в виде (погрешность не более 5%):

$$k_l = 1,2 - 0,4 \sqrt{\frac{b_p}{a_n}} \quad - \quad \text{при } \frac{b_p}{a_n} > 0,25$$

$$k_l = 1 \quad - \quad \text{при } \frac{b_p}{a_n} \leq 0,25 \quad (5)$$

Отметим, что вышеприведенные формулы при незначительной погрешности отличаются простотой и удобством использования, в том числе в автоматизированных расчетах. При необходимости точного определения коэффициенты $k_{об}$ можно использовать стандартные программные расчетные комплексы типа «SCAD», «Ли́ра», «COSMOS» и им подобные.

Зная значение $k_{об}$, можно определить геометрические характеристики поперечного сечения панели. Приведем пошаговый алгоритм такого определения с учетом наличия одной или двух обшивок, причем в случае двухсторонней обшивки сохраняется симметрия сечения.

1. Расчетная ширина фанерной обшивки равна:

$$b_\phi = 2b_{об}(m_{ор} - 1) + b \cdot m_{ор} = k_{об}(b_n - b \cdot m_{ор}) + b \cdot m_{ор}, \quad (6)$$

где $k_{об}$ - коэффициент приведения обшивки по формуле (1);

$m_{ор}$ - число основных ребер панели;

b - ширина поперечного сечения основных ребер.

2. Площадь приведенного сечения панели:

$$A_{np} = A_\delta + n \cdot A_\phi, \quad (7)$$

где $A_\delta = m_{ор} \cdot b \cdot h$ - площадь поперечного сечения основных ребер;

$n = \frac{E_\phi}{E_\delta}$ - коэффициент приведения фанеры и древесины;

A_ϕ - площадь поперечного сечения фанерных обшивок:

$A_\phi = b_\phi \cdot \delta_\phi$ - в случае односторонней обшивки;

$A_\phi = 2b_\phi \cdot \delta_\phi$ - в случае двухсторонних обшивок

h - высота поперечного сечения основных ребер.

3. Приведенный статический момент сечения относительно оси 1-1 для случая с односторонней обшивкой:

$$S_{np} = \frac{1}{2} m_{ор} \cdot b \cdot h^2 + n \cdot A_\phi \cdot \left(h + \frac{\delta_\phi}{2} \right). \quad (8)$$

4. Положение центральной оси приведенного сечения:

- односторонняя обшивка: $y_0 = S_{np} / F_{np}$; (9)

- двухсторонняя обшивка: $y_0 = 0,5(h + 2\delta_\phi)$. (10)

5. Момент инерции приведенного сечения относительно центральной оси равен:

- односторонняя обшивка:

$$I_{np} = m_{op} \cdot \left(\frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(y_0 - \frac{h}{2} \right)^2 \right) + n \cdot b_\phi \cdot \delta_\phi \cdot \left(h - y_0 + \frac{\delta_\phi}{2} \right)^2; \quad (11)$$

двухсторонняя обшивка:

$$I_{np} = m_{op} \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} + 2n \cdot b_\phi \cdot \delta_\phi \cdot \left(\frac{h + \delta_\phi}{2} \right)^2. \quad (12)$$

Определим усилия, перемещения и напряжения в сжато-изгибаемых клефанерных ребристых панелях на основе точного решения при продольно-поперечном изгибе. При $E_\delta \cdot I_{np} = const$, $q = const$, общее решение по методу начальных параметров дифференциального уравнения продольно-поперечного изгиба стержня имеет вид / 4 /:

$$\begin{aligned} v(x) = & v_0 + \frac{\Theta_0}{k} \cdot \sin kx + \frac{M_0}{k^2 \cdot E \cdot I} (1 - \cos kx) + \frac{\bar{Q}_0}{k^2 E_q I_{np}} \cdot \left(x - \frac{\sin kx}{k} \right) - \\ & - \frac{q}{k^2 E_q I_{np}} \cdot \left(\frac{\cos kx}{k^2} + \frac{x^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где $v(x)$ – функция прогибов сечений;

v_0 – начальный прогиб;

Θ_0 – начальный угол поворота;

$\bar{Q}_0 = \frac{q a_n}{2}$ – начальная «балочная» поперечная сила;

$$k = \sqrt{\frac{F}{E_q I_{np}}}; \quad F = q_1 \cdot b_n; \quad q = q_2 \cdot b_n;$$

a_n – расчетная длина панели;

b_n – ширина панели.

Рассмотрим различные условия закрепления концов панели, наиболее распространенные в строительной практике.

Шарнирно-опертая панель.

Учитывая граничные условия $v_0=0$, $M_0=0$, $\bar{Q}_0 = \frac{q \cdot a_n}{2}$, $v(a_n)=0$ получим:

$$\Theta_0 = \frac{k}{\sin k \cdot a_n} \left(\frac{q \cdot a_n}{2F} \left(a_n - \frac{\sin k \cdot a_n}{k} \right) \right) - \frac{q}{F} \left(\frac{\cos k \cdot a_n}{k^2} + \frac{a_n^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

$$v_{max} = v\left(\frac{a_n}{2}\right) = \frac{\Theta_0}{k} \sin k \frac{a_n}{2} - \frac{qa_n}{2F} \left(\frac{a_n}{2} - \frac{\sin k \frac{a_n}{2}}{k} \right) + \frac{q}{F} \left(\frac{\cos k \frac{a_n}{2}}{k^2} + \frac{a_n^2}{8} - \frac{1}{k^2} \right),$$

$$M_{max} = M\left(\frac{a_n}{2}\right) = E_\delta I_{np} \left(-k \Theta_0 \sin k \frac{a_n}{2} - \frac{qa_n}{2F} k \sin \frac{ka_n}{2} + \frac{q}{F} \left(-\cos k \frac{a_n}{2} + 1 \right) \right),$$

$$|Q|_{max} = |Q(0)| = F \cdot \Theta_0 + \frac{q \cdot a_n}{2}.$$

Защемленная панель.

Граничные условия $v_0=0$, $\Theta_0=0$, $\bar{Q}_0 = -q \cdot a_n = Q(0)$,

После преобразований получим:

$$M_0 = M_{max} = \frac{q \cdot a_n \cdot \sin k \cdot a_n}{k \cdot \cos k \cdot a_n} - \frac{q}{k^2 \cdot \cos k \cdot a_n} \cdot (-\cos k \cdot a_n + 1) =$$

$$= \frac{q}{k^2} \cdot \left(a_n \cdot k \cdot \operatorname{tg} k \cdot a_n + 1 - \frac{1}{\cos k \cdot a_n} \right),$$

$$|Q|_{max} = \max(q \cdot a_n; F \cdot \Theta(a_n)),$$

где

$$\Theta(a_n) = \frac{M_0}{k \cdot E_\delta \cdot I_{np}} \cdot \sin ka_n - \frac{q \cdot a_n}{k^2 \cdot E_\delta \cdot I_{np}} \cdot (1 - \cos ka_n) + \frac{q}{k^2 \cdot E_\delta \cdot I_{np}} \cdot \left(-\frac{\sin ka_n}{k} + a_n \right),$$

$$v_{max} = v(a_n) = \frac{M_0}{F} \cdot (1 - \cos ka_n) - \frac{q \cdot a_n}{F} \cdot \left(a_n - \frac{\sin ka_n}{k} \right) + \frac{q}{F} \cdot \left(\frac{\cos ka_n}{k^2} + \frac{a_n^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Нормальные и касательные напряжения в поперечных сечениях определим по формулам сопротивления материалов. В частности, максимальное сжимающее напряжение при двухсторонней обшивке равно:

$$\sigma_{max}^{сж} = \frac{M_{max} \cdot 0,5h}{I_{np}} + \frac{F}{A_{np}}. \quad (14)$$

В случае односторонней внешней обшивки соответствующее напряжение будет также в обшивке и равно:

$$\sigma_{max}^{сж} = \frac{M_{max}(h - y_0)}{I_{np}} + \frac{F}{A_{np}} \quad (15)$$

При этом продольная сжимающая нагрузка разгружает растянутые от изгиба волокна основных ребер.

Проведенные экспериментальные исследования шарнирно-опертых панелей позволили определить величину фактического прогиба в середине пролета, которая оказалась на 12...17% меньше теоретического значения. Данное расхождение, с одной стороны, можно считать удовлетворительным для условий натурального эксперимента, с другой стороны, оно дает определенный резерв надежности конструкции и предопределяет возможность разработки более точных алгоритмов расчета нелинейно-деформируемых совмещенных ребристых сжато-изгибаемых панелей на основе древесины.

Выводы. 1. В случае расчета на прочность и жесткость сжато-изогнутых панелей в одном направлении для расчетов внутренних усилий, напряжений и деформаций вполне применимо использование «балочной» расчетной схемы.

2. Разработанный алгоритм расчета ребристых панелей позволяет учесть фактическую неравномерность работы обшивки по ширине панели при помощи коэффициента, определённого экспериментально-теоретическим путем и выраженного аппроксимационными формулами, удобными в практических расчетах.

3. Использование «балочной» расчетной схемы приводит к частичному завышению величин прогибов, что идет в запас надежности конструкции.

Список литературы

1. СП 64.13330.2011. *Деревянные конструкции*. - М.: ЦПП. – 87с.
2. *Рекомендации по конструированию, расчету и изготовлению большепролетных клефанерных плит для покрытий общественных зданий*. – Новосибирск: СибЗНИИЭП, 1988. - 22с.
3. *Жаданов В.И. Большиеразмерные совмещенные плиты из клееной древесины и пространственные конструкции на их основе. Разработка, исследования, оптимизация / В.И. Жаданов, Г.И. Гребенюк, П.А. Дмитриев*. - Оренбург: ИПК ОГУ, 2007. – 209с.
4. *Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник в трех томах под ред. Биргера И.В., Пановко Я.Г. Том.1*. – М.: Машиностроение, 1968. - 831с.