

Левчук А.А.  
(БрГТУ, г. Брест)

## ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ТРЕХСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ С УТЕПЛИТЕЛЕМ

Трехслойные металлические панели с утеплителем в Республике Беларусь производятся с середины девяностых годов прошедшего столетия. На сегодняшний день в стране работают около 15 предприятий, выпускающих трехслойные панели. Общий объем выпускаемых в республике панелей превышает 3 млн. м<sup>2</sup> в год.

Несмотря на большие объемы выпуска трехслойных панелей, уровень проектирования ограждений из них остается низким. Об этом свидетельствуют частые случаи выхода из строя трехслойных панелей, как в процессе эксплуатации, так и во время монтажа. Большое число ошибок при проектировании ограждений из трехслойных панелей вызвано в основном недостатками существующих методик расчета таких ограждений [1 – 4], которые:

1) не позволяют производить статический расчет трехслойных панелей по неравнопролетным расчетным схемам с учетом требований [5] по приложению нормируемых нагрузок (линейное изменение нагрузки в зоне расположения снеговых мешков для панелей покрытия или ветровой нагрузки по высоте для стеновых панелей; наличие силовой нагрузки не во всех пролетах; приложение сосредоточенных сил);

2) не позволяют учесть жесткость опорных связей (крепление панели к несущим конструкциям жесткое из плоскости и допускает свободные деформации в плоскости панели);

3) позволяют определять внутренние усилия в элементах панелей только в предположении абсолютной плоскостности ограждения, что никогда не выполняется на практике;

4) при анализе напряженного состояния среднего слоя позволяют учесть только усилия сдвига в плоскости продольного сечения и усилия сжатия на опорах, в то время как высокая деформативность применяемых профилированных обшивок приводит к возникновению сложного напряженного состояния в среднем слое.

Для расчета ограждений из трехслойных панелей с плоскими и профилированными обшивками по расчетным схемам с учетом требований [5], автором были разработаны плоские конечно-элементные модели [6; 7].

Для оценки сходимости результатов расчетов трехслойных панелей методом конечных элементов с наиболее точным из известных аналитиче-

ских решений [4] были выполнены тестовые расчеты по схемам, удовлетворяющим требованиям аналитических методик, которые показали удовлетворительное для технических расчетов совпадение численных и аналитических результатов. Максимальные различия при решении стандартных задач в прогибах и напряжениях не превышают 5 % [6].

Для оценки влияния жесткости опорных связей на напряженно-деформированное состояние панелей были выполнены экспериментальные и численные исследования. В результате экспериментальных исследований было установлено, что жесткость креплений панелей к несущим конструкциям в плоскости ограждения составляет 1167 – 1717 кН/м, из плоскости – 226 – 389 кН/м на один крепежный винт [8]. В результате численных исследований установлено, что создаваемые крепежными винтами стеснения деформаций трехслойных панелей в плоскости ограждения ведут к возникновению дополнительных напряжений в обшивках и среднем слое панелей величиной 3 – 5 % соответствующих расчетных сопротивлений [9]; податливость трехслойных панелей из плоскости ограждения на опорах ведет, как правило, к снижению напряжений в обшивках и среднем слое панелей на 2 – 6 % от величин соответствующих расчетных сопротивлений [10]. Таким образом, при проектировании ограждений из трехслойных панелей создаваемое крепежными винтами на опорах стеснение деформаций в плоскости ограждения и податливость панелей на опорах из плоскости ограждения можно не учитывать.

Такие расчетные ситуации, как перепады отметок опор трехслойных металлических панелей в ограждениях, монтаж панелей с отклонениями от плоскостности, деформативность несущих конструкций, к которым крепятся панели, в общем случае можно рассматривать как задачу о смещениях опор многопролетных панелей из плоскости ограждения.

При монтаже несущих конструкций в полном соответствии с требованиями действующих норм [11] перепад отметок опор панелей в плоскости ограждения может достигать 40 мм.

Для исследования влияния смещений опор из плоскости ограждения на напряженно-деформированное состояние панелей были выполнены расчеты панелей по схеме, показанной на рисунке 1.

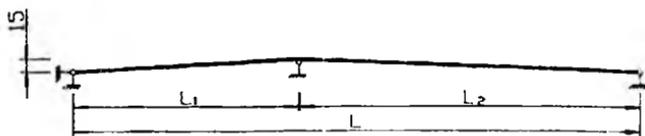


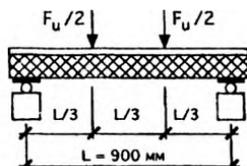
Рис. 1. Расчетная схема панели

Выполнялись расчеты панелей различных толщин и длин с плоскими стальными обшивками толщиной 0,5 мм. В результате численного исследования выявлено, что нормальные напряжения в обшивках панели толщиной 100 мм при  $L_1 = L_2 = 3$  м достигают 60 МПа, что составляет около 50 % критических напряжений потери местной устойчивости сжатой плоской обшивки. Величины напряжений в обшивках и среднем слое возрастают при уменьшении пролета панелей и при увеличении высоты сечения панели [12].

В рамках экспериментальных исследований, целью которых являлось определение прочностных и упругих характеристик панелей, необходимых для расчетов ограждений по первому и второму предельным состояниям, были выполнены испытания на сдвиг панелей стеновых и покрытия, отличающихся только профилем наружной обшивки. Стеновые панели были выполнены с обеими плоскими обшивками, панели покрытия – с внутренней плоской и наружной профилированной обшивками (рис. 2). Схема испытания на сдвиг показана на рисунке 3.



Рис. 2. Поперечное сечение панели покрытия



$F_u$  – разрушающая нагрузка на образец

Рис. 3. Схема испытаний образцов панелей на сдвиг

В результате испытаний на сдвиг было установлено, что панели покрытия с наружными профилированными обшивками разрушались при значительно меньших напряжениях сдвига в среднем слое в плоскости продольного сечения панели (73,5 кПа), чем стеновые панели с плоскими обшивками (103,0 кПа) [13]. При испытаниях разрушение стеновых панелей происходило с образованием наклонных трещин, в то время как разрушение панелей покрытия начиналось с отрыва гофров в приопорных зонах, с последующим образованием наклонных трещин.

Наружная обшивка с широкими нижними полками достаточно деформативна, и ее работа значительно отличается от балочной, в связи с чем в зонах изгибов обшивок могут возникать напряжения, не учитываемые стандартными методиками расчета, учитывающими сдвиг среднего слоя только в плоскости, параллельной продольной оси панели и перпендикулярной ее обшивкам ( $YOZ$  на рисунке 4).

Для оценки напряженного состояния среднего слоя был выполнен расчет трехмерной модели образца панели покрытия. Расчет выполнялся с ис-

пользованием программного комплекса ANSYS 11. Обшивки были приняты стальными толщиной 0,5 мм, модуль сдвига среднего слоя – 4,7 МПа по результатам испытаний. Результаты расчета показаны на рисунках 4 и 5.

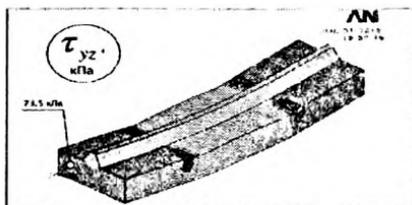


Рис. 4. Напряжения сдвига в плоскости  $YOZ$

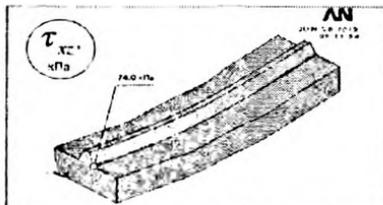


Рис. 5. Напряжения сдвига в плоскости  $XOZ$

На рисунке 4 показаны изополя касательных напряжений в плоскости  $YOZ$ , получаемые существующими методиками расчета. Из рисунка видно, что в зонах чистого сдвига по всей высоте панели, кроме области в гофре, возникают касательные напряжения  $\tau_{yz} = 73,5$  кПа. На рисунке 5 показаны изополя касательных напряжений в плоскости  $XOZ$ , не учитываемые существующими методиками расчета. Эти напряжения в опорной зоне в области изгиба обшивки достигают максимального значения  $\tau_{xz} = 74,0$  кПа.

Величина результирующих касательных напряжений в точке изгиба обшивки составляет  $\tau_{резX} = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2} = \sqrt{74,0^2 + 73,5^2} = 104,3$  кПа, что совпадает с полученной экспериментально прочностью стеновых панелей при сдвиге (103 кПа).

Выполненные численные исследования [13] показали, что форма профиля обшивки оказывает существенное влияние на возникающие напряжения сдвига в плоскости  $XOZ$ . Так, уменьшение угла наклона граней профиля  $\alpha$  с 63 до 45° ведет к уменьшению напряжений  $\tau_{xz}$  в два раза.

#### Выводы:

При проектировании ограждений зданий и сооружений из трехслойных металлических панелей можно не учитывать создаваемое крепежными винтами на опорах стеснение деформаций в плоскости ограждения и податливость панелей на опорах из плоскости ограждения. Возникающие от стеснения горизонтальных деформаций дополнительные усилия в обшивках и среднем слое панелей приблизительно равны снижению усилий в них от вертикальной податливости панелей на опорах.

Смещения опор многопролетных панелей из плоскости ограждения ведут, в общем случае, к возникновению значительных по величине усилий в обшивках и среднем слое панелей. Вызванные нормированными

ТНПА отклонениями от плоскостности многопролетных панелей дополнительные напряжения в обшивках и среднем слое необходимо учесть при расчетах по первой группе предельных состояний.

Форма профиля наружной обшивки оказывает существенное влияние на напряженное состояние среднего слоя. Наиболее выгодной является форма профиля с углом наклона граней  $\alpha = 45^\circ$ .

### Литература

1. Рекомендации по расчету трехслойных панелей с металлическими обшивками и заполнителем из пенопласта. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1976. – 26 с.
2. Рекомендации по применению трехслойных панелей с профилированными обшивками и средним слоем из пенопласта. – Свердловск, 1973.
3. EN 14509. Self-supporting double skin metal faced insulating panels – Factory made products – Specifications / CEN. – Brussels: 2006.
4. Lightweight Sandwich Construction, edited by J.M. Davies. Blackwell Science, 2001.
5. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 35 с.
6. Левчук, А.А. Статический расчет металлических трехслойных панелей с утеплителем из минераловатных плит и пенопласта / А.А. Левчук // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 4. Строительство, архитектура. – С. 151 – 156.
7. Левчук, А.А. Расчетная модель металлических трехслойных панелей с утеплителем из минераловатных плит и пенопласта / А.А. Левчук // Вестн. Брест. гос. тех. ун-та. Строительство и архитектура. – 2008. – № 1. – С. 97 – 102.
8. Драган, В.И. Исследование несущей способности креплений винтами трехслойных металлических панелей к каркасу здания / В.И. Драган, А.А. Левчук // Вестн. БрГТУ. – 2010. – № 1. Строительство и архитектура. – С. 74 – 77.
9. Левчук, А.А. Влияние стеснения свободы деформаций панелей металлических с утеплителем в плоскости стенового ограждения на их напряженно-деформированное состояние / А.А. Левчук // Вестн. БрГТУ. – 2009. – № 1. Строительство и архитектура. – С. 98 – 101.
10. Левчук, А.А. Крепление трехслойных металлических панелей с утеплителем к несущим конструкциям / А.А. Левчук // Белорус. аналитический журнал для практиков строительного дела «Мастерская. Современное строительство». – 2011. – № 2(83). – С. 36 – 37.

11. Стальные конструкции. Правила монтажа: ТКП 45-5.04-41-2006. – Минск: Минстройархитектуры, 2007.
12. Левчук, А.А. Исследование влияния смещений опор из плоскости ограждения на напряженно-деформированное состояние двухпролетных металлических трехслойных панелей / А.А. Левчук // Современные строительные конструкции из металла и древесины / ООО «Внешрекламсервис». – Одесса, 2008. – Ч. 1 – С. 176 – 178.
13. Драган, В.И. Несущая способность трехслойных металлических панелей с профилированными обшивками / В.И. Драган, А.А. Левчук // Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс: сб. науч. тр. междунар. симпоз. – Одесса, 2012.

УДК 624.046.5

**Молош В.В.**

(БрГТУ, г. Брест)

### **ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА В РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ ПЛОСКИХ ПЛИТ**

Проводимые в последнее десятилетие многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, связанные с изучением поведения локальной зоны соединения колонны и плоской плиты, были направлены на создание адекватной модели сопротивления срезу при продавливании, обеспечивающей выполнение требований надежности в соответствии с ТКП EN 1990.

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что сопротивление срезу при продавливании плоских перекрытий, так же как и сопротивление изгибу, в значительной степени зависит от геометрических параметров всей системы (толщины плиты перекрытия, размеров сечения колонны, количества и расположения армирования). Разрушение при местном срезе в большинстве случаев имеет хрупкий характер, при котором сопротивление изгибу не всегда может быть исчерпано полностью.

Существующие расчетные модели сопротивления срезу при продавливании условно можно разделить на две группы. К первой можно отнести эмпирические модели, полученные описанием экспериментальных данных абстрактными математическими зависимостями, не имеющими, как прави-