

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ОГ- РАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Кашуро Е.

Данная статья посвящена созданию расчетной конечно-элементной модели стеновой многослойной панели поэлементной сборки.

Несмотря на то, что были разработаны рекомендации по изготовлению панелей; методам испытания по определению показателей материала; методам испытания панелей; методике их расчета, из-за специфических характеристик тонкостенных профилей и их особенностей сборки вопросы устойчивости тонкостенных элементов, разрушения соединений и несущей способности стеновых систем все ещё не до конца исследованы. Решение этих задач особенно актуально для сэндвич-панелей поэлементной сборки, так называемых кассетных панелей, о которых и пойдет речь ниже.

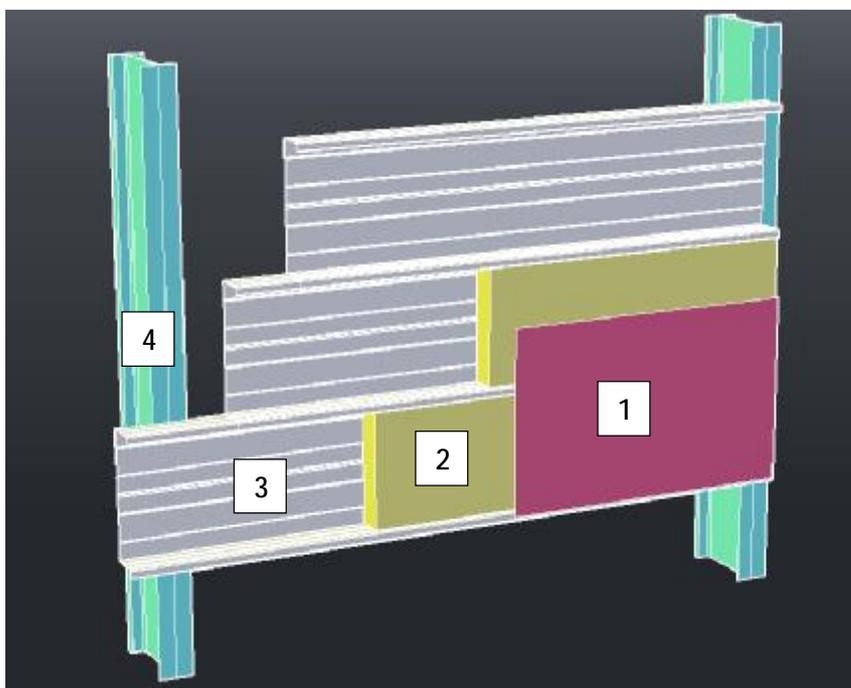


Рисунок 1 – Конструкция кассетной панели

поз. 1 – конструкция обшивки

поз. 2 – утеплитель

поз. 3 – кассетный профиль

поз. 4 – несущие конструкции

Существуют различные подходы для оценки напряженно-деформированного состояния стеновых панелей [1]: экспериментальные, аналитические и численные методы. Экспериментальный подход наиболее часто используется и основан он на испытаниях полномасштабной модели. По сути, номинальные значения прочности на сдвиг, представленные нормами, получены экспериментально. Из-за требуемого большого количества испытаний ясно, что этот подход является самым дорогим и, кроме того, результаты этого метода можно использовать только тогда, когда характеристики стены (геометрия и материал)

строго соответствуют эксперименту. Для преодоления данных ограничений для исследования НДС стеновых панелей используется аналитический подход, основанный на методе конечных элементов.

Численные модели обычно калибруются с использованием имеющихся экспериментальных результатов, и их можно использовать для определения НДС панелей, имеющих характеристики, отличные от испытанных.

Далее мы рассмотрим аналитический подход к исследованию поведения трехслойных панелей кассетного профиля. Первым шагом для этого является построение адекватной многослойной конечно-элементной модели.

Существует несколько способов моделирования многослойных конструкций [2]:

1) модель, построенная из объемных конечных элементов. Однако использование данного способа затруднительно из-за малой толщины кассетного профиля. Т.е. для построения модели понадобится слишком большое количество конечных элементов или же придется превысить рекомендуемое соотношение размеров элемента, что приведет к накоплению погрешности.

2) модель, построенная из плоских конечных элементов на основе теории многослойных оболочек. Т.е. каждый слой будет представлен пластиной с осредненными свойствами материалов. Такой метод не применим для панелей поэлементной сборки из-за невозможности анализа поведения крепежа в такой схеме.

3) модель, основанная на комбинации плоскостных и объемных конечных элементов, где для тонких конструкций кассетного профиля и обшивки используются 2D элементы, а для несущих конструкций – 3D элементы. Данная модель является наиболее эффективной. Она и будет рассмотрена ниже.

Отказ всей панели в основном вызван разрушением соединений и потерей устойчивости, поэтому нелинейные свойства материала кассетной панели (стали) при численном анализе можно не учитывать и использовать обычные упругие параметры для материала (модуль упругости $E = 2,1 \times 10^5$ МПа, модуль сдвига $G = 8,1 \times 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7850$ кг / м³). И ввиду малой толщины кассетный профиль моделируется плоскостными конечными элементами с вышеназванными параметрами материала и постоянной толщиной. Пластические свойства материала кассетного профиля включаются в нелинейное поведение сопряжений элементов (сдвиг крепежа под действием нагрузки). Несущие элементы обладают гораздо большей толщиной и жесткостью по сравнению с холодногнутым профилем кассеты, поэтому в аналитической модели свойства материала несущих конструкций также можно считать упругими, поэтому несущая конструкция моделируется объемными конечными элементами с упругими свойствами материала (модуль упругости $E = 2,1 \times 10^5$ МПа, модуль сдвига $G = 8,1 \times 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7850$ кг / м³) [3]. В расчетную модель не включается работа слоя утеплителя, т.к. в отличие от сэндвич-панелей заводского производства, теплоизолирующий слой в сэндвич-панелях поэлементной сборки не приклеивается к кассетному профилю, а вкладывается в него, причем ширина слоя утеплителя зачастую меньше ширины кассетного профиля, а в процессе эксплуатации изолирующий слой расслаивается и оседает, образуя зазоры. Слой обшивки же прикрепляется к профилю и учет этого элемента стенового ограждения необходим. Свойства материала обшивки также задаются линейными, а нелинейный характер работы будет учтен в работе крепежа. Наиболее популярным наружным слоем в стеновых трехслойных панелях поэлементной сборки является профилированный лист и есть несколько подходов к его моделированию. Многие мощные конечно-

элементные программные комплексы позволяют замоделировать профилированный лист полностью по его размерам и форме как криволинейную оболочку с изотропными свойствами материала, однако зачастую профиль является не просто трапециевидальным, а имеет бороздки, что при делении такой поверхности на сетку конечных элементов приведет к большому числу последних. Это сделает систему стеновых панелей сложной и требует больше рабочего и процессорного времени для создания и расчета модели. Поэтому профилированный лист обычно упрощают до эквивалентной ортотропной плоской обшивки с двумя модулями упругости [4]. Авторы статей [5] предложили следующие характеристики свойств материала приведенного плоского листа:

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cdot \frac{I_x}{I_0} \\ E_y = E_0 \cdot \frac{p'}{p} \\ \nu_{yx} = \nu_0 \\ \nu_{xy} = \nu_{yx} \cdot E_x / E_y \end{cases} ; \quad (1)$$

где

- E_0 – модуль упругости материала профилированного листа (стали),
- ν_0 – коэффициент Пуассона материала профилированного листа (стали),
- E_x – приведенный модуль упругости в направлении X,
- E_y – приведенный модуль упругости в направлении Y,
- p' – ширина расплавленного листа одной волны,
- p – шаг волны,
- I_0 – момент инерции одной волны относительно её центра тяжести,
- I_x – момент инерции плоского листа шириной p' относительно его центра тяжести.

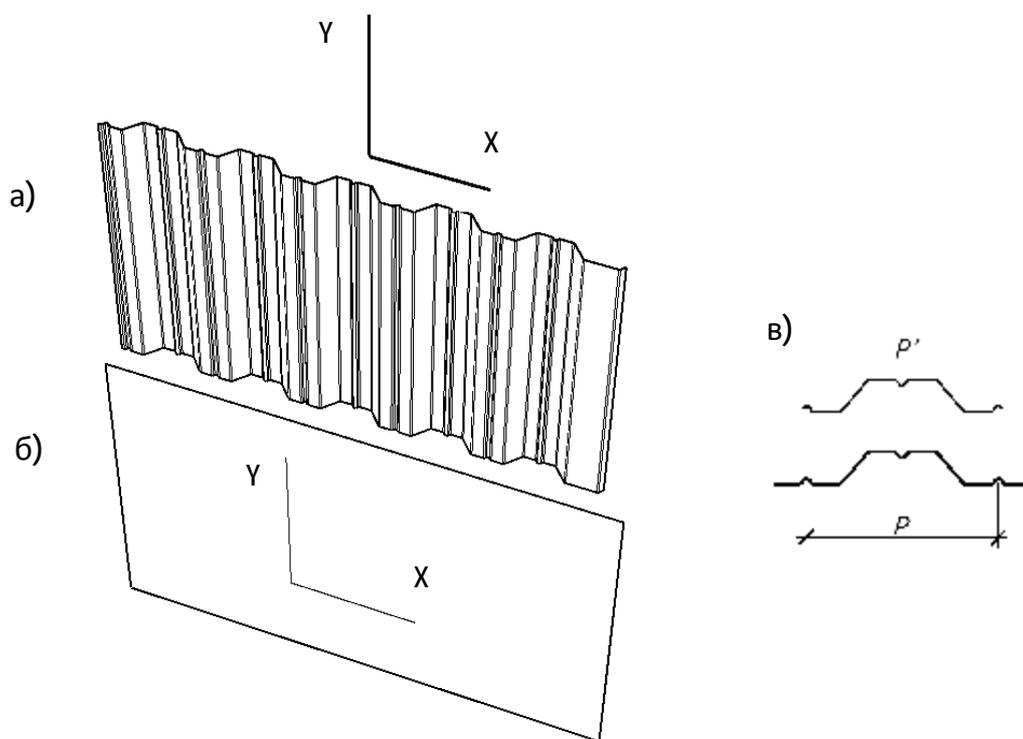


Рисунок 2 – Конструкция обшивки:

а) – исходный профилированный лист из изотропного материала; б) – эквивалентный гладкий лист из ортотропного материала; в) – размеры одной волны.

Сопряжения являются очень важным и чувствительным компонентом в кассетных стеновых панелях. Экспериментальные исследования доказали, что отказ панели обычно происходит из-за отказа соединений. Поэтому необходимо тщательно и грамотно замоделировать места соединения кассетного профиля к кассетному профилю; кассетного профиля к несущим конструкциям и наружного слоя обшивки к отгибам кассетного профиля. Для учета крепежа стоит использовать нелинейные 2D пружинные элементы, причем для одной точки сопряжения стоит вводить три взаимно перпендикулярные пружины, имеющие различные жесткости: две пружины в направлении среза метиза и пружина вдоль метиза, имитирующая растяжение. Жесткости пружин в продольном и поперечном направлениях определяются по результатам экспериментального исследования крепежа. Также для пружинных элементов необходимо ввести предельные усилия, расчетные значения которых даны в нормативных документах [6] и предельные величины деформаций от сдвига и растяжения.

Граничные условия для модели стеновой панели следующие: первый кассетный профиль прикрепляется к цоколю с помощью болтов через дополнительный уплотняющий элемент, который также необходимо замоделировать объемными конечными элементами. Цоколь является неподвижной опорой, а его сопряжение с панелью задается через узловые опоры в местах крепежных болтов. Несущие конструкции также задаются как неподвижная опора, а крепление кассетного профиля к ним – посредством точечных пружинных связей со своими жесткостями в местах установки саморезов. Конструкцию обшивки в расчетной модели прикрепляем к отгибам кассетного профиля точечными пружинными связями со своими жесткостями в местах расположения крепежа. Аналогично моделируем точечное пружинное сопряжение кассетных профилей друг с другом. Дополнительно необходимо предусмотреть жесткий контакт с тангенциальным коэффициентом трения конструкций стеновой панели, т.е. не допустить проникновение кассетного профиля в несущие конструкции, в цоколь и в соседние кассетные профили.

Таким образом, аналитическая модель, созданная по данным рекомендациям, будет максимально отражать реальное поведение сэндвич-панели поэлементной сборки.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S. Esmaili Niari, B. Rafezy, K. Abedi. Numerical Study On The Shear Resistance Of Coldformed Steel Shear Wall With Steel Sheathing // Asian Journal Of Civil Engineering (Bhrc) Vol. 14, NO. 3 (2013) p. 461-476.
2. Данилов М.Н., Федорова Н.Н. Конечно-элементное моделирование многослойных ограждающих конструкций // Изв. вузов. Строительство. 2012, №10. с. 92-100.
3. Xianghe Dai, Structural Behaviour of Cold-formed Steel Cassette Wall Panels Subject to In-plane Shear Load // Journal of Civil Engineering Research 2013, 3(2):p. 65-74.
4. Xianghe Dai, Numerical Modelling and Analysis of Structural Behaviour of Wall-stud Cold-formed Steel Shear Wall Panels under In-plane Monotonic Loads // Journal of Civil Engineering Research 2012, 2(5): p. 31-41.
5. Atrek, E. and Nilson, A.H. (1980). "Nonlinear Analysis on Cold-formed Steel Shear Diaphragms", Journal of The Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST3, March, 1980.
6. ТКП EN 1993-1-3-2009 Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов.