

## **ОЦЕНКА УСАДОЧНЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕНОПЛАСТЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

**В.И.Никитин**

**Строительный факультет БПИ**

**Брест, Беларусь**

С помощью вычислительного эксперимента выполнен анализ напряжений, возникающих в пенопласте слоистых панелей при их изготовлении и эксплуатации от усадочных и температурных воздействий. Приведены инженерные формулы для оценки максимальных (минимальных) нормальных и касательных напряжений.

Для слоистых панелей, особенно с гофрированными обшивками, поперечные усадочные и температурные напряжения, формирующиеся в пенопласте на технологической стадии, и теоретически, и экспериментально изучены еще недостаточно. Отсутствие необходимой информации ограничивает возможности выработки обоснованных технологических решений, направленных на улучшение качества изготавливаемых изделий.

Необходимая информация собиралась путем вычислительного эксперимента на ЭВМ по программе, реализующей метод конечных элементов и позволяющей решать широкий круг задач. В вычислительном эксперименте принято, что в плоскости поперечного сечения панели напряжения отсутствуют (плоская задача), материалы панели линейно упруги, между обшивками и пенопластом обеспечиваются надежные адгезионные связи. Как свидетельствуют результаты испытаний образцов, адгезионная прочность соединений может превышать прочность пенопластов /1/ и принятое допущение вполне приемлемо. При изучении влияния технологической усадки пенопласта ее монотонное нарастание во времени, сопровождающееся механической релаксацией, не учитывалось и в расчеты закладывалась максимальная величина, достигаемая после завершения процесса отверждения материала. Это, ес-

тественно, приводило к получению верхних оценок напряжений в пенопласте.

Вначале выбиралась минимальная ширина панели, необходимая и достаточная для получения представления о напряженном состоянии пенопласта, возникающем в поперечном направлении от технологической усадки. Для этого в вычислительном эксперименте были сопоставлены двухслойные панели шириной равной длине одной и трех волн гофров.

Профилированная обшивка толщиной 1 мм имела прямоугольные гофры высотой 50 и шириной 125 мм, выполненные без сопряжения прямолинейных участков. Материал обшивок (сталь) наделялся следующими физико-механическими свойствами: модуль упругости  $E_{ст} = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, модуль сдвига  $G_{ст} = 8,1 \cdot 10^4$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Высота слоя пенопласта в тонкой части панели составляла 100 мм. Следует отметить, что рассматриваемый профиль обшивки дает завышенные оценки напряжений в пенопласте у источников их концентрации по сравнению с обычно используемыми трапециевидными гофрами, у которых прямолинейные участки сопрягаются по плавным кривым. С точки зрения решаемой задачи главные напряжения  $\sigma_1$  можно учитывать в качестве основных, так как даже при испытаниях на сдвиг в подавляющем большинстве случаев они являются причиной разрушения образцов пенопластов /2/.

Установлено, что повторяющиеся участки профиля панелей имеют одинаковое напряженное состояние. Аналогичные выводы получены при изучении температурных напряжений в слоистых панелях поляризационно-оптическим методом /3/. Поэтому при последующем численном экспериментировании, в основном, рассматривались симметричные расчетные схемы панелей, имеющие ширину равную длине одной волны гофров. Отношение длин толстой и тонкой частей панели принималось постоянным и равным единице, так как его уменьшение или увеличение в реальном диапазоне практически не отражалось на величине напряжений у источников их концентрации /3/.

При изучении усадочных напряжений с помощью вычислительного эксперимента варьировали не только величину технологической усадки пенопласта  $\epsilon$ , но и значения его упругих характеристик ( $E$ ,  $G$ ,  $\mu$ ), толщину обшивок  $\delta$  и их число (одна или две), относительную высоту гофров и положение оси симметрии панели. Выяснилось, что варьирование коэффициента Пуассона  $\mu$  для пенопласта в реальном диапазоне изменения оказывает пренебрежимо малое

влияние на напряженно-деформированное состояние панелей. Это позволило в дальнейших расчетах зафиксировать его значение на уровне  $\mu=0,4$ .

Изменение внутренних напряжений в любой точке пенопласта прямо пропорционально изменению его технологической усадки. Следовательно, характер картины изолиний напряжений не зависит от варьирования величины  $\epsilon$ . Характер картины поля напряжений практически не меняется и при варьировании значениями модулей  $E$  и  $G$ . Увеличение или уменьшение величины  $E$  и  $G$  вызывает отклонения значений напряжений того же направления. Однако  $E$  влияет сильнее  $G$ .

Варьирование толщины металлических (сталь, алюминий) обшивок  $\delta$  в реальном диапазоне не вносит заметного изменения в напряженно-деформированное состояние пенопласта, так как его погонная жесткость при растяжении (сжатии) более чем в сто раз меньше таковой для обшивок. На этом основании в последующем вычислительном эксперименте рассматривались только стальные обшивки толщиной 1 мм.

Введение верхней плоской обшивки при достаточном слое пенопласта (в реальных изделиях вполне достаточно) практически не приводит к росту напряжений у источников их концентрации (углы обшивок), так как по мере удаления от этих источников напряжения быстро затухают. Для рассмотренных панелей уменьшение высоты гофров в два раза не дает существенного снижения значений напряжений в слоях пенопласта, примыкающих к нижней гофрированной обшивке. Только замена гофрированных обшивок на плоские устраняет опасные источники концентрации напряжений и ведет к заметному уменьшению их значений (величина максимальных нормальных напряжений  $\sigma_1$  снижается на четверть и более, а максимальных касательных напряжений  $\tau_m$  почти в двое). Это свидетельствует о том, что картина напряженного состояния пенопласта при наличии гофрированных обшивок в продольном направлении более благоприятна, чем в поперечном. Если ось симметрии площади поперечного сечения оказывается в тонкой части панели, то в наших примерах ее боковые части оканчиваются уширением. В этом случае напряжения  $\sigma_1$  у источника концентрации в боковой части панели заметно уменьшаются. На основе опытных данных авторы работы /3/ пришли к такому же выводу, предлагая для смягчения краевой концентрации напряжений изготавливать панели так, чтобы их боковые свободные части кончались уширением.

На основании анализа данных, полученных с помощью вычислительного эксперимента, для определения значений усадочных напряжений по главным

площадкам в слоях пенопласта, примыкающих к углам обшивок, можно предложить аппроксимирующую формулу вида мультипликативной группы

$$\sigma_i = \sigma_i^0 k_\varepsilon k_E k_G, \quad (1)$$

где  $\sigma_i^0$  – значение базового напряжения в опасной точке, установленное по изолиниям соответствующих напряжений;  $k_\varepsilon$ ,  $k_E$ ,  $k_G$  – коэффициенты, учитывающие отклонения заданных значений усадки  $\varepsilon$ , модуля упругости  $E$  и модуля сдвига  $G$  рассматриваемого пенопласта от соответствующих значений для базового случая ( $\varepsilon^0$ ,  $E^0$ ,  $G^0$ ).

В качестве базового случая приняты изолинии усадочных напряжений возникающих в пенопласте трехслойной панели с верхней плоской обшивкой. Наличие такого случая позволяет находить оценки опасных напряжений в пенопласте слоистых панелей не только с гофрированными, но и с плоскими обшивками. На рис. 1 приведены изолинии главных напряжений  $\sigma_1^0$  для пенопласта, имеющего  $E^0 = 10$  МПа,  $G^0 = 4,8$  МПа,  $\mu = 0,4$  и  $\varepsilon^0 = 1,5\%$ . Размеры профилированной обшивки совпадают с теми, которые указаны выше.

В соответствии с формулой (1) и данными вычислительного эксперимента в реальной области факторного пространства у источников концентрации значения максимальных нормальных напряжений в пенопласте могут быть найдены из выражения

$$\sigma_1 = \sigma_1^0 \left( \varepsilon / \varepsilon^0 \right) \left( E / E^0 \right) \left[ 1,1 - 0,1 \left( E / E^0 \right) \right] \left[ 0,9 + 0,1 \left( G / G^0 \right) \right], \quad (2)$$

где  $\sigma_1^0$  – значение базового напряжения для опасной точки, выбираемое по изолиниям (рис. 1).

Аналогичное выражение предлагается и для определения значений минимальных нормальных напряжений в пенопласте около углов гофрированной обшивки

$$\sigma_2 = \sigma_2^0 \left( \varepsilon / \varepsilon^0 \right) \left( E / E^0 \right) \left[ 1,1 - 0,1 \left( E / E^0 \right) \right] \left[ 0,9 + 0,1 \left( G / G^0 \right) \right], \quad (3)$$

где  $\sigma_2^0$  – значение базового напряжения, принимаемое по изолиниям.

Для разномодульного пенопласта в формулы (2) и (3) значение модуля упругости  $E$  подставляются с учетом знака напряжения  $\sigma_i^0$  ( $i = 1, 2$ ). При положительном знаке  $\sigma_i^0$  используется значение модуля упругости  $E$  при растяжении, а при отрицательном знаке  $\sigma_i^0$  берется величина  $E$  при сжатии. Поиск верхних

енки значений максимальных касательных напряжений  $\tau_m$  в опасной точке может быть выполнен двумя путями. Если имеются базовые изолинии для  $\tau_m^0$ ,

$$\tau_m = \tau_m^0 \left( \varepsilon / \varepsilon^0 \right) \left( E / E^0 \right) \left[ 1,2 - 0,2 \left( E / E^0 \right) \right] \left[ 0,8 + 0,2 \left( G / G^0 \right) \right], \quad (4)$$

где  $\tau_m^0$  – значение базового напряжения в опасной точке, устанавливаемое по изолиниям; значение  $E$  для разномодульного пенопласта находится как сумма модулей упругости при сжатии  $E_{сж}$  и растяжении  $E_p$ .

Можно обойтись и без изолиний для  $\tau_m^0$ , так как при плоском напряженном состоянии для любой точки

$$\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2. \quad (5)$$

Исходя из (5), с помощью изолиний для  $\sigma_1^0$  и  $\sigma_2^0$  устанавливается положение опасной точки и для нее по (2) и (3) определяют  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , которые затем подставляются в (5).

Приведенные результаты вычислительного эксперимента пригодны и для оценки температурных напряжений, возникающих в пенопласте из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов панели при ее охлаждении или нагревании. При охлаждении панели формулами (2), (3) и (4) следует пользоваться тогда, когда температурный коэффициент линейного расширения пенопласта превышает таковой материала обшивки. Если соотношение между этими коэффициентами противоположное, то формулы позволяют оценить последствия нагревания.

### Литература

- Чистяков А.М. Легкие многослойные ограждающие конструкции. – М.: Стройиздат, 1987. – 240 с.
- Козлов К.В. Оценка прочности пенопласта при сдвиге. Расчет конструкций с применением пластмасс. // Тр. ин-та / ЦНИИСК им. Кучеренко. – 1974. – С.36–39.
- Чаплинский И.А., Албаут Г.Н., Кон Ен Хва. Температурные напряжения в слоистых панелях с гофрированными обшивками трапециевидного профиля // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1979. – №6. – С.39–45.