

УДК 629.331+62-03+62-758.1

ОПОРНЫЙ ПРОФИЛЬ ДЛЯ ТРЁХСЛОЙНОЙ ПАНЕЛИ С РЕБРИСТЫМ СРЕДНИМ СЛОЕМ

О. В. Воронков, к. т. н. / В. И. Песков, к. т. н., проф.

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Одной из современных тенденций в автобусостроении является использование несущих трёхслойных панелей в конструкциях кузовов. В частности, это касается основания автобусного кузова типа «монокок» [1, 2], схематизация нагруженного состояния которого приведена в [3]. Важными проблемами при использовании несущих трёхслойных панелей являются: 1) восприятие трёхслойной панелью сосредоточенных усилий, например нагрузок от кронштейнов сидений при эксплуатации и возможных аварийных ситуациях (рис. 1а); 2) соединение трёхслойных панелей друг с другом и с соседними несущими конструкциями кузова (рис. 1а и 1б).

Наиболее просто указанные проблемы решаются путём введения в конструкцию трёхслойной панели дополнительных силовых элементов, способных воспринимать сосредоточенные нагрузки и перераспределять их на тонкостенные силовые элементы присоединённых трёхслойных панелей.

На рис. 1 показано сечение трёхслойной панели основания автобуса поперечной плоскостью. В качестве обстановки показано двойное пассажирское сиденье, с одной стороны закреплённое в боковину

(для упрощения боковина условно обозначена в виде заделки), а с другой — в панель основания (f — погонное усилие от кронштейнов сидений на панель основания при эксплуатации [3]). Сама панель основания состоит из центральной и боковых частей, отличающихся параметрами обшивок и среднего слоя в виде рёбер. Соединение частей панели происходит по линии установки кронштейнов сидений. Сечения среднего слоя на ширине двух шагов рёбер показаны на рис. 1а и 1б синими линиями. На рис. 1а в сечении панели имеется балочный силовой элемент, предназначенный для соединения частей панели и для крепления в него винтами кронштейнов сидений. На рис. 1б в сечении панели имеется силовой элемент, предназначенный для её крепления к боковине. В обоих случаях основная задача указанных дополнительных силовых элементов — это восприятие и перераспределение усилий между тонкостенными конструктивными элементами трёхслойных панелей. Соединение между дополнительными силовыми элементами и рёбрами среднего слоя осуществляется чаще всего при помощи клея. В приведённой на рис. 1 конфигурации такое клеевое соединение

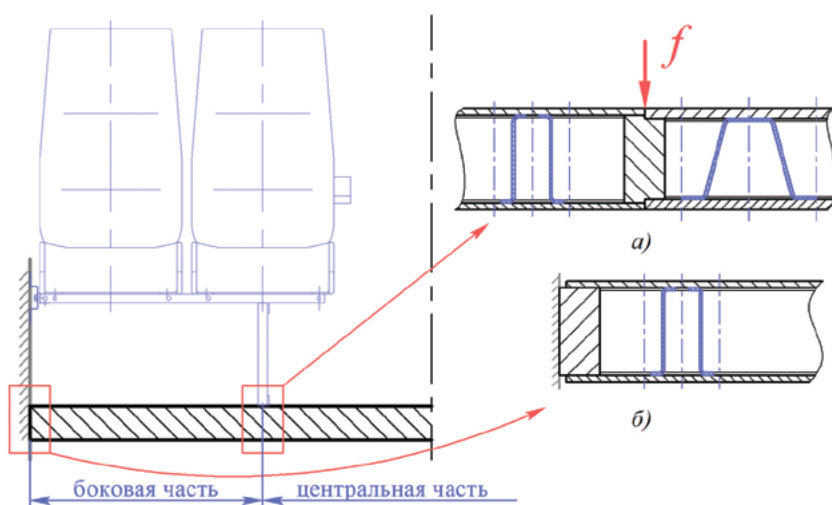


Рисунок 1. Элементы конструкции трёхслойной панели основания автобуса: а — соединение боковой и центральной частей; б — соединение с боковиной

является ответственным и сильно нагруженным, его качественное выполнение в условиях автобусного производства представляет значительную технологическую сложность, а также требует использования специальных дорогостоящих клеев. Таким образом, проблема соединения рёбер среднего слоя панели с дополнительными силовыми элементами является важной и актуальной.

В данной работе предлагается разгрузить клеевое соединение между рёбрами среднего слоя панели и дополнительным силовым элементом путём придания ему такого профиля в месте контакта, на котором рёбра прижимались бы к силовому элементу и соединение не испытывало бы сдвигающей нагрузки (рис. 2 и 3). Профиль, обладающий перечисленными свойствами, далее будем называть опорным профилем.

На рис. 2 приведены системы координат, связанные с трёхслойной панелью, в которых будут проводиться все последующие вычисления. Плоскость zOx — нейтральная плоскость панели; xOy — плоскость присоединения трёхслойной панели к боковине; zOw — плоскость ребра. На рис. 2 обозначено: t — шаг рёбер среднего слоя; h_3 — высота среднего слоя; α — угол наклона рёбер. Для координат y и w будет справедливым следующее соотношение:

$$y = w \cdot \sin(\alpha). \quad (1)$$

На рис. 3 сплошной чёрной линией обозначен опорный профиль в плоскости zOw (рис. 2), A — произвольная точка на данном профиле. Напряжённое состояние ребра среднего слоя в данной точке отображено на рис. 3 при помощи элементарных прямоугольников. Стороны первого из них параллельны координатным осям. По сторонам данного прямоугольника действуют нормальные напряжения σ и касательные напряжения τ , возникающие при поперечном изгибе трёхслойной панели. Стороны второго прямоугольника наклонены к координатным осям на угол γ , который соответствует углу наклона касательной к опорному профилю в рассматриваемой точке. В соответствии с предложенным определением опорного профиля вдоль сторон указанного прямоугольника не должны действовать касательные напряжения, следовательно, их положение совпадает с положением главных площадок напряжённого состояния материала в точке A . Чтобы ребро среднего слоя прижималось к опорному профилю, необходимо обеспечить действие растягивающего главного напряжения σ_1 по касательной, а сжимающего главного напряжения σ_3 — по нормали к опорному профилю.

Зависимости внутренних погонных силовых факторов, действующих в трёхслойной панели ос-

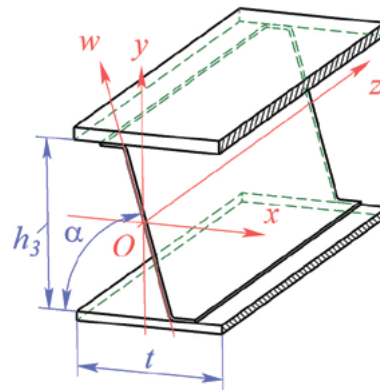


Рисунок 2.
Системы координат

нования автобуса при её поперечном изгибе, от координаты z (рис. 2) определяются следующими выражениями [3]:

• вариант А:

$$- 0 \leq z < x:$$

$$Q_y = f + q \cdot b / 2; M_x = (f + q \cdot b / 2) z - (f \cdot x + q \cdot L \cdot b / 4 - q \cdot b^2 / 8) \cdot k_M \cdot k_p; \quad (2)$$

$$- x < z < L / 2; z_1 = z - x; 0 < z_1 < b;$$

$$Q_y = q(b/2 - z_1); M_x = f \cdot x \cdot k_M + q \cdot b(x \cdot k_M - b/4 \cdot k_M \cdot k_p) / 2 + q \cdot b \cdot z_1 / 2 - q \cdot z_1^2 / 2; \quad (3)$$

• вариант Б:

$$0 \leq z \leq L / 2; Q_y = q(L / 2 - z); M_x = q(L \cdot z - z)^2 / 2 - k_M \cdot k_p \cdot q \cdot L^2 / 8, \quad (4)$$

где Q_y , M_x — погонные поперечная сила и изгибающий момент соответственно; f — распределённое по длине усилие под кронштейнами сиденья; q — распределённое по площади усилие от веса стоящих в проходе пассажиров; L — размер пролёта между боковинами; x — расстояние от боковины до кронштейна сиденья; $b = L / 2 - x$; k_p — коэффициент разгрузки [2]; $k_M = 1 / (1 + k_p)$ [2].

Вариант А соответствует части пассажирского салона, где установлены сиденья (рис. 1); вариант Б соответствует накопительной площадке для стоящих пассажиров. Зависимости для варианта Б нагруженного состояния трёхслойной панели могут быть распространены и на панель крыши автобуса [2] вместимостью менее 23 пассажиров. Координата z рассматривается в интервале $[0; L / 2]$, так как подразумевается симметричная расчётная схема.

Зависимости напряжений, возникающих в рёбрах среднего слоя при изгибе трёхслойной панели на пролёте между боковинами, от координат z и y (рис. 2) определяются следующими выражениями [2]:

$$\sigma(z, y) = \sigma_{(31)} \cdot (E_3 / E_3^*) \cdot (y / (h_1 - e_1)); \quad (5)$$

$$\sigma_{(31)} = \sigma_{(1)} \cdot (E_3^* / E_1^*) \cdot ((h_1 - e_1) / h_1) \quad (6)$$

$$\sigma_{(1)} = -M_x / k_{\sigma 1} \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в (5), получаем:

$$\sigma(z, y) = -(M_x / k_{\sigma 1})(E_3 / E_1^*)(y / h_1), \quad (8)$$

где $\sigma_{(1)}$ — нормальные напряжения в верхней обшивке; $\sigma_{(3)}$ — нормальные напряжения в полке ребра, примыкающего к верхней обшивке; $k_{\sigma 1}$ — коэффициент нормального напряжения верхней обшивки (упруго-геометрическая характеристика сечения панели); h_1 — расстояние от нейтральной плоскости панели до срединной плоскости верхней обшивки; e_1 — расстояние между срединными плоскостями верхней обшивки и примыкающего к ней фланца ребра среднего слоя; E — модуль упругости I рода материала, при нём нижний индекс 1 означает принадлежность верхней обшивке, 3 — среднему слою, верхний индекс * означает приведённую характеристику.

Используя выражение (1), легко получить:

$$\sigma(z, w) = -(M_x / k_{\sigma 1})(E_3 / E_1^*)(w \cdot \sin(\alpha) / h_1); \quad (9)$$

$$\tau(z, w) = (Q_y \cdot t) \cdot (s_3 \cdot h_3), \quad (10)$$

где s_3 — толщина ребра среднего слоя.

Материал ребра среднего слоя находится в плоском напряжённом состоянии, для которого справедливы следующие соотношения [4]:

$$\operatorname{tg}(2 \cdot \varphi) = -2\tau / \sigma \quad (11)$$

$$\gamma = \varphi - \pi / 2, \operatorname{tg}(\varphi) = \dot{w}_z, \quad (12)$$

где \dot{w}_z (далее — \dot{w}_z) — производная от w по z для линии опорного профиля.

На нейтральной плоскости (то есть при $y = w = 0$) $\gamma = -45^\circ$ или $\dot{w}_z = 1$, так как нормальные напряжения в рёбрах среднего слоя в точках, лежащих на указанной плоскости, отсутствуют.

С учётом известного тригонометрического соотношения

$$\operatorname{tg}(2 \cdot \varphi) = 2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi) / (1 - \operatorname{tg}^2(\varphi)) \quad (13)$$

подставляя в него (12), получаем:

$$2 \cdot \dot{w}_z = -(2 \cdot \tau / \sigma) (1 - \dot{w}_z^2) \rightarrow \dot{w}_z^2 - (\sigma / \tau) \cdot \dot{w}_z - 1 = 0 \quad (14)$$

Квадратное уравнение относительно tg (14) имеет следующие корни: $\dot{w}_z = \sigma / 2\tau \pm \sqrt{(\sigma / 2\tau)^2 + 1}$ (15), где σ и τ определяются соотношениями (9) и (10) соответственно.

Два корня уравнения (14) определяют две взаимно перпендикулярные площадки, совпадающие с глав-

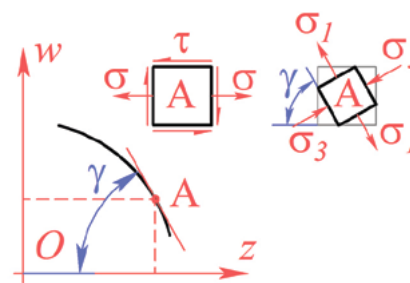


Рисунок 3. Напряжённое состояние в точке на опорном профиле

ными площадками плоского напряжённого состояния в данной точке. Выбор корня, определяющего искомое направление вдоль растягивающих главных напряжений σ_1 , зависит от правила знаков для напряжений. Если положительными считаются растягивающие нормальные напряжения и касательные напряжения, направленные, как показано на рис. 3, то необходимо выбрать корень со знаком плюс.

Выражение (15) является основным дифференциальным уравнением опорного профиля. Данное уравнение имеет вид $\dot{w} = f(z, w)$, то есть представляет собой задачу Коши, которая интегрируется численно классическим методом Рунге — Кутты [5]:

$$w_{i+1} = w_i + \delta_z \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6; \quad (16)$$

$$k_1 = f(z_i, w_i); \quad (17)$$

$$k_2 = f(z_i + \delta_z / 2, w_i + k_1 \cdot \delta_z / 2); \quad (18)$$

$$k_3 = f(z_i + \delta_z / 2, w_i + k_2 \cdot \delta_z / 2); \quad (19)$$

$$k_4 = f(z_i + \delta_z, w_i + k_3 \cdot \delta_z), \quad (20)$$

где δ_z — приращение независимой переменной z ;

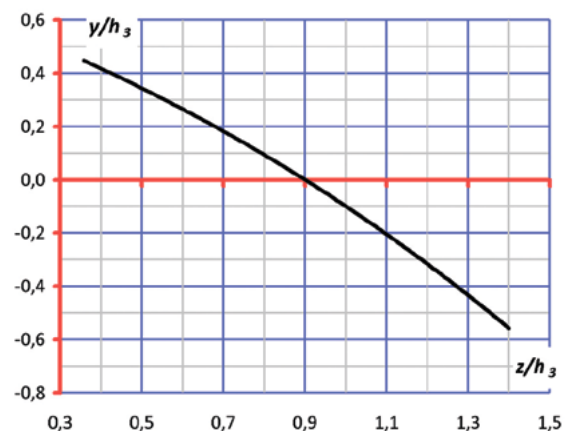


Рисунок 4. Опорный профиль

Таблица 1. Параметры панели крыши

k_p	q	L	s_1	s_2	s_3	h_3	α	z_0	w_0
—	кПа	мм	мм	мм	мм	мм	град.	мм	мм
0,8	8,42*	1 837	5,0	4,0	1,2	70	75	25	32,5**

* Обоснование величины приведено в [2].

** По формуле (21).

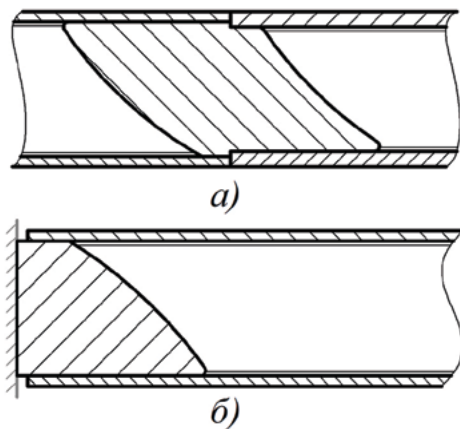


Рисунок 5. Очертания сечений дополнительных силовых элементов с опорным профилем: а — соединение боковой и центральной частей; б — соединение с боковиной

индексы i и $(i + 1)$ означают принадлежность i -му и $(i + 1)$ -му шагам интегрирования соответственно.

Расположение опорного профиля удобно характеризовать координатой z_0 , при которой он примыкает к 1) верхней или 2) нижней обшивке, тогда граничное условие численного интегрирования можно записать следующим образом:

$$1) w_0 = f(z_0) = (h_1 - s_1 / 2) / \sin(\alpha); \quad (21)$$

$$2) w_0 = f(z_0) = -(h_2 - s_2 / 2) / \sin(\alpha), \quad (22)$$

где h_2 — расстояние от нейтральной плоскости панели до срединной плоскости нижней обшивки; s_1 и s_2 — толщина верхней и нижней обшивки соответственно.

Выражение (21) соответствует началу интегрирования от точки примыкания профиля к верхней обшивке, выражение (22) — к нижней обшивке.

Рассмотрим пример решения задачи построения опорного профиля для дополнительного силового элемента крепления панели крыши к боковине. Основные исходные данные задачи приведены в табл. 1.

Материалы основных конструктивных элементов рассматриваемой панели: обшивки — ФКМ; средний слой — стеклопластик ручной формовки с хаотично ориентированными волокнами на основе ЭД-20. Материал и конструкция дополнительного силового элемента, для которого производится определение опорного профиля, в рамках данной статьи не рассматриваются.

Форма опорного профиля, полученная в результате численного интегрирования дифференциального уравнения (15), для панели крыши с приведёнными в табл. 1 параметрами показана в виде графика на рис. 4. На рис. 5 приведены примерные очертания

поперечных сечений дополнительных силовых элементов, к которым примыкание рёбер среднего слоя осуществляется по опорным профилям.

Таким образом, решена задача существенного снижения нагруженности клеевого соединения рёбер среднего слоя с дополнительными силовыми элементами в несущих трёхслойных панелях основания или крыши автобуса. При использовании опорных профилей и близком соответствии реальной нагрузки принятому схематизированному описанию сдвигающие напряжения в клеевом слое не возникают, соединение испытывает сжатие, что на практике не представляет для него существенной опасности. Следовательно, прочность клеевого соединения гарантируется. Однако при отличии реальной нагрузки от схематизированной (например, при несимметричности реальной нагрузки) сдвигающие напряжения в клеевом шве на опорном профиле всё-таки возникнут, но их величина будет меньше, чем в случае отсутствия специального опорного профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Каркас кузова автобуса типа «монокок»: пат. 167299. — № 2016101039/11; автор и патентообладатель — О. В. Воронков; заявл. 14.01.2016; опубл. 27.12.2016, Бюл. № 36. — 2 с.
2. Воронков О. В. Совершенствование весовых, жёсткостных и прочностных показателей автобусных кузовов путём использования свойств конструкций типа «монокок»: дис. ... канд. техн. наук. — Нижний Новгород: НГТУ, 2014.
3. Воронков О. В. Схематизация нагруженного состояния трёхслойной панели основания несущего кузова автобуса / О. В. Воронков, В. И. Песков // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. — 2016. — № 1 (112). — С. 165–170.
4. Биргер И. А. Сопротивление материалов: учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. — М.: Наука, 1986. — 560 с.
5. Бахвалов Н. С. Численные методы: учебное пособие / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. — 3-е изд., доп. и перераб. — М.: БИНОМ, 2004. — 636 с.