

УДК 629.113.5

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ СОВРЕМЕННОГО АВТОБУСНОГО КУЗОВА

О.В. Воронков, к.т.н. / ООО «Саровский инженерный центр»

В.И. Песков / НГТУ им. Р.Е. Алексеева

1. ПОНЯТИЕ ЭКП И ЕЕ СВОЙСТВА

Элементарная конструктивная плоскость (ЭКП) — структурная единица кузова, с прочностной точки зрения имеющая вид «тонкой» пластины или пологой оболочки. При нагружении ЭКП растяжением (сжатием), сдвигом или изгибом в ее условной плоскости отдельные конструктивные элементы ЭКП работают в условиях простых деформаций растяжения (сжатия) или сдвига. ЭКП имеет высокую жесткость в случае приложения к ней нагрузок в ее условной плоскости и низкую жесткость при приложении к ней нагрузок, перпендикулярных ее поверхности.

На рис. 1 приведен пример двух практически идентичных секций боковины автобуса. Отличие между ними заключается в том, что на рис. 1а изображена секция боковины с вклеенными в нее стеклами, а на рис. 1б — без стекол или со стеклами, установленными на податливый резиновый уплотнитель. При этом секция боковины (а) является ЭКП, т.к. при нагружении сдвиговой нагрузкой все входящие в нее конструктивные элементы находятся в условиях простых деформаций растяжения (сжатия) или сдвига,

которые достаточно равномерно распределены по конструктивным элементам. Секция боковины (б) не является ЭКП, т.к. при воздействии на нее нагрузки стойки подвержены изгибу на пролете оконных проемов, причем этот изгиб определяет большую часть деформаций секции. Практика показывает, что секция, являющаяся ЭКП, будет на порядок жестче.

Для большинства плоских расчетных схем можно применять следующий критерий для определения, является конструкция ЭКП или нет: если в узлах каркасной части конструкции установить шарниры, то ЭКП останется геометрически неизменяемой, а не ЭКП превратится в шарнирный механизм. Это условие не является достаточным. На рис. 2 изображен пример двух идентичных секций боковины автобуса, являющихся ЭКП. На рис. 2а ЭКП нагружена усилиями в ее условной плоскости. При этом деформации относительно малы, ЭКП находится в рациональных условиях прочностной работы. На рис. 2б ЭКП нагружена усилиями, перпендикулярными к ее поверхности. При этом деформации велики, ЭКП

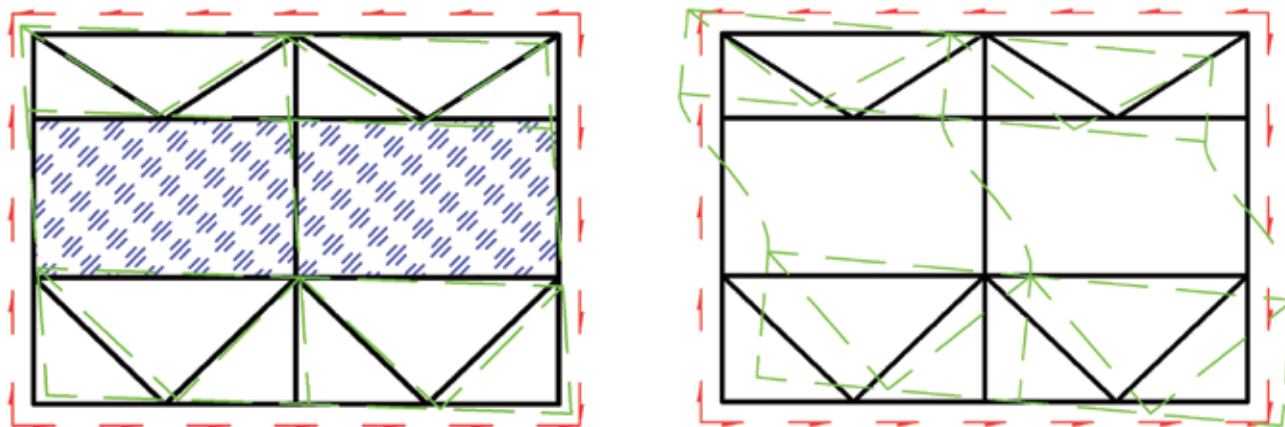


Рисунок 1. Понятие ЭКП: а) пример ЭКП; б) пример не ЭКП

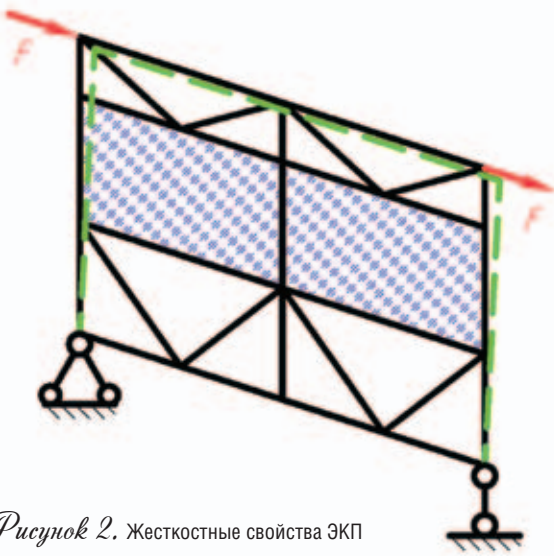


Рисунок 2. Жесткостные свойства ЭКП

не находится в рациональных условиях прочностной работы, ряд ее конструктивных элементов подвержен изгибу. Сказанное можно перефразировать следующим образом: при нагружении ЭКП в ее условной плоскости, она способна при относительно небольших деформациях создать значительные усилия сопротивления; при нагружении ЭКП в направлении, перпендикулярном ее поверхности, она не способна создать значительных усилий сопротивления при небольших деформациях. Это положение важно с позиций совместной работы нескольких ЭКП в кузове автобуса (назовем его положением о совместной работе ЭКП). ЭКП находится в рациональных условиях прочностной работы, если она не подвержена действию нагрузок, вызывающих ее деформирование в направлении, перпендикулярном ее поверхности.

Следует также иметь в виду, что структурная единица может являться ЭКП при малых нагрузках, действующих в ее условной плоскости, и не являться таковой при больших. Это объясняется возможностью релаксации оболочек, входящих в состав структурной единицы, за счет их поперечной деформации при нагружении в условной плоскости ЭКП, т.е. за счет ограниченной потери устойчивости оболочек, когда большая часть нагрузки перераспределяется на балки каркаса, вызывая их изгиб. Назовем этот эффект разрушением ЭКП.

Согласно исследованию авторов [2], потеря устойчивости идеальных плоских кузовных обшивок при реальных размерах пролетов между подкрепляющими элементами и реальных толщинах обшивок может происходить при достаточно низких значениях действующих сдвигающих напряжений (~5 МПа). В реальности обшивки могут иметь локальные несовершенства (волнистости), которые

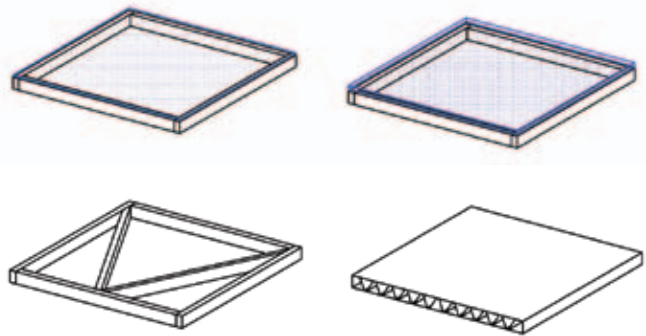
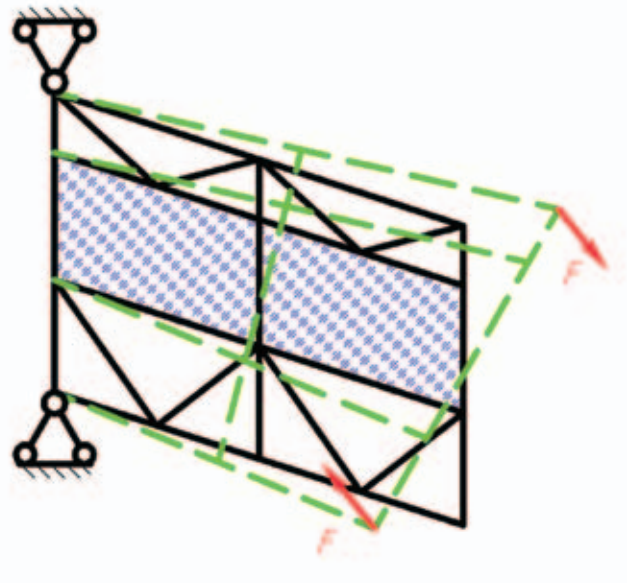


Рисунок 3. Надежные и ненадежные ЭКП

существенно снижают критические напряжения потери устойчивости. Фактором, снижающим сопротивляемость поперечным деформациям, служит присущая большинству кузовных конструкций особенность крепления обшивки к подкрепляющим элементам с одной боковой стороны, т.е. эксцентрично, что при воздействии нагрузки приводит к появлению момента, скручивающего подкрепляющие элементы и, как результат, деформирующего обшивку в поперечной плоскости. При нагружении, например, прямоугольной обшивки сдвигающими усилиями, одна ее диагональ воспринимает сжатие, другая — растяжение. В первую очередь указанные выше факторы относятся к потере жесткости сжатой диагонали обшивки, однако, скручивание подкрепляющих элементов и отличие формы обшивки от плоской могут привести к релаксации растянутой диагонали.

Таким образом, все ЭКП можно разделить на два типа: надежные и ненадежные. Надежные ЭКП — это такие, которые во всем рассматриваемом диапазоне нагрузок не подвержены эффекту разрушения

ЭКП. На рис. 3а изображена секция кузова автобуса, представляющая собой рамку из стержневых элементов, к которым прикреплена (наклеена, приварена, приклепана) тонкостенная обшивка (лист стали, алюминия, стеклопластика); на рис. 3б изображена аналогичная варианту (а) секция с толстостенной обшивкой (стекло, бакелитизированная фанера); на рис. 3в изображена секция в виде стержневой фермы; на рис. 3г изображена сэндвич-панель.

В практике проектирования автобусных кузовов варианты (б), (в) и (г) могут считаться надежными ЭКП, вариант (а) в ряде случаев может быть подвержен эффекту разрушения ЭКП, т.е. может считаться ненадежным.

2. ПОНЯТИЕ АВТОБУСНОГО КУЗОВА ТИПА «МОНОКОК» И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

Для простоты описания схематизируем структуру кузова автобуса геометрически в виде бруска, а механически — в виде набора основных структурных единиц. На первом этапе при анализе по методу ЭКП кузов автобуса обычно разбивают на следующие структурные единицы: основание, крыша, левая и правая боковины, передняя и задняя стенки. Количество структурных единиц, на которые схематично разделяется автобусный кузов при анализе, определяется желаемой подробностью данного анализа и точностью результатов. Далее определяют — являются выделенные структурные единицы ЭКП или нет.

Кузов-монокок — кузов, представляющий собой замкнутую систему ЭКП. Замкнутая система ЭКП — система ЭКП, в которой при воздействии на нее скручивающей нагрузки все отдельные ЭКП находятся в рациональных условиях прочностной работы. На режиме кручения кузова-монокока взаимодействие между его отдельными ЭКП может быть представлено в виде равномерно распределенной по их линиям контакта касательной нагрузки, что с достаточной точностью отражает действительное положение, если не углубляться во внутреннюю механику прочностной работы каждой отдельной ЭКП. Направление усилий взаимодействия между отдельными ЭКП определяется при рассмотрении равновесия каждого структурного элемента. При этом все основные структурные единицы кузова нагружены сдвиговой нагрузкой в своей условной плоскости.

В случае кручения незамкнутого кузова автобуса (у которого, например, лобовое стекло установлено на уплотнитель и передняя стенка не является ЭКП), передняя стенка не может воспринимать сдвигающую нагрузку также эффективно, как это делают другие структурные элементы, поэтому принци-

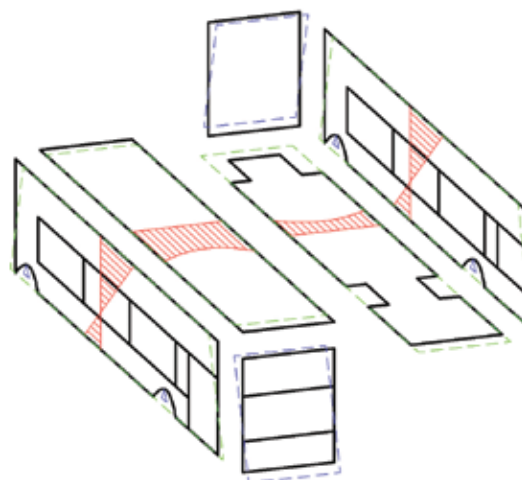


Рисунок 4. Изгиб кузова, состоящего из ЭКП

ально меняется механика прочностной работы всего кузова. В таком случае взаимодействие между структурными элементами, подобное тому, что было в замкнутом кузове, уже невозможно. Соппротивление внешней скручивающей нагрузке в незамкнутом кузове осуществляется за счет скручивания отдельных его структурных элементов, в данном случае за счет скручивания основания, крыши и боковин. Силовые элементы передней стенки претерпевают существенную изгибную деформацию. Задняя стенка, являясь ЭКП, поворачивается, не испытывая существенных деформаций. Все ЭКП незамкнутого кузова при нагружении его скручивающим моментом не находятся в рациональных условиях прочностной работы.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: при нагружении кузова автобуса скручивающим моментом, если хотя бы одна грань условного параллелепипеда, образующего кузов, не является ЭКП, то все грани данного параллелепипеда не находятся в рациональных условиях прочностной работы, что следует из положения о совместной работе ЭКП.

При нагружении безлонжеронного кузова изгибом на длине базы конструктивные требования, необходимые для обеспечения правильной механики его работы, несколько мягче, чем для скручивания. Главную роль при продольном изгибе кузова играют боковины. Передняя и задняя стенки в данном случае практически не участвуют в процессе восприятия нагрузки. Степень вовлеченности основания и крыши в работу изгиба кузова зависит от способности боковин, основания и крыши воспринимать сдвигающую нагрузку. Практически это означает следующее: если боковина, основание и крыша являются ЭКП, то основание и крыша участвуют в работе кузова на изгиб, если не являются — не участвуют. Отличия в механике работы структурных элементов

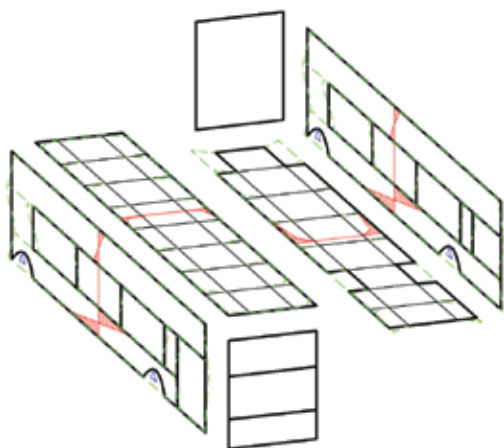


Рисунок 5. Изгиб кузова, состоящего не из ЭКП

кузова, являющихся и не являющихся ЭКП при продольном изгибе, показаны на рис. 4 и рис. 5.

На рис. 4 изображен кузов автобуса, состоящий из ЭКП, подверженный продольному изгибу на длине базы. Нагрузка — давление, распределенное по основанию кузова. Пунктиром условно показаны деформации структурных элементов и поворот передней и задней стенок без их существенного деформирования; прогиб основания в поперечном направлении от приложенной нагрузки условно не показан, т.к. не оказывает влияния на рассматриваемую ситуацию; штриховка — примерный вид эпюр нормальных напряжений (укрупненно) в структурных элементах. Как видно, механика прочностной работы кузова, состоящего из ЭКП, при его продольном изгибе близка к механике прочностной работы тонкостенного профиля, находящегося в аналогичных условиях закрепления и нагружения. При этом с достаточной для предварительного расчета точностью при определении величин нормальных напряжений можно считать справедливой гипотезу плоских сечений. Линейность эпюры нормальных напряжений в боковине в основном зависит от способности боковины передавать сдвигающую нагрузку.

На рис. 5 изображен кузов автобуса, основание, крыша и боковины которого не являются ЭКП. Условия закрепления и нагружения аналогичны ситуации, изображенной на рис. 4. Несущие конструкции основания и крыши в рассматриваемом примере приняты в виде каркаса из продольных и поперечных связей. Оболочки основания и крыши практически не влияют на прочностную работу каркаса. Такая ситуация может возникать, например, в случае применения фанерного настила пола, который не приклеивается к каркасу, или стеклопластиковой оболочки крыши, клеиваемой только по периметру. Следует отметить

наличие существенной депланиации поперечных сечений такого кузова. Эпюры нормальных напряжений в основных структурных элементах существенно нелинейны, следовательно, гипотеза плоских сечений для определения величин нормальных напряжений здесь принципиально не применима. Указанная депланиация возникает в результате изгиба таких элементов конструкции как оконные и дверные стойки, поперечины основания и крыши. Ввиду этого, расчет кузова, состоящего из не ЭКП, существенно сложнее, чем для кузова, состоящего из ЭКП.

В рассматриваемом примере давление, действующее на поверхность основания, передается поперечинами основания на подоконную часть боковин, вызывая их изгиб относительно продольной оси. Боковины, в свою очередь передают данную нагрузку на подрамники подвески. Надоконные части боковин включаются в работу очень слабо, т.к. нагрузка на них передается через изгибающиеся элементы низкой жесткости (оконные и дверные стойки), которые просто не способны передать большое усилие при имеющейся величине деформации. В восприятии продольного изгиба в значимой степени участвуют только крайние продольные связи. Остальные продольные связи остаются практически не нагруженными общим изгибом кузова, т.к. нагрузка на них передается через элементы низкой жесткости (поперечины основания и крыши). Передняя и задняя стенки кузова депланируют в соответствии с деформациями остальных структурных элементов, т.е. также не находятся в условиях рациональной прочностной работы.

Следует отметить, что ввиду указанных отличий в механике прочностной работы, кузов-монокок при прочих равных условиях может иметь жесткость в 5-12 раз выше, чем кузов не из ЭКП. Такая «врожденная» жесткость позволяет эффективно применять высокопрочные материалы, что существенно снижает собственную массу кузова. Примером может быть кузов автобуса, разработанный и изготовленный фирмой Autokinetics (США) в 2004-2006 годах [3]. Основным материалом кузова была холодноотянутая нержавеющей сталь с пределом текучести порядка 800 МПа. Полученный кузов имел очень высокую жесткость на кручение (первая частота собственных колебаний общего скручивания кузова около 27 Гц), при этом его собственная масса была на 60% ниже, чем масса каркасного кузова автобуса равной пассажироместности.

3. ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ КУЗОВА ТИПА «МОНОКОК» С ОСНОВАНИЕМ И КРЫШЕЙ В ВИДЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С РЕБРИСТЫМ СРЕДНИМ СЛОЕМ

Пример структуры кузова современного низкопольного автобуса показан на рис. 6. Предложенный вариант состоит из 10 основных составных частей: заднего и переднего подрамников подвески 1 и 2, панели основания пассажирского отделения 3, панели основания переднего свеса 4, панели крыши 5, несущих передней и задней стенок пассажирского отделения 6 и 7, не несущей задней стенки моторного отделения 8, правой и левой боковин 9 и 10. Подрамники задней и передней подвески 1 и 2 являются элементами, интегрированными в структуру основания кузова автобуса. Они состоят из балочного каркаса (жирные линии на рисунке), несущих колесных ниш, сформированных из довольно толстых листов, и усиленной сэндвич-панели подрамника, образующей поверхность пола пассажирского салона на участке подрамника и привносящей дополнительную поперечную изгибную жесткость в конструкцию. На рис. 6 серая заливка обозначает наличие несущего листового материала, серая штриховка на сэндвич-панелях основания и крыши показывает ориентацию ребер среднего слоя.

Подрамники подвески являются единственными элементами структуры современного кузова, воспринимающими «глобальную» весовую нагрузку всего автобуса и работающими на изгиб в поперечной плоскости. Это состояние является вынужденным, т.к. пока нет приемлемых компоновочных решений, позволяющих сконструировать подрамники

из ЭКП в рациональных условиях прочностной работы. Ввиду указанных причин, подрамники подвески имеют в своей конструкции мощные балки и усиленную сэндвич-панель.

Сэндвич-панели основания и крыши 3 и 5 в положении, показанном на рис. 6, имеют высокую изгибную жесткость в направлении оси 2 и относительно низкую жесткость в направлении оси 1. При восприятии нагрузок данные панели опираются на боковины, как наиболее жесткие в вертикальной плоскости элементы структуры, обеспечивающие минимальный пролет между опорами. Этими факторами обуславливается выбранная ориентация ребер среднего слоя панелей. Однако в полной мере указанные условия реализуются только при наличии достаточно мощных поясов боковин (нижнего и верхнего). Панель основания переднего свеса 4 может опираться как на боковины, так и на переднюю стенку и подрамник подвески. На рис. 6 показан случай ориентации ребер среднего слоя панели, соответствующий опиранию на переднюю стенку и подрамник подвески. Опирание панелей вдоль двух других сторон играет менее значительную роль, т.к. жесткость ребристой трехслойной панели в направлении поперек ребер среднего слоя существенно ниже, чем в направлении вдоль ребер. Таким образом, можно считать, что панели находятся в условиях цилиндрического изгиба.

Стенки кузова 6 и 7 являются несущими и активно участвуют в восприятии скручивающего момента, действующего на кузов. Стенка 8 и задние части боковин, принадлежащие моторному отделению, не являются ЭКП и практически не участвуют в восприятии «глобальных» нагрузок, что позволяет сделать в них необходимое количество дверей и люков

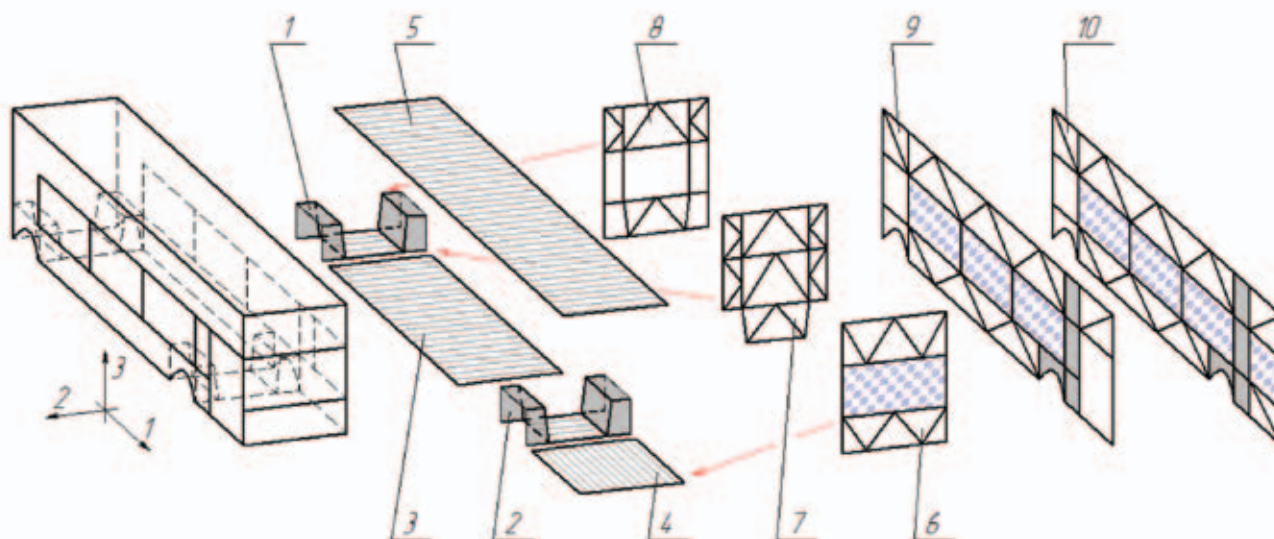


Рисунок 6. Структура современного низкопольного кузова автобуса

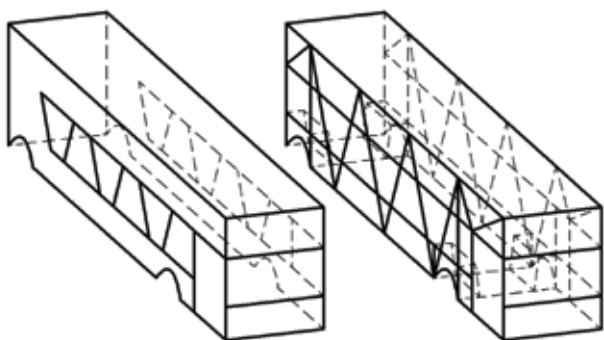


Рисунок 7. Перспективный дизайн боковин автобуса

для доступа в моторное отделение. Боковины 9 и 10 являются основными несущими элементами кузова, воспринимающими и распределяющими нагрузку. Стекла являются неотъемлемой частью несущей структуры боковин и передней стенки. При этом при повреждении стекол имеется опасность возникновения повреждений в несущей системе кузова. Для снижения указанного риска практикуют замену стекол на менее хрупкие и гораздо более легкие листы поликарбоната [3] или же внедряют конструкции боковин, существенно снижающие несущую роль стекол (рис. 7), которая реализована в кузове автобуса Solaris Vacanz [4].

Далее будут более подробно рассмотрены основные нагрузочные ситуации кузова автобуса, такие как торможение, боковое скольжение, скручивание кузова и продольный изгиб на длине базы.

3.1. Торможение и боковое скольжение автобуса

Схема передачи инерционных усилий от полезной нагрузки при торможении автобуса на подрамники подвески и далее на колеса показана на рис. 8, при боковом скольжении автобуса — на рис. 9. Наиболее значимыми несущими элементами конструкции при рассматриваемых режимах нагружения являются подрамники подвески, панели основания и боковины кузова. Панели крыши, передняя и задняя несущие стенки кузова мало включаются в процесс передачи усилий в данных случаях, поэтому на рисунках они условно не показаны.

На рис. 8 и 9 серыми стрелками показана инерционная нагрузка, действующая на панели основания от пассажиров автобуса. Наибольшее ее значение составляет $\mu \cdot p$, где μ — коэффициент сцепления колес с дорогой, а p — давление со стороны пассажиров на панели основания. Согласно [3] $p = 0,00534$ МПа; максимальное значение μ , соответствующее сцеплению колес с сухим асфальтом, можно принять на уровне 0,8. Стрелками показаны также основные внутренние усилия взаимодействия

между отдельными структурными элементами кузова при рассматриваемом режиме нагружения. Как видно из рисунков 8 и 9, более нагруженным случаем для главной трехслойной панели основания (поз. 3 на рис. 6) является режим бокового скольжения, т.к. при равной внешней нагрузке основные сдвигающие усилия сопротивления возникают на коротких сторонах панели.

Определим величину касательных напряжений, возникающих в обшивках трехслойной панели основания 10-метрового автобуса, у которого длина главной панели основания составляет 6 м, ширина 2,3 м, толщины стальных обшивок панели основания 1,2 мм и 0,9 мм соответственно.

$$\tau = \mu \cdot p \cdot D / (s_1 + s_2) = 0,8 \cdot 0,00534 \cdot 6000 / (1,2 + 0,9) = 12,2 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где τ — величина касательных напряжений, действующих по краям короткой стороны главной панели основания; D — длина главной панели основания; $s_{1,2}$ — толщины верхней и нижней обшивки трехслойной панели основания соответственно.

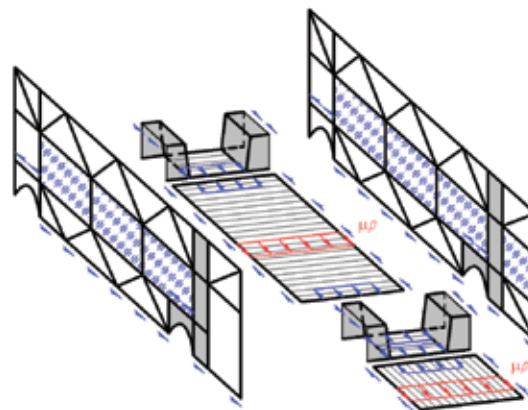


Рисунок 8. Передача инерционных усилий

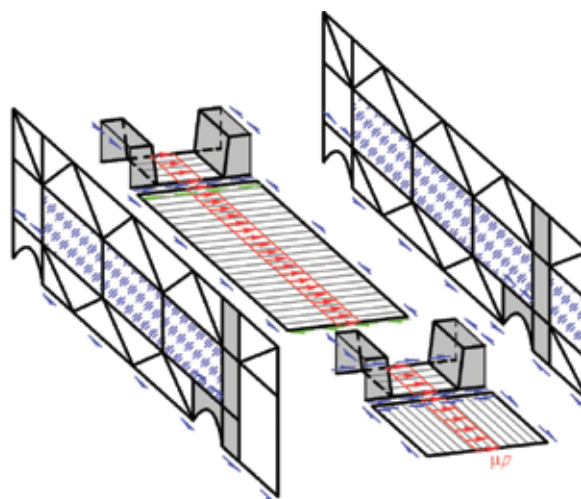


Рисунок 9. Передача инерционных усилий при торможении при боковом скольжении

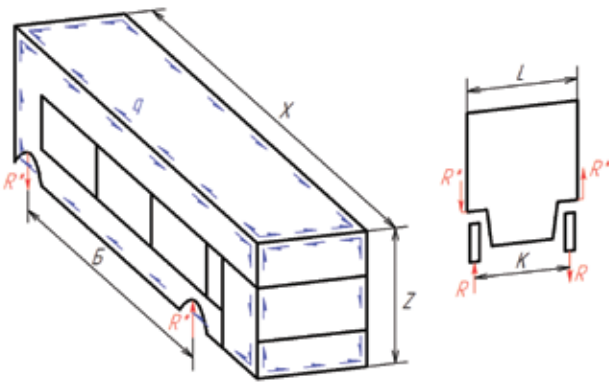


Рисунок 10. Скручивание кузова

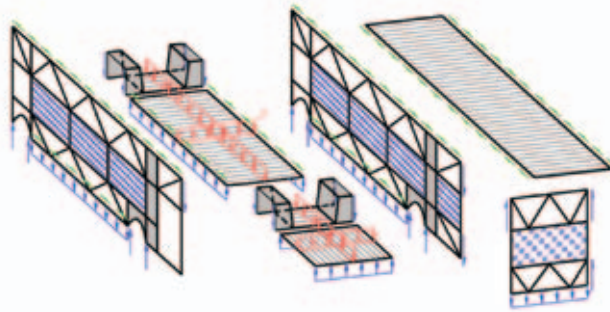


Рисунок 11. Продольный изгиб кузова

3.2. Скручивание кузова автобуса

Случай нагружения кузова скручивающей нагрузкой показан на рис. 10. Внешние для кузова усилия изображены стрелками R^* , внутренние усилия сопротивления — серыми стрелками.

Для простоты дальнейших вычислений условно считаем кузов параллелепипедом. Наличием колесных ниш и, как результат, перераспределением сдвигающей нагрузки по панели основания и нижней части боковин пренебрегаем в силу того, что данное допущение не меняет механики прочностной работы кузова в целом. На рис. 10 обозначено: B — колесная база автобуса; K — колея; X, Z, L — геометрические размеры кузова; R — внешняя нагрузка на колесе; R^* — трансформированная внешняя нагрузка после передачи ее с колес через направляющий аппарат и упругие элементы подвески на подрамники и далее на боковины кузова автобуса; q — удельное сдвигающее усилие, возникающее в местах соединения ЭКП (с достаточной для предварительного расчета точностью можно считать равномерным ввиду наличия достаточно мощных верхнего и нижнего поясов боковин).

Формулы для определения расчетных величин в данном случае примут следующий вид:

$$R = 0,5 \cdot g \cdot \min(M_1, M_2), \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения; $M_{1,2}$ — массы, приходящиеся на переднюю и заднюю оси.

$$R^* = R \cdot K / L, \quad (3)$$

$$M = R^* \cdot B, \quad (4)$$

где M — момент, закручивающий кузов.

$$q = M / (2 \cdot X \cdot Z) = (R \cdot K \cdot B) / (2 \cdot X \cdot Z \cdot L) \quad (5)$$

$$\tau = q / (s_1 + s_2) = g \cdot \min(M_1, M_2) \cdot ((K \cdot B) / (4 \cdot X \cdot Z \cdot L(s_1 + s_2))), \quad (6)$$

где $s_{1,2}$ — толщины верхней и нижней обшивок трехслойной панели.

Рассчитаем τ на примере трехслойной панели крыши автобуса САМОТЛОР мод. 3241 при закручивании кузова максимально возможным при эксплуатации автобуса моментом. Рассматриваем панель крыши, т.к. она имеет меньшую толщину обшивок, т.е. является более нагруженной.

Автобус имеет следующие характеристики: $\min(M_1, M_2) = 1445$ кг; $B = 4750$ мм; $K = 1722$ мм; $X = 5547$ мм — длина панели крыши; $L = 1406$ мм — ширина панели крыши; $Z = 2100$ — высота прочного корпуса автобуса; $s_1 = s_2 = 0,9$ мм.

Тогда получаем:

$$\begin{aligned} \tau &= g \cdot \min(M_1, M_2) \cdot ((K \cdot B) / (4 \cdot X \cdot Z \cdot L(s_1 + s_2))) = \\ &= 9,81 \cdot 1445 / ((1722 \cdot 4750) / \\ &/ (4 \cdot 5547 \cdot 2100 \cdot 1406(0,9 + 0,9))) = 0,983 \text{ МПа,} \end{aligned}$$

где τ — величина касательных напряжений, действующих по краям сторон панели крыши автобуса.

3.3. Продольный изгиб кузова автобуса на длине базы

Случай изгиба кузова относительно продольной оси показан на рис. 11. Внешние для кузова усилия (давление от веса пассажиров) изображены более светлыми вертикальными стрелками. Показаны также внутренние касательные усилия взаимодействия между ЭКП, вызывающие нагружение основания и крыши нормальными напряжениями, направленными параллельно продольной оси кузова и обеспечивающими его работу на изгиб как единого целого.

Расчетная схема поперечного сечения автобуса для определения величин нормальных напряжений в его основных несущих элементах при продольном изгибе кузова на длине базы изображена на рис. 12. Здесь обозначено: H — высота прочного корпуса кузова автобуса; $H_{НС}$ — высота надоконной секции боковины; $H_{ПС}$ — высота подоконной секции боковины; $H_{ОК}$ — высота оконной секции боковины; $Z_{В,НП,ПП,Н}$ — вертикальная координата верхнего пояса, надоконного пояса, подоконного пояса и нижнего пояса боковины соответственно; $A_{ПК,ПО}$ — площадь поперечного сечения обшивок панели крыши и панели основания соответственно; $A_{В,НП,ПП,Н}$ — площадь поперечного сечения балок верхнего, надоконного, подоконного и нижнего поясов боковины соответ-

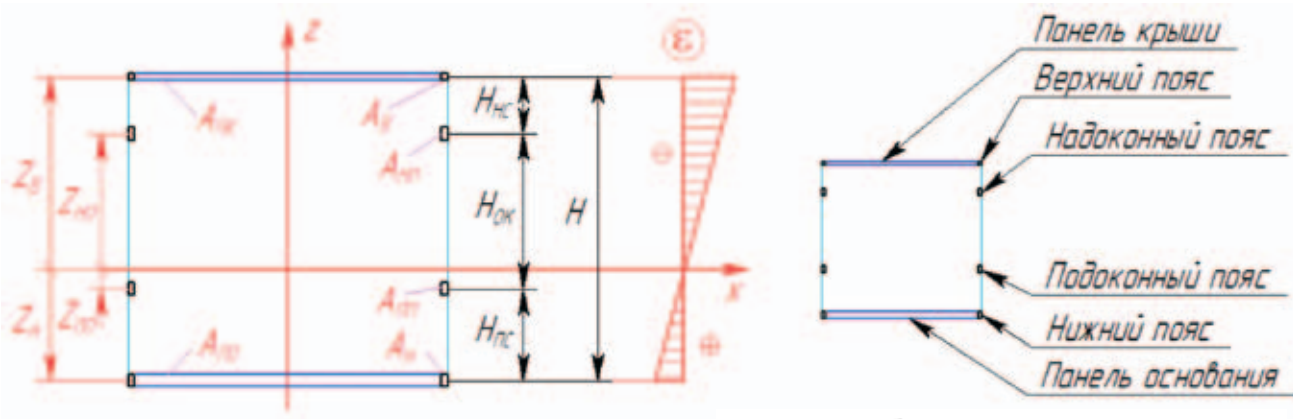


Рисунок 12. Расчетная схема поперечного сечения кузова

ственно; ε — нормальная относительная деформация элементов поперечного сечения кузова автобуса.

Принята линейная форма эпюры нормальных относительных деформаций. Структура боковин принята в соответствии с рис. 11, нормальными напряжениями в стеклах боковин пренебрегаем в силу их относительной малости и незначительного влияния на общую изгибную жесткость кузова. Из условия равенства нулю суммарной нормальной силы в сечении определяем положение нейтральной оси x .

$\sum \bar{N}_i = 0 \rightarrow$ в проекции на продольную ось кузова получаем:

$$-N_{ПК} - 2N_B - 2N_{НП} + 2N_{ПП} + 2N_H + N_{ПО} = 0, \quad (7)$$

где N_i — нормальное усилие в соответствующем элементе конструкции.

$$N_i = \sigma_i \cdot A_i, \quad (8)$$

где σ_i — нормальное напряжение в i -м элементе конструкции; A_i — площадь поперечного сечения i -го элемента конструкции.

$$\sigma_i = \varepsilon_i \cdot E_i, \quad (9)$$

где ε_i — нормальная деформация i -го элемента конструкции; E_i — модуль упругости материала i -го элемента конструкции (для простоты дальнейших преобразований будем считать, что все рассматриваемые силовые элементы выполнены из одного и того же материала, т.е. $E_i = E$).

В соответствии с линейной эпюрой относительных нормальных деформаций соотношение между относительными нормальными деформациями отдельных конструктивных элементов:

$$(\varepsilon_i = \varepsilon_B / \varepsilon_{НП} / \varepsilon_{ПП} / \varepsilon_H = \varepsilon_{ПО}) = (Z_B / Z_{НП} / Z_{ПП} / Z_H) \quad (10)$$

Выразим относительную деформацию всех конструктивных элементов через относительную деформацию обшивки панели крыши, тогда:

$$\varepsilon_B = \varepsilon; \quad \varepsilon_{НП} = \varepsilon (Z_{НП} / Z_B); \quad \varepsilon_{ПП} = \varepsilon (Z_{ПП} / Z_B);$$

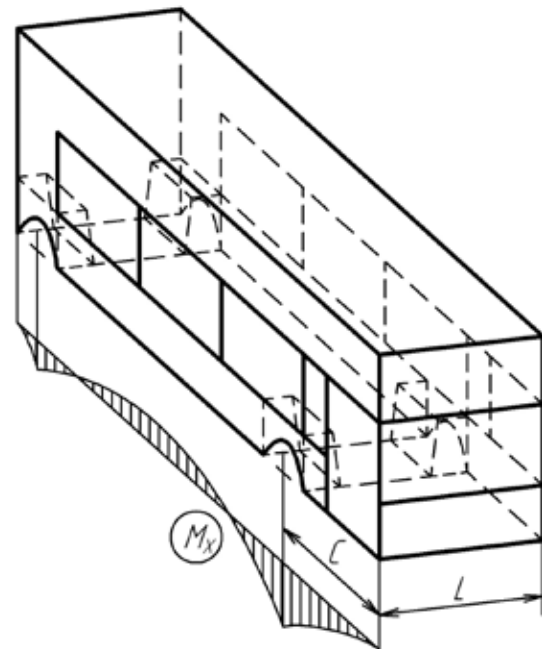


Рисунок 13. Эпюра изгибающего момента

$$\varepsilon_H = \varepsilon (Z_H / Z_B) \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в формулу (9) и далее в (8), получаем выражения для определения нормальных усилий в отдельных конструктивных элементах:

$$\begin{aligned} N_B &= \varepsilon \cdot E \cdot A_B; & N_{ПК} &= \varepsilon \cdot E \cdot A_{ПК}; \\ N_{НП} &= \varepsilon \cdot (Z_{НП} / Z_B) \cdot E \cdot A_{НП}; & N_{ПП} &= \varepsilon \cdot (Z_{ПП} / Z_B) \cdot E \cdot A_{ПП}; \\ N_H &= \varepsilon \cdot (Z_H / Z_B) \cdot E \cdot A_H; & N_{ПО} &= \varepsilon \cdot (Z_{ПО} / Z_B) \cdot E \cdot A_{ПО} \end{aligned} \quad (12)$$

Выражаем вертикальные координаты всех конструктивных элементов через вертикальную координату верхнего пояса боковины:

$$Z_H = H - Z_B; \quad Z_{НП} = Z_B - H_{НС}; \quad Z_{ПП} = H - H_{НС} - Z_B \quad (13)$$

Подставляем формулы (13) в выражения (12) и далее в равенство (7). После сокращения на $\varepsilon \cdot E$ и преобразования, получаем:

$$A_{ПК} + 2A_B + 2A_{НП} (1 - H_{НС} / Z_B) =$$

$$= 2A_{III}((H - H_{PC})/Z_B - 1) + 2A_H((H/Z_B - 1) + A_{ПО}(H/Z_B - 1); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & A_{ПК} + 2A_B + 2A_{НП} + 2A_{III} + 2A_H + A_{ПО} = \\ & = 2A_{III}((H - H_{PC})/Z_B) + 2A_H(H/Z_B) + \\ & + A_{ПО}(H/Z_B) + 2A_{НП}(H_{НС}/Z_B) \rightarrow \\ & Z_B = (2A_{III}(H - H_{PC}) + 2A_H H + A_{ПО} H + 2A_{НП} H_{НС}) / \\ & / (A_{ПК} + 2A_B + 2A_{НП} + 2A_{III} + 2A_H + A_{ПО}) \quad (15) \end{aligned}$$

Записываем условие равенства момента, создаваемого нормальными усилиями в данном сечении кузова, внешнему моменту:

$$M_x = N_{ПК} Z_B + 2N_B Z_B + 2N_{НП} Z_{НП} + 2N_{III} Z_{III} + 2N_H Z_H + N_{ПО} Z_H \quad (16)$$

Подставляем выражения (12) и в формулу (16), получаем:

$$M_x = \varepsilon \cdot E (A_{ПК} Z_B + 2A_B Z_B + 2A_{НП} (Z_{НП}^2 / Z_B) + 2A_{III} (Z_{III}^2 / Z_B) + 2A_H (Z_H^2 / Z_B) + A_{ПО} (Z_H^2 / Z_B)) \quad (17)$$

$$J_K = A_{ПК} Z_B + 2A_B Z_B + 2A_{НП} (Z_{НП}^2 / Z_B) + 2A_{III} (Z_{III}^2 / Z_B) + 2A_H (Z_H^2 / Z_B) + A_{ПО} (Z_H^2 / Z_B) \quad (18)$$

$$M_x = \varepsilon \cdot E \cdot J_K \rightarrow \varepsilon = M_x / (E \cdot J_K) \quad (19)$$

На примере заднего свеса автобуса САМОТЛОР мод. 3283 рассчитаем величины нормальных напряжений, возникающих в обшивках трехслойной панели крыши в результате изгиба кузова автобуса в продольном направлении. Рассматриваем трехслойную панель крыши, т.к. ее обшивки обычно тоньше, чем у панели основания, а также (в соответствии с рис. 12) поскольку она претерпевает большие по величине относительные деформации. Эпюра изгибающего момента, действующего на кузов автобуса при нагружении его давлением, условно равномерно распределенным по площади панелей основания, показана на рис. 13. Видно, что обычно величина наибольшего изгибающего момента возникает в районе оси автобуса, прилегающей к большому свесу, при этом не имеет значения передний он или задний.

Автобус САМОТЛОР мод. 3283 имеет геометрические размеры: $C = 1598$ мм; $L = 1900$ мм; $H_{PC} = 948$ мм; $H_{OK} = 1225$ мм; $H_{НС} = 136$ мм; $H = 2308$ мм, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа (сталь).

Рассчитываем величину изгибающего момента в расчетном сечении по известной формуле:

$$M_x = 0,5 \cdot q \cdot C^2 = 0,5 \cdot 0,00534 \cdot 1900 \cdot 1598^2 = 13,0 \cdot 10^6, \quad (20)$$

где C — величина свеса (см. рис. 13); $q = p \cdot L$ — величина удельного усилия; $p = 0,00534$ МПа — давление на панель основания; L — пролет между боковинами.

Площади сечений отдельных конструктивных элементов равны: $A_{ПК} = 2617$ мм², $A_B = 195$ мм², $A_{НП} = 845$ мм², $A_{III} = 195$ мм², $A_H = 600$ мм², $A_{ПО} = 4560$ мм².

По формулам (15) и (13) определяем интересующие величины вертикальных координат:

$$\begin{aligned} Z_B &= (2 \cdot 195 \cdot (2308 - 948) + 2 \cdot 600 \cdot 2308 + 4560 \cdot 2308 + \\ &+ 2 \cdot 845 \cdot 136) / (2617 + 2 \cdot 195 + 2 \cdot 845 + 2 \cdot 195 + \\ &+ 2 \cdot 600 + 4560) = 1296 \text{ мм}; \\ Z_H &= 2308 - 1296 = 1012 \text{ мм}; Z_{НП} = 1296 - 136 = 1160 \text{ мм}; \\ Z_{III} &= 2308 - 948 - 1296 = 64 \text{ мм} \end{aligned}$$

Рассчитываем остальные величины, необходимые для определения искомым напряжений, по формулам (18) и (19):

$$\begin{aligned} J_K &= 2617 \cdot 1296 + 2 \cdot 195 \cdot 1296 + 2 \cdot 845 \cdot (1160^2 / 1296) + \\ &+ 2 \cdot 195 \cdot (64^2 / 1296) + 2 \cdot 600 \cdot (1012^2 / 1296) + \\ &+ 4560 \cdot (1012^2 / 1296) = 10,2 \cdot 10^6 \\ \varepsilon &= 13 \cdot 10^6 / (2,1 \cdot 10^5 \cdot 10,2 \cdot 10^6) = 0,607 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

По формулам (11) и (9) определяем величину нормальных напряжений, возникающих в обшивках панели крыши в результате продольного изгиба кузова:

$$\sigma_{ПК} = 0,607 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 = 1,28 \text{ МПа.}$$

4. ВЫВОДЫ

Сравнивая вычисленные значения напряжений, возникающих в обшивках панелей основания и крыши автобусного кузова типа «монокок» при нагрузочных режимах торможения, бокового заноса, скручивания и продольного изгиба, с величинами напряжений, возникающих в обшивках данных панелей при их поперечном изгибе, а также с величиной предела текучести малоуглеродистой стали, из которой были изготовлены обшивки в рассмотренных примерах, можно сделать следующий вывод: при рассмотрении прочности трехслойных панелей основания и крыши автобусного кузова типа «монокок» основные расчетные режимы, общепринятые для кузовов автобусов, не относящихся к данному типу, являются второстепенными, не оказывающими решающего влияния на их прочность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловский, Я. Автомобильные кузова: Пер. с польск. / Под ред. Н.И. Воронцова / Я. Павловский. — М.: Машиностроение, 1977. — 544 с.
2. Воронков, О.В. Проблема потери устойчивости кузовных панелей при действии сдвигающих нагрузок / О.В. Воронков, В.И. Песков // Будущее технической науки: тез. докл. III Междунар. молодежн. науч.-технич. конф. / НГТУ. — Н. Новгород, 2004. — С. 170.
3. Воронков, О.В. Новое в конструкции и проектировании автобусных кузовов: монография / О.В. Воронков, В.И. Песков, А.А. Хорычев // НГТУ. — Нижний Новгород, 2009. — 186 с.
4. Песков, В.И. Совершенствование конструкции несущего кузова автобуса / В.И. Песков, Д.В. Песков, Д.В. Киселев // Автомобильный транспорт в XXI веке: сб. науч. ст. Междунар. науч.-технич. конф. / НГТУ. — Н. Новгород, 2003. — С. 111.