

УДК 629.114.5

В.И. Песков¹, О.В. Воронков²**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ В КОНСТРУКЦИИ
АВТОБУСНЫХ КУЗОВОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Самотлор-НН»²

Рассматриваются особенности использования сэндвич-панелей в качестве пола и крыши автобусных несущих кузовов. Приведены типовые расчетные схемы и нагрузочные режимы, применяемые ведущими мировыми производителями автобусных кузовов для оценки прочности и жесткости этих элементов несущего кузова. Рассмотрены особенности компоновки и конструкции одного из первых отечественных низкопольных автобусов, в кузове которого применены сэндвич-панели.

Ключевые слова: автобусный низкопольный кузов, трехслойные оболочки, сэндвич-панель, жесткость кузова, максимальные напряжения в кузовных элементах, компоновка кузова.

Проблемы совершенствования конструкции несущих автобусных кузовов относятся к разряду наиболее трудоемких и сложных, требующих больших трудозатрат и серьезных капиталовложений. Это, прежде всего, определяется тем фактом, что стоимость кузова автобуса обычно составляет 50-70% стоимости самого автобуса. В последнее время одной из востребованных конструкций городских автобусов является низкопольный вариант, т.е. имеющий кузов, высота пола в пассажирском отделении которого располагается по отношению к поверхности дороги на уровне первой ступеньки входа в автобус. Указанное конструктивное отличие существенно облегчает вход и выход пассажиров и их перемещения внутри салона, что в особенности касается пожилых людей, женщин с детьми (или, тем более, с детскими колясками) и пассажиров, перевозящих с собой багаж. Помимо повышения комфортности процедуры посадки-высадки пассажиров, низкопольность автобуса позволяет более просто решить и такую специфическую проблему, как перевозка людей с ограниченной двигательной способностью (например, инвалидов-колясочников), чему в последнее время стало уделяться гораздо больше внимания, вплоть до стремления законодательно закрепить необходимость предусмотрения в городском автобусе хотя бы одного специально оборудованного для этих целей места.

Из приведенных примеров ясно видна острая социальная потребность в низкопольных городских автобусах. Однако, несмотря на все неоспоримые преимущества такого типа общественного транспорта, существует целый ряд проблем конструктивного и технологического характера, препятствующих организации производства низкопольных автобусов в России в необходимых объемах, а также их широкому и повсеместному использованию в пассажирских перевозках в условиях больших городов. Во-первых, абсолютное большинство выпускаемых в нашей стране автобусов имеют устаревшую рамную конструкцию, что не позволяет у них понизить уровень пола до необходимой высоты с одновременным соблюдением требований профильной (геометрической) проходимости. Одной из серьезных причин является также тот факт, что низкопольная конструкция автобуса традиционно создается как вариант приспособления обычной конструкции его кузова, поэтому она получается сложнее и дороже. Выход из этой ситуации можно найти в совершенно новом подходе к процессу создания такого городского автобуса.

Самый простой способ получения прочной несущей конструкции автобусного кузова – применение для его каркаса материалов, имеющих более высокие прочностные характеристики. В этом плане уже есть примеры использования в автобусном кузовостроении высокопрочной нержавеющей стали. Но применение высокопрочных сталей, титана и его сплавов,

армированных пластиков и других композиционных материалов на основе сверхпрочных непрерывных волокон или нитевидных кристаллов в тонкостенных подкрепленных конструкциях, работающих в условиях изгиба и сжатия, часто бывает неэффективным. Это объясняется тем, что по условию прочности конструкции из этих материалов должны иметь очень малую толщину. Но при этом резко снижается момент инерции сечения пластины или оболочки, и конструкция, особенно при невысоких модулях упругости материала, имеет низкие критические напряжения потери устойчивости.

Этого недостатка лишены трехслойные пластины и оболочки, поэтому одним из самых современных способов создания несущего низкопольного кузова высокой прочности и жесткости является интеграция панелей пола и крыши в общую несущую систему в качестве ее полноправных и высокоэффективных элементов, что можно сделать с применением для этих элементов конструкции типа «сэндвич-панели». Эффект усилится, если наружные поверхности такого «сэндвича» будут выполнены из высокопрочного материала. Поскольку коррозия не должна разрушать относительно тонкие элементы легких сэндвич-панелей, применяемый материал не должен корродировать даже в самых неблагоприятных условиях, что свидетельствует о перспективности применения для этих целей оцинкованных или нержавеющей листовых сталей, алюминия или титана.

Основное компоновочное требование для панели пола заключается в том, что для полностью низкопольной конфигурации автобуса важно сохранить ее общую конструкцию настолько тонкой, насколько это возможно. Это необходимо, прежде всего, для достижения минимальной высоты входной ступеньки при одновременном сохранении удовлетворительного дорожного просвета. Главные конструктивные требования для такой панели пола заключаются в обеспечении необходимого уровня прочности, достаточного для поддержания распределенной нагрузки, минимум в 2,5 раза превышающей максимальную нагрузку от веса



Рис. 1. Сэндвич-панель крыши автобуса

пассажира, и в том, чтобы панель имела высокие резонансные частоты, достаточные для обеспечения хороших виброшумовых свойств [1]. Для выполнения данных требований в качестве пола прототипа автобуса фирмы *Autokinetics* (США) было решено, например, использовать цельнометаллическую сэндвич-панель, собираемую при помощи точечной сварки, состоящую из двух плоских внешних листов и одного гофрированного внутреннего листа. Гофры ориентированы поперек транспортного средства. Внешние плоские листы имеют толщину 1,27 мм, внутренний гофрированный лист имеет толщину 0,762 мм. Аналогичная конструкция

использована в качестве панели крыши, что дает удобную и универсальную опору для устанавливаемых на крыше компонентов, таких, как кондиционер, топливные баки и элементы гибридной силовой установки. Панель крыши идентична панели пола, за тем исключением, что внешние листы имеют толщину всего 0,762 мм (рис. 1).

Нагрузочные режимы для испытаний общей прочности и жесткости несущего кузова известны. Один из таких режимов – это нагружение автобуса вертикальными силами, вызывающими изгиб несущей конструкции, которое соответствует вертикальной перегрузке в 2,5g, действующей на автобус при его полной загрузке в момент одновременного наезда обоими колесами одной из осей на дорожные препятствия одинаковой высоты [1]. Данная нагрузка не должна вызывать пластических деформаций несущей конструкции. Другой наиболее напряженный режим – это нагружение кузова вертикальными силами, соответ-

ствующими полному весу автобуса, при имитации наезда одного из колес передней оси на бордюр высотой 150-200 мм и одновременном попадании другого колеса этой оси в выбоину такой же глубины. При таком нагрузочном режиме конструкция одновременно испытывает деформации изгиба и кручения. Фирма *Autokinetics* при проведении исследований кузова прототипа нового автобуса обосновала решение совместить нагрузки от данных двух режимов в одно статическое проверочное испытание для целей обеспечения дополнительного коэффициента безопасности: в результирующем нагрузочном режиме приклады-валась распределенная по полу автобуса нагрузка, в 3,5 раза превышающая полный вес автобуса, в то время как транспортное средство опиралось только на левое переднее и правое заднее колеса. Также рассматривался нагрузочный случай переворота автобуса на крышу, что было представлено как приложенная к панели крыши равномерно распределенная вертикальная нагрузка, в 1,5 раза превышающая снаряженную массу автобуса [2].

Результаты проверочного расчета при указанном нагрузочном режиме «изгиб с кручением» таковы: максимальные действующие напряжения даже не приближаются к пределу текучести стали *Nitronic 30*, использованной для листов сэндвич-панелей, следовательно, пластические деформации в данном случае не имеют места. Максимальное упругое перемещение – всего 12,7 мм. Это говорит о закручивании кузова на длине базы меньше 1° , что можно отнести к разряду очень хороших показателей жесткости. Напряжения, действующие при данном нагрузочном режиме, ниже предела выносливости материала *Nitronic 30*, который составляет 482 МПа [2], из чего можно сделать заключение об отличных рабочих характеристиках кузова нового автобуса. Результаты расчета режима приложения аварийной нагрузки к трехслойной панели крыши показали, что напряжения при этом нагрузочном режиме также ниже предела текучести.

Для автобусного производства наиболее пригодными считаются цельнометаллические и комбинированные сэндвич-панели, принципиальные схемы которых показаны на рис. 2.

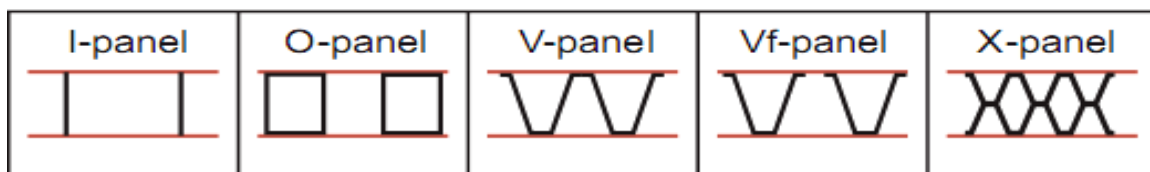


Рис. 2. Схемы трехслойных панелей, перспективных для производства автобусных кузовов

На рис. 3 показана расчетная схема, использованная для сравнения различных типов цельнометаллических трехслойных панелей из нержавеющей стали, конструкция которых легче всего реализуется в условиях автобусного производства.

Размеры исследуемых панелей в плане были взяты 1000x1000 мм. В центре верхней обшивки прикладывалась нагрузка, сосредоточенная на квадрате со стороной 10 мм, кромки нижней обшивки панели были свободно оперты по краям. Прикладывалась суммарная нагрузка двух величин – 1500 Н и 3000 Н. Допустимые напряжения в обшивках ограничивались на уровнях в 210 МПа, 355 МПа и 680 МПа.

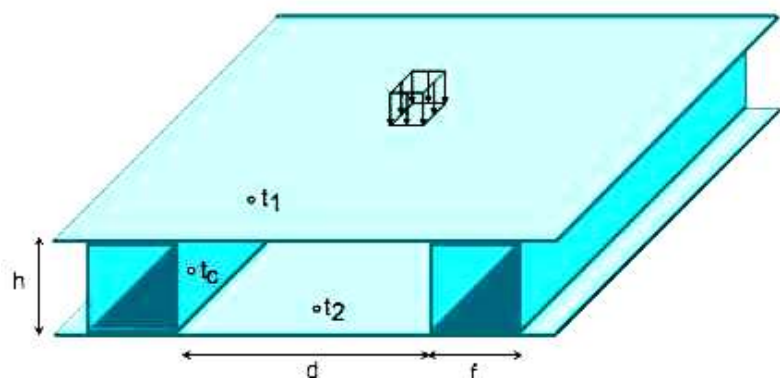


Рис. 3. Расчетная схема нагружения сэндвич-панели пола

Перемещения от локального изгиба ограничивались на уровне 2 мм, от общего изгиба панели – на уровне 5 мм. Прочие параметры панели оптимизировались с целью достижения минимальной массы конструкции. Результаты расчетов показали, что наиболее эффективными являются сэндвич-панели типа «Vf» и «I» (рис. 2), немного им уступают, являясь наиболее простыми в изготовлении, панели типа «O». Именно такого типа сэндвич-панели пола и крыши применены в конструкции городского низкопольного автобуса «Самотлор-3283» (рис. 4), непосредственное руководство работами по разработке конструкции кузова которого и его сборке осуществлял один из авторов данной статьи [3].



Рис. 4. Победитель номинации «Лучший микроавтобус» автосалона «КРОКУС ЭКСПО 2006» низкопольный переднеприводный городской автобус «Самотлор-3283»

Указанная перспективная разработка представляет собой один из первых отечественных переднеприводных автобусов I класса, разработанных в соответствии с ГОСТ Р 41.107-99. В структуре автобуса применен целый ряд оригинальных компоновочных и конструктивных решений.

Во-первых, следует перечислить отличительные особенности автобуса с точки зрения его общей компоновки.

1. Передний привод, позволяющий автобусу унаследовать полный спектр преимуществ переднеприводного автомобиля, таких как маневренность и хорошая управляемость. Как результат применения переднего привода, необходимо отметить возможность создания автобуса-низкопольника с полностью плоским полом в пассажирском отделении, так как отпадает необходимость размещения узлов трансмиссии в пространстве под ним. При указанном подходе к компоновке необходима лишь относительно небольшая и легко осуществимая модификация базового шасси, которое в данном случае превращается в модуль, содержащий двигатель в сборе с узлами трансмиссии, ведущий мост с подвеской и рабочее место водителя со всеми приборами и органами управления.

2. Трехосная компоновка позволяет иметь достаточный задний свес для обеспечения необходимой пассажировместимости автобуса без перегрузки передней оси. Кроме того, в этом случае можно иметь небольшие по ширине колесные ниши задних колес, что позволяет размещать над ними пассажирские сиденья, существенно увеличивая эффективность использования пространства пассажирского салона.

3. Независимая подвеска всех четырех задних колес позволяет, благодаря отсутствию дополнительных поперечных силовых элементов, обеспечить достаточную величину дорожного просвета.

4. Размещение пассажирских сидений на подиумах дает возможность повисить ком-

форт пассажиров, так как разделяет по высоте расположения части салона, предназначенные для сидящих и стоящих пассажиров. В дополнение к этому, появляется возможность размещения узлов ходовой части и топливной системы в дополнительном пространстве под подиумами.

5. Широкий проем передней рабочей двери со сдвоенными створками обеспечивает легкий доступ в салон автобуса людей с ограниченными способностями передвижения, в том числе имеется возможность перевозки одного пассажира в инвалидной коляске.

6. Накопительная площадка для пассажиров напротив широкой двери обеспечивает им комфорт при посадке-высадке. Размещение данной площадки в пределах колесной базы способствует более полному нагружению передней оси при частичном заполнении автобуса, что положительно отражается на его свойствах управляемости и проходимости.

7. Пневматическая подвеска задних колес применена в силу своей компактности, а также благодаря возможности поддерживать постоянным уровень пола кузова автобуса при различных степенях его загрузки, что особенно важно для транспортного средства с относительно большим задним свесом и небольшим дорожным просветом для сохранения геометрических показателей проходимости на приемлемом для движения в городских условиях уровне. Дополнительными положительными качествами пневматической подвески в данном случае являются повышение комфорта пассажиров и уменьшение динамических нагрузок на несущую структуру автобуса, что является результатом общего снижения вибронагруженности кузова автобуса.

Во-вторых, имеется целый набор оригинальных решений, касающихся конструкции несущего кузова:

1. Кузов пассажирского отделения из комбинированных сэндвич-панелей «О-типа». Указанные панели, являясь наиболее простыми в изготовлении и достаточно эффективными с прочностных позиций, позволяют достичь существенного уменьшения собственной массы кузова по сравнению с общепринятой каркасной конструкцией из стальных труб и фанерного настила пола. Это уменьшение может достигать 25-30%. Предварительными расчетами была определена минимально допустимое расстояние между наружными листами сэндвича пола и крыши исходя из описанных ранее нагрузочных режимов (оно составило 50 и 22 мм соответственно).

2. Применение комбинированных панелей, в которых между трубчатыми ребрами размещается пеноматериал, позволяет в рамках нагрузочных ситуаций, характерных для автобусного кузова, одновременно получать преимущества, присущие цельнометаллическим панелям (жесткость при поперечном изгибе) и панелям с наполнителем из пеноматериала (хорошая тепло- и шумоизоляция, демпфирование вибраций, способность к восприятию в любой точке панели сосредоточенной нагрузки типа вертикального усилия от каблук-шпильки стоящей пассажирки и др.).

3. Применение панелей «О-типа» при рациональном размещении трубчатых ребер позволяет практически отказаться от дополнительных местных усилений в местах крепления поручней, сидений, кронштейнов других устройств. Закрепление деталей при этом осуществляется с помощью односторонних вытяжных заклепок.

4. Применение сэндвич-панелей «О-типа» позволяет формировать кузов автобуса по оригинальной технологии. Сначала изготавливаются сборочные единицы, формирующие систему трубчатых ребер основания, боковин, крыши, торцевых стенок. Выглядит такая система ребер как каркас соответствующей части, выполненный из легких тонкостенных труб. Далее к ребрам с помощью точечной сварки или прерывистым швом дуговой сварки привариваются обшивки одной стороны (оцинкованная листовая сталь толщиной 0,9 мм). После этого производится вклеивание в подсобранные сборочные единицы плит пеноматериала (пенопласт или пенополиуретан) и обшивок второй стороны панелей. При этом желательно использовать высокомодульный клей, работающий в виде тонких пленок (эпоксидная или полиэфирная смола, менее удачная альтернатива – двухкомпонентный полиуретановый

клей). Обязательным условием является полная или почти полная негорючесть клея в полимеризованном состоянии (к пеноматериалу предъявляются менее жесткие требования по горючести, так как он находится в пространстве, со всех сторон окруженном металлом при отсутствии доступа воздуха). При вклеивании плит пеноматериала, помимо обычной подготовки поверхностей к склеиванию (очистка, зашкуривание, обезжиривание), следует предусмотреть на них регулярные углубления, предназначенные для сбора излишков клея. Это позволит избежать «вспучивания» панели. После полимеризации клея производится приварка обшивок второй стороны панели, после чего осуществляется обязательная герметизация всех швов и стыков с помощью полиуретанового герметика. Соединение сборочных единиц производится путем сварки по крайним трубчатым ребрам.

5. Разделение остекления на два яруса позволило существенно упростить изготовление стекол и, следовательно, значительно снизить общую стоимость остекления.

6. Указанная технология сборки несущего кузова из сэндвич-панелей обеспечивает при эксплуатационных нагрузках его общего кручения и продольного изгиба совместную работу основания, боковины, крыши и вклеенных стекол, т. е. можно сказать, что в этом случае кузов представляет собой так называемый «сэндвич-панельный монокок». Это означает, что кузов работает как структурно единый замкнутый профиль, обеспечивая высокую жесткость и прочность конструкции.

7. Сэндвич-панельные боковины и крыша существенно повышают сопротивляемость пассажирского отсека деформированию при воздействии аварийных нагрузок, возникающих при опрокидывании автобуса и, особенно, при боковом наезде другого автомобиля. Основной вклад здесь вносят боковины и способ их крепления к основанию, обеспечивающий надежную заделку по всей длине. Увеличению жесткости нижней части конструкции и повышению качества заделки боковин кузова в основание также существенно способствуют подиумы и надколесные кожухи.



Рис. 5. Нанесение клея на внутренний гофрированный лист сэндвича



Рис. 6. Вид с торца подсобранной сэндвич-панели пола автобуса

На международном автосалоне «КРОКУС ЭКСПО 2006» в Москве сэндвич-панельный низкопольник «Самотлор-3283» занял первое место в номинации «Лучший микроавтобус».

На модели автобуса «Самотлор-3241» была опробована эффективность сэндвич-панелей «V-типа» (рис. 5, 6). Здесь панели основания и крыши представляли собой конструкцию, состоящую из наружных оцинкованных обшивок и внутреннего гофрированного листа (толщиной 0,7 мм), которые скреплялись при помощи высокомолекулярного двухкомпонентного полиуретанового клея-герметика. Ребра гофрированного листа, допустимые пределы отклонения которых от вертикали были предварительно рассчитаны исходя из модели рис. 3 (допустимый диапазон этого угла оказался 80–90°), располагались перпендикулярно продольной оси кузова, что обеспечило хорошие показатели жесткости панелей.

Библиографический список

1. **Песков, В.И.** Основы эргономики и дизайна автомобиля: учеб. пособие / В.И. Песков; Нижегород. гос. техн. ун-т.– Н. Новгород, 2004.– 225 с.
2. **Ultralight Stainless Steel Urban Bus Concept** : отчет о НИР/ Autokinetics Inc. for SAE Technical Paper; рук. Emmons B.J. – USA, Washington, 2001. – 22 p.
3. **Воронков О.В.** Новое в конструкции и проектировании автобусных кузовов: монография / О.В. Воронков, В.И. Песков, А.А. Хорычев; Нижегород. гос. техн. ун-т.– Н. Новгород, 2009. – 186 с.

*Дата поступления
в редакцию 20.05.2010*

V.I. Peskov, O.V. Voronkov

USING SANDWICH-PANELS IN BODY BUS CONSTRUCTION

Considered special features of using sandwich-panels for floor and roof of bus carriage bodies. Gone typical calculation schemes and load regimes, using of leading bus body producers for assessment of durability and rigidity such elements of carriage body. Considered special features of composition and construction one of the first domestic bus with low floor, in body of which used sandwich-panels.

Key words: low floor bus body, three-layers constructions, sandwich-panel, body rigidity, maximal stress in body elements, body composition.