

Расчет и конструирование

УДК 539.43, 629.1

DOI: 10.14529/engin160301

ПОВЫШЕНИЕ ВЕСОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНЫХ КУЗОВОВ ЗА СЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ С УПРАВЛЯЕМОЙ СДВИГОВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

А.А. Шакиров

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Предложен новый подход к проектированию длинномерных каркасно-панельных кузовов транспортных средств заданной долговечности с применением соединений на эластичных клеях с трансверсальным армированием.

В процессе изготовления каркасно-панельного кузова производится наклеивание готовых сэндвич-панелей со стеклопластиковыми обшивками в стальной каркас. Используемые при этом соединения можно отнести к группе нахлесточных.

Для стальных каркасов, имеющих существенные отклонения от проектной геометрии (переменные зазоры между вклеиваемыми панелями и каркасом), высокие требования к долговечности конструкции при ее минимальном весе требуют выравнивания нагрузок на композитные панели и каркас за счет регулирования жесткости клеевого шва переменной толщины. Предложена новая концепция управления жесткостью при помощи самонарезающих винтов малого диаметра.

Концепция реализована за счет использования разработанных номограмм, связывающих между собой толщину клеевого слоя, шаг армирования самонарезающими винтами и погонную жесткость соединения, определяемую в расчете на единицу длины соединения. Номограммы позволяют определять требуемый шаг армирования при заданной толщине клеевого слоя и жесткости соединения.

На примере кузова трамвайного вагона отработана методика проектирования с использованием отмеченных номограмм. После подбора необходимого шага армирования в рамках методики производится оценка нагруженности армированных соединений и каркаса. Нагрузки определяются с помощью метода конечных элементов (МКЭ), используя упрощенную модель кузова и поправочных коэффициентов, вычисленных на основе детализированного МКЭ моделирования типовых каркасно-панельных конструкций. Проверка статической прочности и долговечности соединений реализована соответственно на основе верифицированных МКЭ моделей армированных соединений и аналитических экспериментальных зависимостей.

Ключевые слова: каркасно-панельный несущий кузов, композитная сэндвич-панель, нахлесточное клеємеханическое соединение, самонарезающий винт, управление жесткостью.

Введение. К конструкциям современных транспортных средств предъявляются повышенные требования по весовой эффективности, технологичности, надежности и экономичности [1–4]. Экономическая сторона процесса эксплуатации заставляет искать внешний облик, характеризующийся аэродинамическим совершенством и эстетичностью [5–8].

В транспортном машиностроении существуют различные решения, позволяющие достигать указанных выше требований за счет замены традиционных углеродистых сталей в несущих элементах кузова на такие материалы как алюминий, нержавеющая сталь, магний, полимерные композиты на основе стеклянных или углеродных волокон [1–5, 9–10].

Среди транспортных средств городского и междугороднего сообщения (трамваи, метро, автобусы, пассажирские поезда) наибольшей весовой эффективностью обладают конструкции с полукаркасными [11–13] и бескаркасными [10, 14, 15] несущими кузовами. При этом распространены разработки на основе гибридных каркасно-панельных конструкций, несущие компоненты которых выполнены из разнородных материалов: силовых сэндвич-панелей с обшивками из полимерных материалов (стеклопластик) и стального поддерживающего каркаса [12, 16–17]. Поддерживающий каркас в таких конструкциях располагается между обшивок сэндвич панелей перед их отверждением в процессе изготовления кузова. В случае применения несущего каркаса

Расчет и конструирование

из полимерных материалов возможен монтаж готовых сэндвич-панелей путем вклеивания в каркас по аналогии с элементами остекления [13].

Указанный метод вклеивания панелей в каркас представляет интерес для дальнейших исследований, так как в отличие от остальных концепций не требует значительного переоснащения производственной базы, ориентированной на мелкосерийное изготовление стальных каркасных длинномерных кузовов, в которых возможны геометрические несовершенства.

В данной работе предложен новый подход к проектированию длинномерных каркасно-панельных кузовов, имеющих существенные отклонения от проектной геометрии (переменные зазоры между вклеиваемыми панелями и каркасом).

Для эффективной передачи нагрузок в каркасно-панельных конструкциях с отмеченными геометрическими несовершенствами, переменные зазоры между панелями и каркасом могут быть скомпенсированы применением нахлесточных соединений на основе сравнительно толстых низко модульных клеев переменной толщины. Сдвиговая жесткость, несущая способность и долговечность клеевых соединений может быть достаточно просто увеличена за счет применения трансверсальных армирующих элементов [18–20]. Полученные таким образом комбинированные соединения успешно используются в существующих гибридных каркасно-панельных конструкциях [12, 16]. В предыдущих работах автора показана возможность применения самонарезающих винтов в качестве трансверсальных армирующих элементов [21–22].

Основными задачами настоящей работы являются:

– разработка концепции управления жесткостью клеемеханических соединений на основе низко модульных клеевых композиций и самонарезающих винтов малого диаметра с переменным шагом армирования;

– создание методики расчета прочности и долговечности конструкции каркасно-панельного транспортного средства с клеемеханическими соединениями, армированными самонарезающими винтами.

1. Анализ напряженно-деформированного состояния каркасно-панельной конструкции с переменными зазорами между панелями и каркасом

Необходимость управления жесткостью соединений в каркасно-панельной конструкции с переменными зазорами между композитными панелями и каркасом показана на примере кузова трамвайного вагона, рис. 1.

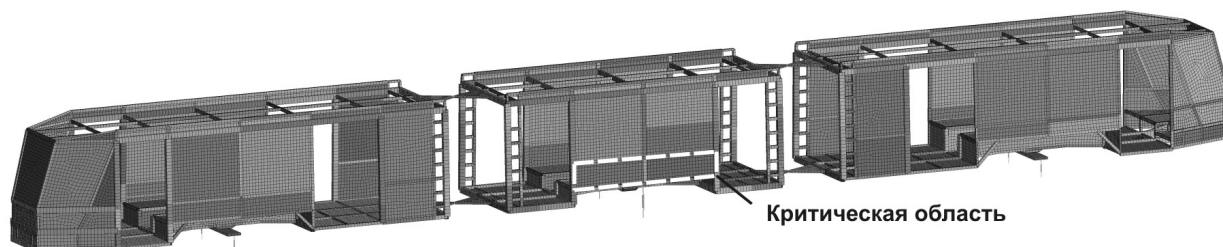


Рис. 1. МКЭ-модель кузова сочлененного трамвайного вагона

Методом конечных элементов (МКЭ) в программном пакете ANSYS Workbench проведено расчетное исследование напряженно-деформированного состояния композитных сэндвич-панелей и стального каркаса боковин у дверного проема (критическая область, рис. 1) с толщиной клея 1–6 мм (герметик полиуретановый TEROSTAT 8590). Типовая панель имеет размеры 500×1500 мм, обшивки панели – хаотически армированный стеклопластик толщиной 3 мм, наполнитель – пенопласт Divynicell P100 толщиной 20 мм, каркас – горячекатаная стальная труба по ГОСТ 8645-68 ($100 \times 60 \times 4$ мм). Отмеченная вариация толщины клея определяется допусками на кривизну катаных труб заданной длины.

МКЭ-модель кузова вне критической зоны имеет каркас из балочных КЭ и тонкостенную обшивку постоянной толщины $t = 3$ мм из оболочечных КЭ, абсолютно жестко привязанную к каркасу и имеющую сдвиговую жесткость, эквивалентную натурным панелям. Модуль Юнга эквивалентной обшивки определен из условия равенства перемещений при сдвиге с МКЭ-моделью типовой панели.

В МКЭ модели типовой панели использованы оболочечные КЭ для моделирования композитной обшивки и стального каркаса, объемные КЭ – для наполнителя, клеевого слоя, а также

в случае армирования – для цилиндрических элементов, эквивалентных по сдвиговой жесткости самонарезающим винтам (рис. 2, а). Сопряжение элементов панели друг с другом реализовано за счет стандартных контактных алгоритмов склейки, встроенных в программный пакет ANSYS. Зависимость модуля Юнга эквивалентной обшивки от соотношения сторон типовой панели d при толщине клеевого шва 1 мм, показанная на рис. 2, б.

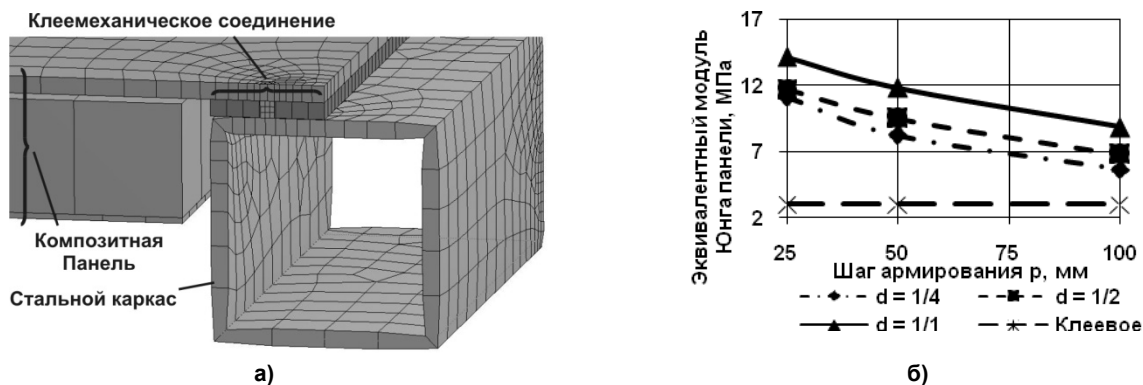


Рис. 2. МКЭ моделирование кузова трамвайного вагона:
а – МКЭ-модель типовой панели; б – модуль Юнга эквивалентной обшивки

В критической зоне использована подробная МКЭ-модель типовой панели, совмещенная со своим границам с МКЭ-моделью кузова. При совмещении использованы два метода (рис. 3):

- метод слияния узлов конечно-элементной сетки для эквивалентной оболочечной обшивки кузова;
- встроенный в пакет ANSYS контактный алгоритм для сопряжения балочного и оболочечного каркасов МКЭ-моделей кузова и типовой панели соответственно.

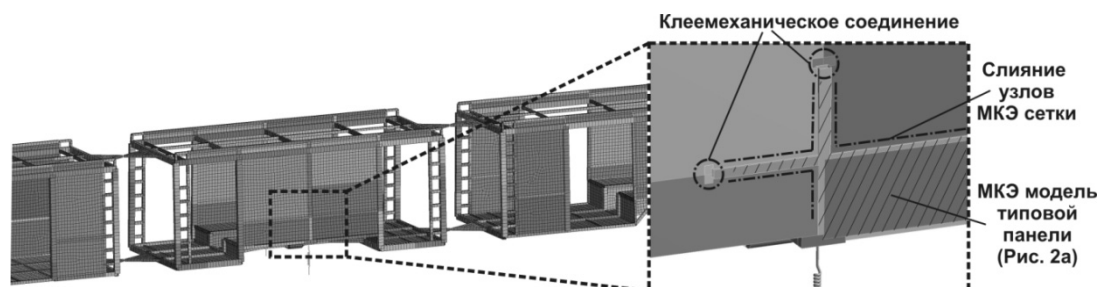


Рис. 3. Сопряжение МКЭ моделей кузова и типовой панели

Был выполнен ряд расчетов с различными размерами конечных элементов. В результате сопоставления результатов определены размеры КЭ, обеспечивающие достаточную для целей проектирования точность расчетов (отклонение по величинам напряжений не более 5 % от решения, к которому стремится модель при дальнейшем измельчении конечных элементов).

В расчете использованы изотропные модели линейного упругого деформирования материалов. Для хаотически армированного стеклопластика обшивок сэндвич-панелей использовано свойство псевдоизотропности.

Расчет напряженно-деформированного состояния проведен для режима II «Норм для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм» [23] – разгон / торможение на криволинейном участке пути. Расчетное исследование показало, что каркас передает на панели лишь сдвиговую часть общей нагрузки, а в случае максимальной толщины клея каркас вынужден сам воспринимать сдвиг, что вызывает в нем возникновение значительных напряжений, резко снижающих долговечность.

Анализ величины максимальных эквивалентных напряжений в нагруженном элементе каркаса от толщины клеевого слоя (критическая область, рис. 1) показал, что перепад толщины клеевого шва величиной 5 мм для соседних панелей приводит к снижению напряжений в наружной обшивке панели на 65 % и повышению напряжений в основных несущих трубах каркаса на 20 % по сравнению с ситуацией, в которой те же швы имеют постоянную толщину (рис. 4). Таким образом,

Расчет и конструирование

переменные зазоры между панелями и каркасом оказывают существенный негативный эффект на несущую способность кузова за счет неравномерного распределения нагрузок в конструкции.

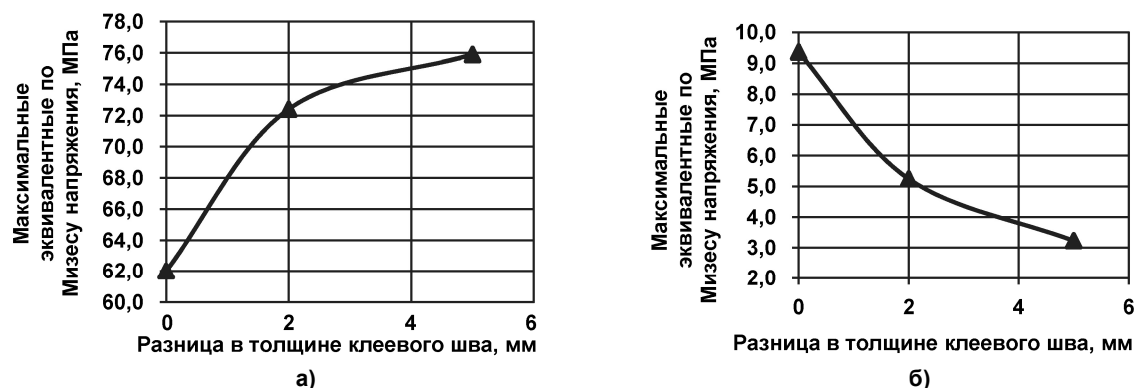


Рис. 4. Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в основных несущих трубах каркаса (а) и во внешней обшивке панелей (б) в зависимости от разницы толщины клеевого шва между соседними панелями

2. Концепция управления жесткостью клеевых соединений каркасно-панельного кузова

Высокие требования к долговечности конструкции кузова при его минимальном весе требуют выравнивания отмеченных в первой части нагрузок на композитные панели и каркас за счет регулирования жесткости клеевого шва переменной толщины. В данной работе предложена новая концепция управления жесткостью при помощи самонарезающих винтов малого диаметра.

В рассматриваемом примере использование в критической области (см. рис. 1) клеємеханических соединений с шагом армирования $p = 25 \dots 50$ мм приведет к 40 % снижению максимальных напряжений в основных несущих трубах стального каркаса. При этом дополнительный эффект будет достигнут не только за счет выравнивания, но и за счет значительного возрастания жесткости соединений каркаса и панелей.

Концепция управления жесткостью реализована за счет использования разработанных ниже номограмм, связывающих между собой толщину клеевого слоя (h , мм), шаг армирования самонарезающими винтами (p , мм) и погонную жесткость соединения (C_l , Н/мм²), определяемую в расчете на единицу длины соединения.

Аналитические зависимости, положенные в основу номограмм, получены с использованием допущения о том, что клеємеханическое соединение может быть разбито на два параллельно работающих компонента, связанных с клеевым слоем и самонарезающими винтами соответственно:

$$C_l = C_z + C_b = \frac{C_{sc}(h)}{p} + \frac{b \cdot G}{h}, \quad (\text{Н/мм}^2), \quad (1)$$

где C_z – погонная жесткость механической части соединения, Н/мм²;

C_b – погонная жесткость клеевой части соединения, Н/мм²;

C_{sc} – жесткость только механического соединения с одним самонарезающим винтом из испытаний, Н/мм;

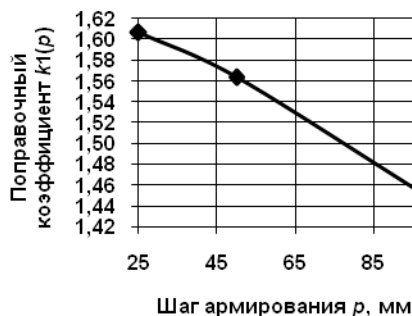
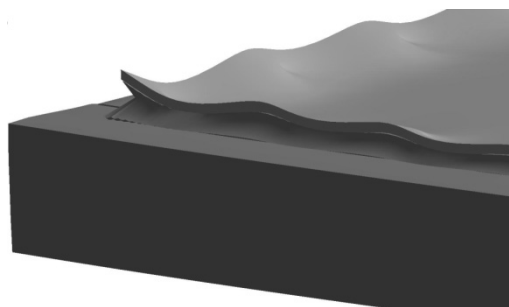
b – ширина нахлесточного клеємеханического соединения, мм;

G – модуль сдвига клеевого слоя, МПа.

Жесткость механического соединения с одним самонарезающим винтом описывается аппроксимирующей зависимостью, полученной на основе результатов испытаний механических соединений, армированных самонарезающими винтами:

$$C_{sc}(h) = \frac{50}{1,354 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 + 0,0145}, \quad (\text{Н/мм}). \quad (2)$$

Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что выражение (1) требует введения поправочного коэффициента $k_1(p) = 1,45 \dots 1,60$, необходимого для учета дополнительного локального деформирования (изгиб панели и винтов) в зоне соединений при сдвиге натурной конструкции (рис. 5). Отмеченный изгиб приводит к значительному увеличению суммарной упругой энергии деформирования соединений. Расчетные исследования показали, что величина коэффициента $k_1(p)$ меняется незначительно: менее 10 % при увеличении шага армирования p от 25 до 100 мм. В связи с этим, для решения задач управления жесткостью им можно пренебречь.



а)

б)

Рис. 5. Локальное деформирование (а) и связанный с ним поправочный коэффициент (б) для клеемеханических соединений между панелями и каркасом

Разработанные номограммы (рис. 6, а) позволяют определять требуемый шаг армирования при заданной толщине клеевого слоя и жесткости соединения.

3. Методика проектирования каркасно-панельной конструкции

На описанном выше примере кузова трамвайного вагона отработана методика проектирования каркасно-панельной конструкции. Методика включает в себя следующие этапы.

1. Исходя из измеренных значений толщины клеевых швов натурной конструкции, производится процедура управления жесткостью, описанная в предыдущем разделе. В результате подбирается шаг армирования самонарезающими винтами p , обеспечивающий выравнивание жесткости клеевых соединений в наиболее нагруженных зонах конструкции.

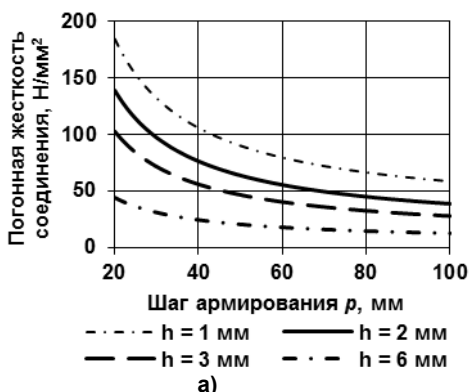


Рис. 6. Номограммы погонной жесткости клеемеханических соединений (а) и поправочный коэффициент по локальной нагрузке $k_2(d)$ (б)

2. Производится расчет напряженно-деформированного состояния конструкции при помощи МКЭ-модели кузова с эквивалентной обшивкой по режимам I (аварийный) и II (эксплуатационный) «Норм для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм». При этом МКЭ-модель кузова имеет более простую структуру по сравнению с натурной конструкцией, что позволяет значительно снизить вычислительную трудоемкость задачи.

3. По каждому режиму согласно заданному шагу армирования p (мм) вычисляются сдвиговые усилия в зоне центрального армирующего элемента на длинных сторонах панелей (рис. 7). Отмеченный элемент является наиболее нагруженным из всех элементов соединения, таким образом, для остальных элементов будет получена оценка в запас прочности.

Для вычисления сдвиговых усилий используются эпюры касательных напряжений в плоскости панелей (рис. 8, а), построенные по соответствующим граням панелей эквивалентной обшивки МКЭ модели кузова. Выражение для вычисления сдвиговых усилий выглядит следующим образом:

$$F_0 = t \cdot \int_{X_0-p/2}^{X_0+p/2} \tau(X) dX, \tag{3}$$

Расчет и конструирование

где $t = 3$ (мм) – толщина эквивалентной обшивки;

$\tau(X)$ – эпюра касательных напряжений (см. рис. 8, а), построенная по координате X , МПа (см. рис. 7);

X_0 – координата расположения центрального армирующего элемента, мм (см. рис. 7).

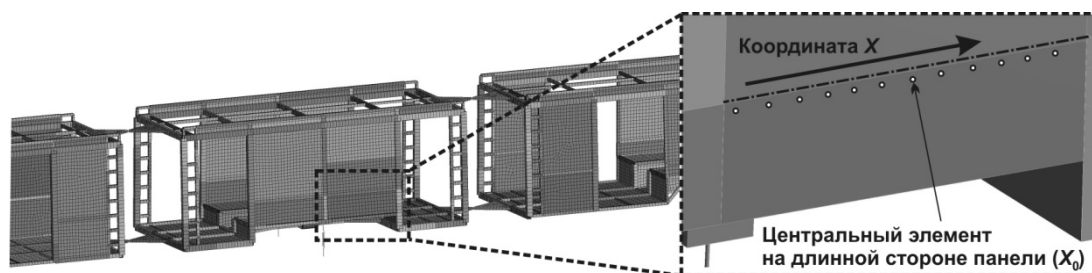


Рис. 7. Определение нагруженности клеемеханических соединений в составе каркасно-панельного кузова

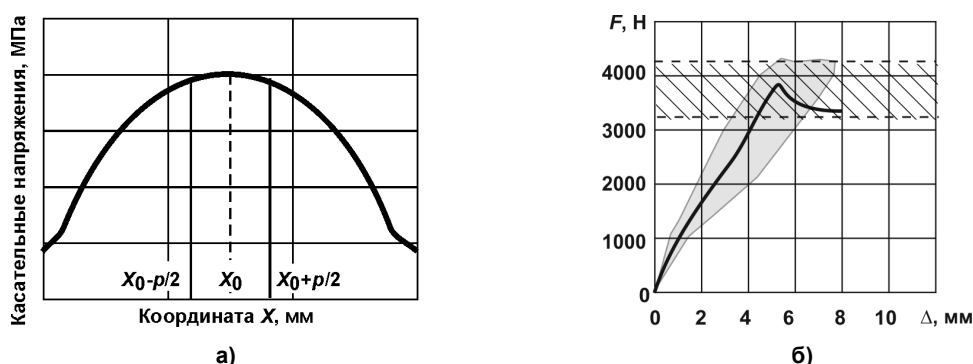


Рис. 8. Эпюра касательных напряжений, построенная по грани панели (а) и расчетная диаграмма статического деформирования клеемеханического соединения армированного самонарезающими винтами (б, линия – расчет, закрашенная и заштрихованная области – разброс экспериментальных данных)

4. Сдвиговая нагрузка, полученная по формуле (3) по каждому из режимов, уточняется с использованием коэффициентов $k_2(d)$, k_3 :

$$F = F_0 \cdot k_2(d) \cdot k_3. \quad (4)$$

Коэффициент $k_2(d)$ имеет смысл коэффициента концентрации напряжений, связанного с учетом особенностей работы клеемеханических соединений в натурной конструкции (рис. 5, а). Зависимость величины коэффициента $k_2(d)$ (рис. 6, б) от соотношения длинной и короткой сторон панели определена из анализа распределения сдвиговых усилий в детализированной МКЭ-модели, работающей на сдвиг. Анализ показал, что при значениях $d = 3 \dots 4$ жесткость каркаса резко возрастает, так как трубы, формирующие его короткую сторону, начинают работать не только на изгиб, но и на сдвиг за счет малого отношения длины к характерному размеру поперечного сечения. Это вызывает перераспределение нагрузок в натурной конструкции, отличающееся от того, что наблюдается в более простой МКЭ модели кузова, в которой эквивалентная обшивка и каркас абсолютно жестко связаны между собой.

Коэффициент $k_3 = 1,42$ использован для учета гигротермальных эффектов при эксплуатации транспортного средства (снижение прочности) и определен на основе анализа имеющихся в литературе оценок снижения прочности клеемеханических соединений под воздействием климатических факторов внешней среды.

5. Полученное сдвиговое усилие по режиму I подставляется в расчетную диаграмму деформирования соединения с одним винтом. Для расчета диаграммы используется разработанная автором МКЭ-модель соответствующего соединения, учитывающая нелинейность механического поведения материалов и концентрацию напряжений в области отверстий под армирующие элементы [24]. Проверяется статическая прочность соединения. На рис. 8, б показана расчетная диаграмма клеемеханического соединения, армированного четырьмя самонарезающими винтами, и соответствующие экспериментальные данные.

6. Полученное сдвиговое усилие по режиму II принимается за амплитуду циклической на-

грузки в конструкции и подставляется в соответствующее уравнение, позволяющее получить количество циклов до наступления предельного состояния, то есть оценить долговечность соединений. Уравнение получено аппроксимацией результатов испытаний образцов соединений в условиях малоциклового сдвигового нагружения (от $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$ циклов) [23] и имеет вид:

$$N(F) = \frac{15}{1,823 \cdot 10^{-15} \cdot F^{5,312}}, \quad (5)$$

где N – количество циклов до наступления предельного состояния;

F – амплитуда циклической сдвиговой нагрузки (Н).

7. При выбранных параметрах типовой панели и полученных значениях статической, циклической прочности соединений, величина приведенных напряжений в композитных обшивках и заполнителе гарантированно не будет превышать предела пропорциональности. Кроме того, назначенная толщина заполнителя обеспечивает необходимый запас устойчивости панели относительно критических для соединений сдвиговых нагрузок. В связи с этим оценка прочности и устойчивости панели в критических зонах может не проводиться. Такая ситуация обусловлена следующими факторами:

– панели выполняют роль функциональных элементов, обеспечивающих не только сдвиговую прочность конструкции кузова, но и его тепло-, шумоизоляцию [2];

– панели выполняют роль несущих элементов при трансверсальном локальном нагружении обшивки кузова (низкоскоростной удар) и должны выдерживать значительные нагрузки [13–14].

Данные факторы приводят к значениям толщин обшивок и заполнителя, обеспечивающим избыточную сдвиговую прочность и устойчивость панели.

8. Производится оценка прочности стального каркаса согласно указанным Нормам.

9. В случае невыполнения того или иного критерия прочности цикл проектирования повторяется при измененном шаге армирования p . Практика расчетов показала, что достаточно 2-3 итераций для получения решения, удовлетворяющего критериям прочности.

Выводы

В представленной работе предложен новый подход к проектированию длинномерных каркасно-панельных кузовов транспортных средств заданной долговечности с применением соединений на эластичных клеях с трансверсальным армированием.

На примере каркасно-панельной конструкции кузова трамвайного вагона показано, что переменные зазоры (1...6 мм) между панелями и каркасом оказывают существенный негативный эффект на несущую способность кузова за счет неравномерного распределения нагрузок в конструкции. Предложена новая концепция управления жесткостью соединений каркаса и обшивки, имеющих существенные отклонения от проектной геометрии, при помощи самонарезающих винтов малого диаметра.

Концепция реализована за счет использования разработанных номограмм, связывающих между собой толщину клеевого слоя, шаг армирования самонарезающими винтами и погонную жесткость соединения, определяемую в расчете на единицу длины соединения. Номограммы позволяют определять требуемый шаг армирования при заданной толщине клеевого слоя и жесткости соединения.

На примере кузова трамвайного вагона отработана методика проектирования с использованием отмеченных номограмм. После подбора необходимого шага армирования в рамках методики производится оценка нагруженности армированных соединений и каркаса. Нагрузки определяются с помощью упрощенной МКЭ-модели кузова и поправочных коэффициентов, вычисленных на основе подробного МКЭ-моделирования типовых каркасно-панельных конструкций. Проверка статической прочности и долговечности соединений реализована, соответственно, на основе верифицированных МКЭ-моделей армированных соединений и аналитических экспериментальных зависимостей.

Литература

1. Cantor, B. *Automotive engineering: lightweight, functional and novel materials* / B. Cantor, P. Grant, C. Johnston. – New-York: CRC Press, 2008. – 278 p.

2. Vaidya, U. *Composites for Automotive, Truck and Mass Transit* / U. Vaidya. – Lancaster: DEStech Publications, 2011. – 419 p.

3. *New Trends and Developments in Automotive Industry* / ed. M. Chiaberge. – Rijeka: InTech, 2011. – 394 p.

Расчет и конструирование

4. *Polymer composites for automotive sustainability* / J. Komornicki, L. Bax, H. Vasiliadis, K. Ong. – Brussels: SusChem, 2015. – 54 p.
5. Иванов, А.М. Основы конструкции автомобиля / А.М. Иванов, А.Н. Солнцев, В.В. Гаевский. – М.: Кн. изд-во «За рулем», 2005. – 336 с.
6. Ксенович, И.П. Наземные тягово-транспортные системы: в 3 т. / И.П. Ксенович, В.А. Гоберман, Л.А. Гоберман. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 878 с.
7. *Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: final report*. – Washington: Federal Railroad Administration, 2014. – 96 p.
8. Евграфов, А.Н. Аэродинамика автомобиля: учеб. пособие / А.Н. Евграфов. – М.: МГИУ, 2010. – 356 с.
9. Joost, W.J. *Reducing Vehicle Weight and Improving U.S. Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering* / W.J. Joost // JOM. – 2012. – Vol. 64, № 9. – P. 1032–1038.
10. Lee, W.G. *The Next Generation Material for Lightweight Railway Car Body Structures: Magnesium Alloys* / W.G. Lee // Proceedings of IMechE. – 2016. – Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – P. 1–18.
11. Вагоны / Л.Д. Кузьмич, А.В. Кузнецов, Б.А. Ржавинский и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 376 с.
12. Heller, P. *Hybrid Body of Underground Railway Car: Path Towards Reduced Weight of Rail Vehicles* / P. Heller, J. Korinek, L. Triska // Modern Machinery Science J. – 2015. – P. 631–634.
13. *Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle* / H. Ning, G.M. Janowski, U.K. Vaidya, G. Husman // J. Composite structures. – 2007. – № 80. – P. 82–91.
14. Shin, K.B. *An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus* / K.B. Shin, J.Y. Lee, S.H. Cho // J. Composite Structures. – 2008. – № 84. – P. 228–240.
15. Langan, T. *High-Strength, Lightweight Car Bodies for High-Speed Rail Vehicles: final Report for High-Speed Rail IDEA Project 32* / T. Langan, W.M. Buchta. – Baltimore: Surface Treatment Technologies, 2003. – 24 p.
16. Kim, J.-S. *Manufacturing and Structural Safety Evaluation of a Composite Train Car Body* / J.-S. Kim, S.-J. Lee, K.-B. Shin // J. Composite Structures. – 2007. – № 78. – P. 468–476.
17. Harte, A.M. *A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light Rail Vehicle Bodyshell* / A.M. Harte, J.F. McNamara, I.D. Roddy // J. Composite Structures. – 2014. – № 63. – P. 447–453.
18. Kelly, G. *Quasi-static Strength and Fatigue Life of Hybrid (Bonded/Bolted) composite single-lap joints* / G. Kelly // J. Composite Structures. – 2006. – Vol. 72. – P. 119–129.
19. Heslehurst, R. *Design and Analysis of Structural Joints with Composite Materials* / R. Heslehurst. – Lancaster: DEStech Publications, 2013. – 464 p.
20. Di Franco, G. *Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks* / G. Di Franco, L. Fratini, A. Pasta // International Journal of Adhesion & Adhesives. – 2013. – Vol. 41. – P. 24–32.
21. Шакиров, А.А. Повышение жесткости нахлесточных клеємеханических соединений, армированных самонарезающими винтами / А.А. Шакиров, Р.Г. Халилова, С.Б. Сапожников // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 30–36.
22. Шакиров, А.А. Работоспособность нахлесточных клеємеханических соединений при циклическом растяжении-сжатии / А.А. Шакиров, С.Б. Сапожников, С.В. Словиков // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 70–79.
23. *Нормы для расчета и проектирования механической части новых вагонов трамвая колеи 1524 мм: утв. М-вом тяжелого машиностроения СССР 26.12.1989: введ. в действие 01.07.1990*. – М.: ВНИИВ, 1989. – 100 с.
24. Sapozhnikov, S. *Transverse reinforcement of adhesive joints* / S.B. Sapozhnikov, A.A. Shakirov // J. Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 209–214.

Шакиров Александр Александрович, аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shakirov.cmi@gmail.com.

Поступила в редакцию 19 июля 2016 г.

STRENGTH/WEIGHT RATIO IMPROVEMENT FOR HYBRID FRAME-PANEL CAR BODIES USING JOINTS WITH CONTROLLED SHEAR STIFFNESS

A.A. Shakirov, shakirov.cmi@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper presents a new approach for design of long-length car bodies with predetermined fatigue strength, which utilizing bonded joints with low-modulus adhesives and transversal reinforcement.

Ready-to-use composite sandwich panels with GFRP skins are bonded into a metal frame during the production process of a frame-panel car body. Joints used for this process can be classified as single-lap ones.

High requirements for strength/weight ratios of modern car bodies demand smoothing the loads on panels and a frame, especially in the case of steel frames with significant deviations from ideal design geometry (alternating gaps between frame and panels). Smoothing can be satisfied by means of stiffness control of bond lines with alternating thickness. The new conception of stiffness control by using of small diameter self-tapping screws is proposed.

The conception implemented by usage of developed nomograms, which relates bond line thickness, reinforcement pitch (distance between reinforcement elements) and shear stiffness per unit length of lap joints. The nomograms allow determining reinforcement pitch in respect with given both a bond line thickness and a shear stiffness of joints.

The mentioned design approach is demonstrated on the example of a low-floor tram car body. After the determination of a reinforcement pitch the appropriate estimation of loads on joints and frame is carried out. Loads obtained from simplified FE car body model and refined by usage special adjustment factors, which calculated on the base of detailed FE modeling of typical frame-panel structures. The static and fatigue strength analysis performed by verified FE models of bonded/screwed joints and analytical experimental dependencies respectively.

Keywords: hybrid frame-panel car body, composite sandwich panel, hybrid single-lap joint, self-tapping screw, stiffness control.

References

1. Cantor B., Grant P., Johnson C. *Automotive Engineering: Lightweight, Functional and Novel Materials*. New-York, CRC Press, 2008. 278 p.
2. Vaidya U. *Composites for Automotive, Truck and Mass Transit*. Lancaster, DEStech Publications, 2011. 419 p.
3. Chiaberge M. *New Trends and Developments in Automotive Industry*. Rijeka, InTech, 2011. 394 p.
4. Komornicki J., Bax L., Vasiliadis H., Ong K. *Polymer Composites for Automotive Sustainability*. Belgium, SusChem, 2015. 54 p.
5. Ivanov A.M., Solncev A.N., Gayevskiy V.V. *Osnovy konstruktсии avtomobilya* [Fundamentals of Car Design]. Moscow, Behind a Wheel publications, 2005. 336 p.
6. Ksenevich I.P., Goberman V.A., Goberman L.A. *Nazemnyye tyagovo-transportnyye sistemy* [Ground Traction-Transportation Systems]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2003, vol. 2. 878 p.
7. *Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency. Final Report*. Washington, Federal Railroad Administration, 2014. 96 p.
8. Evgrafov A.N. *Aerodinamika avtomobilya: uchebnoye posobiye* [Aerodynamics of a Car: Study Guide]. Moscow, MGIU, 2010. 356 p.
9. Joost W.J. Reducing Vehicle Weight and Improving U.S. Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering. *JOM*, 2012, vol. 64, no. 9, pp. 1032–1038. DOI: 10.1007/s11837-012-0424-z
10. Lee W. G. The Next Generation Material for Lightweight Railway Car Body Structures: Magnesium Alloys. *Proceedings of IMechE*. Part F: J. of Rail and Rapid Transit, 2016, pp. 1–18. DOI: 10.1177/0954409716646140

11. Kuz'mich L.D., Kuznetsov A.V., Rzhavinskiy B.A. *Vagony* [Train cars]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1978. 376 p.
12. Heller P., Korinek J., Triska L. Hybrid Body of Underground Railway Car: Path Towards Reduced Weight of Rail Vehicles. *Modern Machinery Science J.*, 2015, October, pp. 631–634. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201514
13. Ning H., Janowski G.M., Vaidya U.K., Husman G. Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle. *J. Composite structures*, 2007, no. 80, pp. 82–91. DOI:10.1016/j.compstruct.2006.04.090
14. Shin K.B., Lee J.Y., Cho S.H. An Experimental Study of Low-Velocity Impact Responses of Sandwich Panels for Korean Low Floor Bus. *J. Composite Structures*, 2008, no. 84, pp. 228–240. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.04.090
15. Langan T., Buchta W.M. *High-Strength, Lightweight Car Bodies for High-Speed Rail Vehicles: final Report for High-Speed Rail IDEA Project 32*. Baltimore, Surface Treatment Technologies, 2003. 24 p.
16. Kim J.-S., Lee S.-J. Shin K.-B. Manufacturing and Structural Safety Evaluation of a Composite Train Car body. *J. Composite Structures*, 2007, no. 78, pp. 468–476. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.11.006
17. Harte A.M., McNamara J.F., Roddy I.D. A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light Rail Vehicle Bodyshell. *J. Composite Structures*, 2004, no. 63, pp. 447–453. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00193-4
18. Kelly G. Quasi-static Strength and Fatigue Life of Hybrid (Bonded/Bolted) composite single-lap joints. *J. Composite Structures*, 2006, vol. 72, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.11.002
19. Heslehurst R. *Design and Analysis of Structural Joints with Composite Materials*. Lancaster, DEStech Publications, 2013. 464 p.
20. Di Franco G., Fratini L., Pasta A. Analysis of the Mechanical Performance of Hybrid (SPR/Bonded) Single-Lap Joints Between CFRP Panels and Aluminum Blanks. *J. International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2013, vol. 41, pp. 24–32. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2012.10.008
21. Shakirov A.A., Khalilova R.G., Sapozhnikov S.B. [Stiffening of Single-Lap Hybrid Joints Reinforced with Self-Tapped Screws]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 30–36. (in Russ.)
22. Shakirov A.A., Sapozhnikov S.B., Slovikov S.V. [Efficiency of Single-Lap Hybrid Screwed/Bonded Joints Under Cyclic Tension-Compression]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 30–36. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin150408
23. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya mekhanicheskoy chasti novykh vagonov tramvaya kolei 1524 mm* [Codes for analysis and design of mechanical parts of new tram cars for rail gauge 1524 mm]. Moscow, VNIIV, 1989. 100 p.
24. Sapozhnikov S.B., Shakirov A.A. Transverse reinforcement of adhesive joints. *J. Mechanics of Composite Materials*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 209–214. DOI: 10.1007/s11029-015-9491-x

Received 19 July 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шакиров, А.А. Повышение весовой эффективности гибридных каркасно-панельных кузовов за счет соединений с управляемой сдвиговой жесткостью / А.А. Шакиров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 5–14. DOI: 10.14529/engin160301

FOR CITATION

Shakirov A.A. Strength/Weight Ratio Improvement for Hybrid Frame-Panel Car Bodies Using Joints with Controlled Shear Stiffness. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 5–14. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160301