

МКЭ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОБШИВОК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С.Б. Сапожников, А.А. Шакиров, Р.Р. Абдрахимов

Рассмотрены методы конечно-элементного моделирования силовых обшивок транспортных средств, изготовленных из сэндвич-панелей. Расчетный анализ позволил определить диапазон рациональной толщины клеевого слоя в соединении сэндвич-панелей и металлического каркаса транспортного средства. Сравнительно низкий модуль упругости клея обеспечивает прочность стеклопластика в соединении со стальным каркасом как в плоскости панели, так и в трансверсальном направлении.

Ключевые слова: методы конечно-элементного моделирования, сэндвич-панель, силовая обшивка, транспортные средства, низкомодульный клей.

Введение

В современном транспортном машиностроении существуют решения, позволяющие существенно снизить массу всей конструкции за счет использования в составе кузова силовой обшивки из композитных сэндвич-панелей [1, 3]. Анализ показывает, что применение силовой обшивки наиболее целесообразно в том случае, когда она воспринимает преимущественно сдвиговые нагрузки кузова транспортного средства, связанные с циклами торможения и разгона, вывешиванием рамы при наезде на препятствие одним колесом и т. д.

Для обеспечения требуемых условий нагружения обшивки, а также в связи с тенденцией к унификации технологий в машиностроении, по аналогии с элементами остекления, композитные сэндвич-панели обшивки вклеиваются в металлический каркас кузова. При этом важным условием является использование низкомодульного (например, эластомерного) клея.

При расчетах методом конечных элементов (МКЭ) конструкции транспортного средства в целом трудности определения напряженно-деформированного состояния существенно возрастают из-за наличия в ней материалов с различающимися на много порядков модулями упругости, а также из-за взаимодействия тонких элементов с крупногабаритной конструкцией кузова. Все это заставляет резко увеличивать размерность задачи, приводя к необходимости использования высокопроизводительных многопроцессорных кластеров, что на этапе эскизного проектирования неоправданно.

Данная работа посвящена методам конечно-элементного моделирования кузова с силовой композитной обшивкой, позволяющим существенно снизить размерность задачи без потерь в точности решения. Также рассмотрены вопросы рационального проектирования силовых обшивок транспортных средств, в частности, изучения влияния толщины низкомодульного клеевого слоя на напряженно-деформированное состояние силовой обшивки и сварных соединений металлического каркаса в условиях сдвига.

Метод конечно-элементного моделирования силовой обшивки трамвайного вагона

Методы конечно-элементного моделирования раскрыты на примере расчетов в конечно-элементном пакете ANSYS силовой композитной обшивки из сэндвич-панелей для кузова трамвайного вагона.

Ввиду большой вычислительной сложности задача решалась в два этапа:

- расчет трамвайного вагона в целом (моделирование конструкции производилось при помощи оболочечных и балочных конечных элементов типа shell и beam);
- применение метода подконструкций, заключающегося в расчете детализированных конечно-элементных моделей элементов силовой обшивки пола, боковин, крыши (включая композитную обшивку, клей и металлический каркас). Нагрузки при детализированном расчете переносили из результатов расчета, проведенного на первом этапе [4]. Для моделирования использовали конечные элементы типа Shell и Solid.

Для учета особенностей механического поведения эластомерного клея при больших деформациях использовали гиперупругую модель материала типа Муни-Ривлина [2].

Общая КЭ модель конструкции кузова с композитной силовой обшивкой

В расчетной модели каркас трамвайного вагона выполнен балочными конечными элементами типа BEAM188, для которых было задано соответствующее сечение коробчатого профиля. Узловые точки соединений балочных элементов заданы как точки пересечения нейтральных осей поперечных сечений элементов.



Рис. 1. Схема нагружения представителя элемента каркаса кузова с силовой обшивкой

Основной особенностью данной модели является то, что элементы окон, дверей и обшивки были заменены на пластины с эквивалентными характеристиками. Предварительно определенные на представительном элементе каркаса (в соответствии с рис. 1) эквивалентные характеристики (модуль упругости и толщина) позволяют достигать соответствия перемещений и напряжений в металлическом каркасе трамвая при упрощенном (клей и наполнитель отсутствуют) и точном (клей и наполнитель присутствуют) моделировании композитной силовой обшивки. Готовая к использованию общая конечно-элементная модель кузова трамвайного вагона представлена на рис. 2.

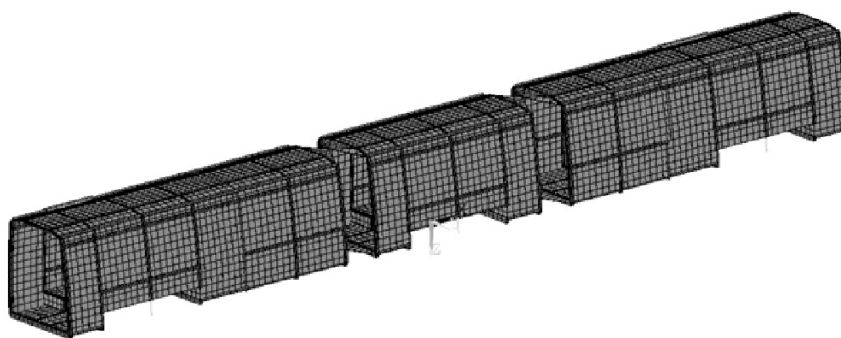
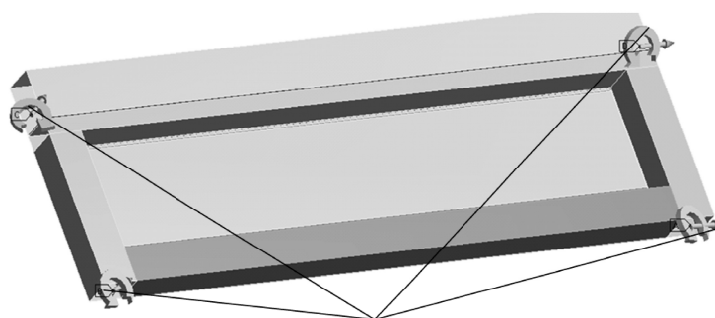


Рис. 2. Общая конечно-элементная модель кузова трамвайного вагона

КЭ модель кузова с композитной силовой обшивкой для метода подконструкций

Элементы силовой обшивки моделировали при помощи плоских оболочечных конечных элементов типа shell (для труб металлического каркаса и стеклопластика сандвич-панели) и объемных квадратичных элементов типа solid для клея и наполнителя.

Типичная конечно-элементная модель, используемая при расчете методом подконструкций, показана на рис. 3. Нагрузки на модель подконструкции служили перемещения узлов соедине-



Перемещения узлов соединений элементов металлического каркаса

Рис. 3. Схема нагружения представителя элемента каркаса кузова с силовой обшивкой

Расчет и конструирование

ний элементов металлического каркаса (рис. 3), а также внешние нагрузки (давление, ускорение), взятые из расчетов полной модели.

Для более точного моделирования изгиба было взято два элемента типа Solid по толщине клея и наполнителя.

Анализ влияния толщины клеевого слоя на механическое поведение силовой обшивки из сэндвич-панелей

Как было отмечено выше, особый интерес при проектировании силовой композитной обшивки транспортных средств представляет выбор толщины клеевого слоя, который влияет как на жесткость конструкции, так и на величину максимальных напряжений в металлическом каркасе, клеевом слое и композитной сэндвич-панели.

Ниже представлен анализ изменения жесткости представительного элемента конструкции при нагружении сдвигом. Геометрические параметры и свойства материала исследуемого элемента представлены на рис. 4 и таблице соответственно. Схема нагружения представлена на рис. 1.

Результаты расчетного анализа напряжений показаны на рис. 5–6.

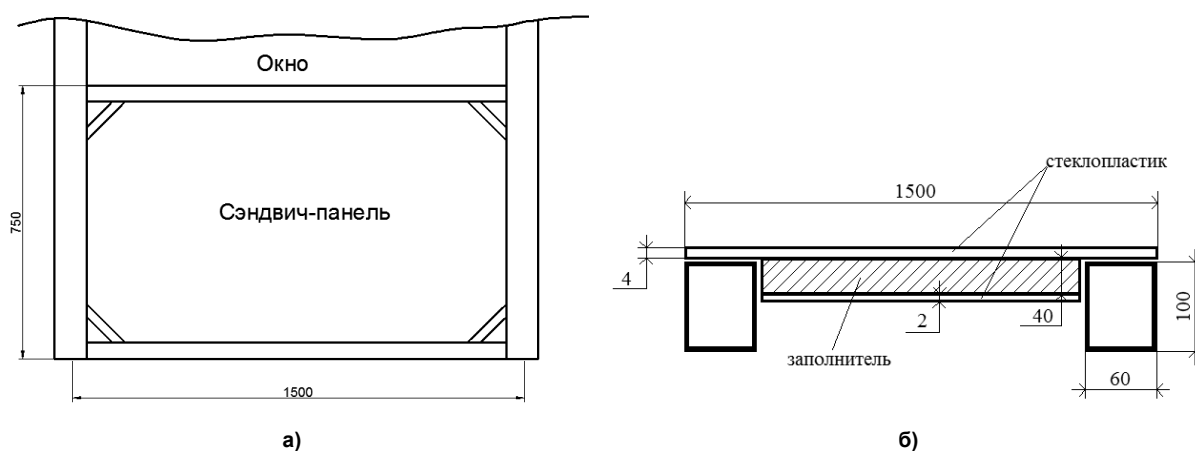


Рис. 4. Геометрические размеры представительного элемента конструкции силовой обшивки трамвайного вагона: а – вид спереди в составе боковины; б – вид сверху, поперечные балки (100×60×3) убраны для наглядности

Свойства используемых материалов в боковом элементе трамвая

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости E , 10 ⁹ Па	Коэффициент Пуассона, μ
Сталь 3	7800	200	0,3
Хаотически армированный стеклопластик	1800	15	0,15
Пенополиуретан (заполнитель)	250	0,25	0,15

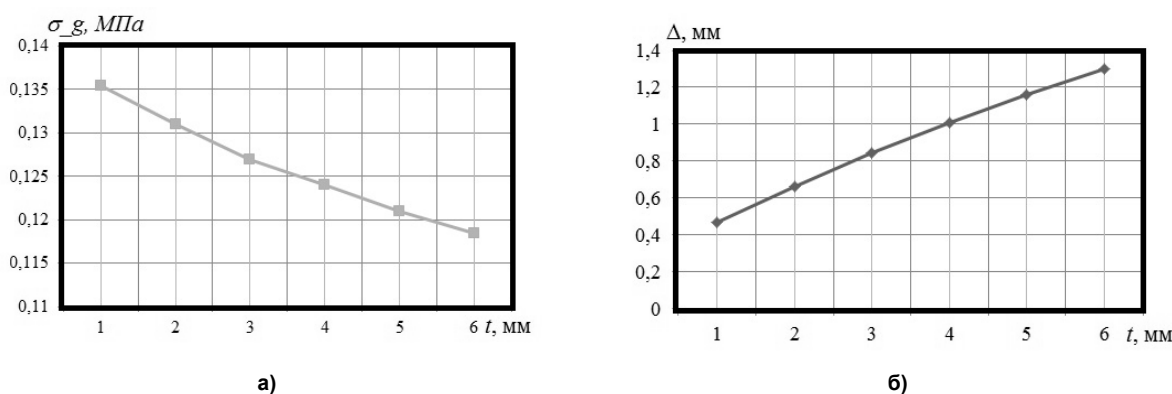


Рис. 5. Зависимость максимальной величины: а – эквивалентных по Мизесу напряжений (σ_g) в клеевом слое представительного элемента конструкции силовой обшивки от толщины клеевого слоя (t); б – перемещений в стальном каркасе представительного элемента конструкции силовой обшивки (Δ) от толщины клеевого слоя (t)

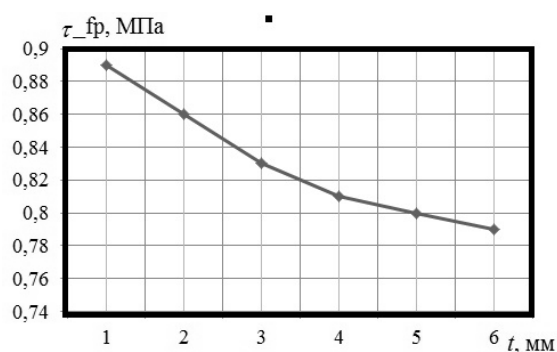


Рис. 6. Зависимость максимальной величины касательных напряжений (τ_{fp}) в стеклопластиковых обшивках сэндвич-панели представительного элемента конструкции силовой обшивки, от толщины клеевого слоя (t)

Получено, что при увеличении толщины клеевого слоя с 1 до 6 мм жесткость конструкции снижается более чем в 2,5 раза при том, что максимальные напряжения в стеклопластике обшивки и в клеевом слое снижаются лишь на 11 и 12 % соответственно. Таким образом, рационально добиваться как можно меньшей толщины клеевого слоя, исходя из конструктивных и технологических требований к элементам конструкции обшивки.

Выводы

Расчетный анализ показал перспективность использования эластомерного клея и стеклопластика в конструкции сэндвич-панелей. Сравнительно низкий модуль упругости клея обеспечивает прочность стеклопластика в соединении со стальным каркасом как в плоскости панели, так и в трансверсальном направлении.

Рационально подобранное сочетание толщины клеевого слоя и его упругих механических характеристик помогает требуемым образом перераспределять нагрузки между панелями обшивки и металлическим каркасом при работе на растяжение-сжатие и на сдвиг, обеспечивая высокую прочность сэндвич-панелей и сварных соединений металлического каркаса.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда энергосберегающих низкопольных трамвайных вагонов модульной конструкции» по договору № 02.G36.31.0002 от 12.02.2013 г.

Литература

1. Vaidya, U. *Composites for Automotive, Truck and Mass Transit: Materials, Design and Manufacturing* / U. Vaidya. – Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2010. – P. 433.
2. Mooney, M. *A theory of large elastic deformation* / M. Mooney // *Journal of Applied Physics*. – 1940. – Vol. 11 (9). – P. 582–592.
3. Barbero, E.J. *Finite Element Analysis of Composite Materials* / E.J. Barbero. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 331 p.
4. Fenner, R.T. *Finite Elements Methods for Engineers* / R.T. Fenner. – London: Imperial College Press, 1996. – 171 p.

Сапожников Сергей Борисович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» физического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ssb@susu.ac.ru.

Шакиров Александр Александрович. Аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» физического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск).

Абдрахимов Руслан Рамильевич. Аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» физического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск).

FEA-SIMULATION OF COMPOSITE SHELLS FOR VEHICLES

*S.B. Sapozhnikov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ssb@susu.ac.ru,
A.A. Shakirov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
R.R. Abdrahimov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The paper discusses methods for finite-element modeling of sandwich panels used in its shells for vehicles. Finite-element analysis allowed us to determine the range of rational thickness range of the adhesive layer in the joints of sandwich panels and a metal frame. Relatively low modulus of the adhesive provides the strength of GFRP in conjunction with a steel frame in the plane of a panel and in the transverse direction.

Keywords: FEA-simulation, sandwich panel, power skin, vehicle, low modulus adhesive.

Поступила в редакцию 29 августа 2013 г.