

Научная статья  
УДК 629.33 : 621.763

## Перспективы использования технологии композитных сэндвич-структур в автомобилестроении с учётом опыта применения в авиастроении

Александр Михайлович Колесников<sup>1</sup>, Данил Сергеевич Джабаров<sup>2</sup>

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

<sup>1</sup> 28.01.2002@mail.ru

<sup>2</sup> dcer2003@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена анализу перспектив адаптации технологии сэндвич-выклейки композитных материалов из авиастроения в автомобилестроение. Рассматриваются ключевые преимущества сэндвич-конструкций, включая высокое отношение жёсткости к массе, что является критически важным для современных транспортных средств с точки зрения повышения энергоэффективности и снижения расхода топлива. Освещены основные компоненты сэндвич-панелей – обшивки и сердечники, а также возможности их оптимизации для автомобильной промышленности: подбор материалов, варьирование толщины слоёв и структуры сердечника. На основе анализа авиационного опыта показана экономическая и техническая целесообразность внедрения данных технологий в автомобилестроении, особенно для электромобилей (снижение массы батареи и увеличение запаса хода).

**Ключевые слова:** сэндвич-конструкция, композитные материалы, автомобилестроение, сэндвич-выклейка, углеволокно, вспенённый алюминий, безавтоклавные технологии, электромобили

**Для цитирования:** Колесников А.М., Джабаров Д.С. Перспективы использования технологии композитных сэндвич-структур в автомобилестроении с учётом опыта применения в авиастроении // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

Original article

## Prospects for the use of composite sandwich lay-up technology in the automotive industry, taking into account the experience of its application in aircraft manufacturing

Alexander M. Kolesnikov<sup>1</sup>, Danil S. Dzhabarov<sup>2</sup>

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>1</sup> 28.01.2002@mail.ru

<sup>2</sup> dcer2003@mail.ru

---

© Колесников А.М., Джабаров Д.С., 2026

№ 2(48)  
июнь 2026

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of the prospects of adapting the technology of sandwich-laying of composite materials from aircraft engineering to automotive engineering. The key advantages of sandwich structures are considered, including a high stiffness-to-mass ratio, which is critical for modern vehicles in terms of increasing energy efficiency and reducing fuel consumption. The main components of sandwich panels, such as skins and cores, are highlighted, as well as the possibilities of optimizing them for the automotive industry, including the selection of materials, variation of layer thicknesses, and core structures. Based on the analysis of aviation experience, the economic and technical feasibility of implementing these technologies in the automotive industry has been demonstrated, especially for electric vehicles (reducing battery weight and increasing range).

**Keywords:** sandwich structure, composite materials, automotive industry, sandwich molding, carbon fiber, aluminum foam, out-of-autoclave (OOA) technologies, electric vehicles

**For citation:** Kolesnikov A.M., Dzhabarov D.S. Prospects for the use of composite sandwich lay-up technology in the automotive industry, taking into account the experience of its application in aircraft manufacturing. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 2 (48).

### Введение

Современное автомобилестроение характеризуется постоянной борьбой за снижение массы транспортного средства при одновременном повышении его прочностных, безопасностных и эксплуатационных характеристик. Глобальный переход к транспорту на электрической тяге и ужесточение экологических стандартов способствуют растущему спросу на передовые лёгкие материалы. Каждое снижение массы автомобиля на 10% приводит к улучшению экономии топлива на 6-8% для традиционных ДВС и увеличению запаса хода на 10-15% для электромобилей [1, 2].

Наиболее полно этим требованиям отвечают композиционные материалы (КМ), которые превосходят традиционные стальные и алюминиевые сплавы по удельной прочности и жесткости. Использование композитов в автомобилестроении позволяет снизить вес компонентов на 30-50% по сравнению с металлическими аналогами [1].

Среди различных видов композитов особое место занимают сэндвич-структуры – особый класс композиционных материалов, состоящий из двух

тонких, но жестких обшивок (скинов), соединенных с легким и относительно толстым сердечником. Конструкция сэндвич-панелей имеет ряд принципиальных преимуществ [3].

1. Высокая жесткость при малой массе. Толстый сердечник увеличивает момент инерции сечения, что придает конструкции высокую жесткость на изгиб при минимальном весе. Этот принцип аналогичен работе двутавровой балки.

2. Эффективное восприятие нагрузок. Внешние обшивки воспринимают нормальные напряжения (растяжение и сжатие), а сердечник противостоит сдвиговым нагрузкам и предотвращает потерю устойчивости обшивок.

3. Многофункциональность. Помимо основных прочностных свойств, сэндвич-панели могут обладать такими характеристиками, как теплоизоляция, радиопрозрачность и высокая коррозионная стойкость.

Исторически сэндвич-конструкции начали применяться в авиации еще в 1940-х годах, где в качестве сердечника использовалась бальза. Сегодня эта технология является неотъемлемой частью аэрокосмической промышленности, и её адаптация в автомобилестроении открывает новые перспективы для создания легких, прочных и энергоэффективных транспортных средств.

**Целью** данной статьи является анализ перспектив и обоснование технико-экономической целесообразности адаптации технологии сэндвич-выклейки композитных материалов, отработанной в авиастроении, для применения в автомобильной промышленности. Достижение поставленной цели требует решения ряда **задач**:

- систематизировать сведения о компонентах и преимуществах композитных сэндвич-структур;
- провести сравнительный анализ типов сердечников и обшивок применительно к автомобильным нагрузкам и условиям эксплуатации;
- выделить ключевые технологические и экономические барьеры для массового внедрения данных технологий в автомобилестроение;

– определить наиболее перспективные направления адаптации авиационных технологических процессов, включая безавтоклавные и аддитивные методы.

Научная **новизна** исследования заключается в комплексном межотраслевом анализе, позволяющем обосновать выбор конкретных материалов и технологических решений сэндвич-выклейки для автомобильных конструкций на основе критериев стоимости, скорости цикла, ремонтпригодности и функциональности, сформулированных с учетом опыта авиастроения.

### **Сэндвич-выклейка композитных материалов**

Сэндвич-выклейка – это одна из ключевых технологий изготовления крупногабаритных и сложноформованных композитных деталей в авиастроении. Данный метод относится к закрытым (замкнутым) формам и заключается в укладке сухого армирующего наполнителя (например, угле- или стеклоткани) и сердечника в заранее подготовленную оснастку, с последующим созданием вакуума и подачей жидкого полимерного связующего (эпоксидной, полиэфирной смолы) под давлением. После пропитки и отверждения получается готовая сэндвич-панель [4, 5].

### **Ключевые компоненты сэндвич-конструкции**

1. Обшивки (скины). Выполняются из материалов с высокими прочностными характеристиками. Среди них наиболее распространены следующие.

– Углепластики (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP), обеспечивающие наилучшее соотношение прочности и жесткости к весу.

– Стеклопластики, отличающиеся хорошей ударной вязкостью и более низкой стоимостью.

– Гибридные обшивки, сочетающие в одном монослое углеродные и стеклянные волокна, что позволяет нивелировать недостатки каждого материала: хрупкость углеволокна при местных ударах и более низкую

жесткость стекловолокна. Варьируя соотношение волокон, можно гибко управлять свойствами панели [6].

– Термопластичные композиты: современный класс материалов на основе термопластов (полипропилен, полиамид), армированных углеродными или стеклянными волокнами. Их главное преимущество для автомобилестроения – возможность быстрого формования, ремонтпригодность и возможность вторичной переработки, что соответствует принципам циркулярной экономики [7].

2. Сердечник (Кор). Основная функция – обеспечение пространственной жесткости и устойчивости обшивок. Наиболее распространенные типы сердечников представлены ниже [3, 4].

– Сотовые заполнители (honeycomb): производятся из арамидной бумаги (Nomex), алюминия, стекло- или углепластика. Имеют гексагональную, прямоугольную или другую ячеистую структуру, что обеспечивает максимальное отношение жесткости к весу, отличную огнестойкость. К недостаткам данного типа сердечников относятся: сложность ремонта, возможность скрытых повреждений. Широко используются в панелях пола, рулевых поверхностях (элеронах, рулях высоты) и обтекателях.

– Полимерные пенопласты (foams): к ним относятся материалы на основе PVC (Дивиниселль, Айрекс) и полиметакрилимида (Рохацелл). Обладают хорошей обрабатываемостью и способностью формироваться в сложные криволинейные поверхности, что делает их популярными в конструкциях крыльев малых ЛА и интерьерных панелях.

– Заливочные пенополиуретаны: двухкомпонентные составы, которые при смешивании вспениваются и отверждаются, образуя бесшовный сердечник сложной формы. Такие материалы, как Rohacell Hero, позволяют упростить процесс изготовления и снизить вес деталей. Применение такого сердечника позволяет снизить вес на 19%, а стоимость детали – на 25% по сравнению с классической конструкцией [8].

– Бальза (Balsa Wood): природный материал с закрытоячеистой структурой, предлагающий высокую прочность на сжатие, но имеющий большую плотность по сравнению с синтетическими сердечниками.

– Вспенённый алюминий: перспективный материал, который сочетает свойства металла и пены, обеспечивая высокую прочность и энергопоглощение. Особенно актуален для зон деформации и элементов пассивной безопасности [9, 10]. По прогнозу экспертов в ближайшем будущем алюминиевые сэндвич-панели могут использоваться в кузовных элементах, заменив классические материалы до 20% [11].

Таблица 1

Сравнительная характеристика сердечников для автомобилестроения

Тип сердечника	Преимущества	Недостатки	Потенциал применения в автомобилестроении
<b>Сотовые наполнители</b>	Обеспечивает максимальное отношение жесткости к весу, отличная огнестойкость.	Сложность ремонта, возможность скрытых повреждений.	Пол, крыша, обшивка двери.
<b>Полимерные пенопласты</b>	Обладают хорошей обрабатываемостью и способностью формоваться в сложные криволинейные поверхности.	Ниже прочностные характеристики, чем у сотовых наполнителей; способ обработки – фрезеровка.	Панели, обтекатели, декоративные элементы.
<b>Заливочные пенополиуретаны</b>	Образуя бесшовный сердечник сложной формы, позволяют упростить процесс изготовления и снизить вес деталей.	Ниже прочностные характеристики, чем у сотовых наполнителей; способ обработки – фрезеровка.	Панели, обтекатели, декоративные элементы.
<b>Бальза</b>	Высокая прочность на сжатие.	Высокая плотность по сравнению с синтетическими сердечниками.	Нецелесообразно применять в автомобилестроении.
<b>Вспенённый алюминий</b>	Сочетает в себе свойства металла и пены, обеспечивая высокую прочность и энергопоглощение	Сложный полноценный ремонт после физического воздействия, высокая цена.	Энергопоглощающие компоненты (противоударные брусья, дверные балки), тепловые экраны, легкие панели кузова.

### **Перспективы и инновации в адаптации технологии сэндвич-выклейки в автомобилестроении**

Как говорилось ранее, практические исследования в области использования сэндвич-структур в автомобилестроении активно развиваются в нескольких направлениях, которые также есть в авиации. Например, рассматриваются возможности расширения применения сэндвич-панелей в силовых конструкциях. Исторически из-за особенностей конструкции сэндвичи применялись в элементах, на которые приходилось относительно небольшое количество нагрузки. Однако немецкие ученые из Аэрокосмического Центра показали, что применение сэндвич-композитов в силовой структуре может сократить массу самолета на 30% по сравнению с классическими монолитными композитами [12], а при проецировании на автомобиль позволит улучшить топливную экономичность, увеличить дальность хода и повысить грузоподъемность.

Анализируются перспективы аддитивных технологий, которые становятся все более популярными (например, 3D-печать). Появление 3D-принтеров, способных печатать непрерывным углеволокном, открывает возможности интеграции сэндвич-структур со сложной геометрией сердечника в одной операции [13, 14].

Совершенствуются материалы: так, разработка новых гибридных и наномодифицированных материалов для обшивок и сердечников направлена на повышение ударной вязкости, усталостной прочности и ремонтпригодности конструкций [15].

### **Выводы**

Технология сэндвич-выклейки композитных материалов, успешно применяемая в авиастроении, обладает значительным потенциалом для ее адаптации в автомобилестроении. Сочетая в себе исключительную легкость и высокие прочностные характеристики, сэндвич-конструкции могут стать основой для создания нового поколения легких, энергоэффективных и безопасных транспортных средств.

Ключевыми факторами успешной адаптации авиационных технологий в автомобилестроении станут:

- развитие высокопроизводительных безавтоклавных методов производства;
- создание автоматизированных производственных линий;
- оптимизация стоимости материалов и процессов;
- разработка специализированных материалов для автомобильных применений;
- интеграция дополнительных функций в сэндвич-структуры.

Учитывая глобальные тенденции электрификации транспорта и ужесточения экологических стандартов, можно утверждать, что сэндвич-конструкции будут играть в автомобилестроении всё большую роль. Дальнейшие исследования в данной области должны быть сфокусированы на решении проблем стоимости, скорости производства и ремонтпригодности данных структур на массовом автомобильном рынке.

### Список источников

1. Министерство энергетики США. Lightweight Materials for Cars and Trucks. – URL: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks> (дата обращения: 03.03.2026).
2. Czerwinski, F. Current trends in automotive lightweighting strategies and materials / F. Czerwinski // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 21. – DOI 10.3390/ma14216631. – EDN ILOHIZ.
3. Castanie, B. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications / B. Castanie, Ch. Bouvet, M. Ginot // *Composites Part C: Open Access*. – 2020. – Vol. 1. – P. 100004. – DOI 10.1016/j.jcomc.2020.100004. – EDN PQJQJA.
4. Karlsson, K. F. Manufacturing and applications of structural sandwich components / K. F. Karlsson, B. T. Astrom // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1997. – Vol. 28, No. 2. – P. 97-111. – DOI 10.1016/s1359-835x(96)00098-x. – EDN AJJKTR.
5. A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing / O. A. Ekuase, N. Anjum, V. O. Eze, O. I. Okoli // *Journal of Composites Science*. – 2022. – Vol. 6, No. 6. – P. 172. – DOI 10.3390/jcs6060172. – EDN JBUXUC.
6. Study on the Mechanical Properties of a Carbon-Fiber/Glass-Fiber Hybrid Foam Sandwich Structure / Y. Cai, X. Wang, F. Ouyang [et al.] // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 9. – P. 2023. – DOI 10.3390/ma17092023. – EDN DFFIRD.

7. Valente, M. Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter / M. Valente, I. Rossitti, M. Sambucci // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, No. 1. – P. 242. – DOI 10.3390/polym15010242. – EDN VLTAPS.
8. Evonik Operations GmbH. ROHACELL® HERO: Airbus Qualification. June 2022. – URL: [https://products.evonik.com/assets/32/38/ROHACELL\\_HERO\\_Airbus\\_Qualification\\_2022\\_June\\_EN\\_243238.pdf](https://products.evonik.com/assets/32/38/ROHACELL_HERO_Airbus_Qualification_2022_June_EN_243238.pdf) (дата обращения: 03.03.2026).
9. Бекетова, Т. С. Новые технологии при постройке кузовов автомобилей / Т. С. Бекетова, М. М. Мишин // *Наука и Образование*. – 2021. – Т. 4, № 2. – EDN RGRVOJ.
10. Fu, W. Fabrication, Processing, Properties, and Applications of Closed-Cell Aluminum Foams: A Review / W. Fu, Ya. Li // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 3. – P. 560. – DOI 10.3390/ma17030560. – EDN TVWNEW.
11. Lepeshkin, I. Sandwich Foamed Aluminum Panels. Prospects of application / I. Lepeshkin // *Известия МГТУ МАМИ*. – 2010. – No. 1(9). – P. 136-147. – EDN LBECQP.
12. German Aerospace Center (DLR). Modern aircraft design – use of sandwich composites in aircraft wingbox. – URL: <https://www.dlr.de/en/ae/latest/technical-articles/modern-aircraft-design-use-of-sandwich-composites-in-aircraft-wingbox> (дата обращения: 03.03.2026).
13. Marabello, G. Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance-A Brief Review / G. Marabello, Ch. Borsellino, G. Di Bella // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, No. 23. – P. 7311. – DOI 10.3390/ma16237311. – EDN MPYOVV.
14. Создание новых композиционных материалов для 3d-печати на основе полиимидных связующих и непрерывного углеродного волокна / Д. С. Александрова, М. В. Богдановская, А. С. Егоров, Я. С. Выгодский // *Труды Крыловского государственного научного центра*. – 2021. – № S2. – С. 97-107. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-97-107. – EDN GHXTFG.
15. Interlaminar fracture toughness and CAI strength of fibre-reinforced composites with nanoparticles – A review / Y. Tang, L. Ye, Z. Zhang, K. Friedrich // *Composites Science and Technology*. – 2013. – Vol. 86. – P. 26-37. – DOI 10.1016/j.compscitech.2013.06.021.

### References

1. Ministerstvo energetiki SSHA. Lightweight Materials for Cars and Trucks, available at: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks> (03.03.2026)
2. Czerwinski F. Current trends in automotive lightweighting strategies and materials, *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, doi 10.3390/ma14216631.
3. Castanie B., Bouvet Ch., Ginot M. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications, *Composites Part C: Open Access*, 2020, vol. 1, p. 100004, doi 10.1016/j.jcomc.2020.100004.
4. Karlsson K.F., Astrom B.T. Manufacturing and applications of structural sandwich components, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, vol. 28, no. 2, pp. 97-111, doi 10.1016/s1359-835x(96)00098-x.

5. Ekuase O.A., Anjum N., Eze V.O., Okoli O.I. A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing, *Journal of Composites Science*, 2022, vol. 6, no. 6, p. 172, doi 10.3390/jcs6060172.
6. Cai Y., Wang X., Ouyang F., Chen Q., Zhu Zh., Fan K., Ding F. Study on the Mechanical Properties of a Carbon-Fiber/Glass-Fiber Hybrid Foam Sandwich Structure, *Materials*, 2024, vol. 17, no. 9, p. 2023, doi 10.3390/ma17092023.
7. Valente M., Rossitti I., Sambucci M. Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter, *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 1, p. 242, doi 10.3390/polym15010242.
8. Evonik Operations GmbH. ROHACELL® HERO: Airbus Qualification. June 2022, available at: [https://products.evonik.com/assets/32/38/ROHACELL\\_HERO\\_Airbus\\_Qualification\\_2022\\_June\\_EN\\_243238.pdf](https://products.evonik.com/assets/32/38/ROHACELL_HERO_Airbus_Qualification_2022_June_EN_243238.pdf) (03.03.2026).
9. Beketova T.S., Mishin M.M. *Nauka i Obrazovaniye*, 2021, vol. 4, no. 2.
10. Fu W., Li Ya. Fabrication, Processing, Properties, and Applications of Closed-Cell Aluminum Foams: A Review, *Materials*, 2024, vol. 17, no. 3, p. 560, doi 10.3390/ma17030560.
11. Lepeshkin I. Sandwich Foamed Aluminum Panels. Prospects of application, *Izvestiya MGTU MAMI*, 2010, no. 1(9), pp. 136-147.
12. German Aerospace Center (DLR). Modern aircraft design – use of sandwich composites in aircraft wingbox, available at: <https://www.dlr.de/en/ae/latest/technical-articles/modern-aircraft-design-use-of-sandwich-composites-in-aircraft-wingbox> (03.03.2026).
13. Marabello G., Borsellino Ch., Di Bella G. Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance-A Brief Review, *Materials*, 2023, vol. 16, no. 23, p. 7311, doi 10.3390/ma16237311.
14. Aleksandrova D.S., Bogdanovskaya M.V., Yegorov A.S., Vygodskiy Ya.S. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 2021, no. S2, pp. 97-107, doi 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-97-107.
15. Tang Y., Ye L., Zhang Z., Friedrich K. Interlaminar fracture toughness and CAI strength of fibre-reinforced composites with nanoparticles – A review, *Composites Science and Technology*, 2013, vol. 86, pp. 26-37, doi 10.1016/j.compscitech.2013.06.021.

Рецензент: Н.И. Баурова, д-р техн. наук, проф., МАДИ

### *Информация об авторах*

**Колесников А. М.** – магистрант кафедры «Автомобили», МАДИ, Москва;

**Джабаров Д. С.** – магистрант кафедры «Автомобили», МАДИ, Москва.

### *Information about the authors*

**Kolesnikov A. M.** – undergraduate student of the Department of Cars, MADI, Moscow;

**Dzhabarov D. S.** – undergraduate student of the Department of Cars, MADI, Moscow.

Статья поступила в редакцию 21.03.2026; одобрена после рецензирования 14.04.2026; принята к публикации 22.06.2026.

The article was submitted 21.03.2026; approved after reviewing 14.04.2026; accepted for publication 22.06.2026.