

Анализ композитных трехслойных сотовых конструкций в ракетно-космической технике

© А.В. Буш¹, А.Г. Свиридов¹, А.В. Егоров²

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
Обнинск, Калужская обл., 249031, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

В представленном обзоре проанализированы отечественные и зарубежные публикации, посвященные применению композитных трехслойных сотовых конструкций в ракетно-космической технике. Рассматриваемые работы сгруппированы по таким направлениям, как применение, проектирование, технологии изготовления, испытания, расчетно-экспериментальные исследования, рациональные параметры, моделирование и расчет. Отмечены решаемые задачи в анализируемых работах. Показано влияние структурных факторов на несущую способность композитных трехслойных конструкций. Уделено внимание проблеме адгезионной связи заполнителей с несущими слоями. Приведены варианты трехслойных конструкций с заполнителями различных видов, а также разных конфигураций и из различных материалов. Отмечены новые возможные формы заполнителей, включая стержневые, дискретные, гибридные. Затронуты вопросы получения рациональных конструкций, учета дефектов и эксплуатационных повреждений, применения методов неразрушающего контроля и проведения испытаний. Даны сведения об использовании вычислительных программных комплексов и моделировании композитных трехслойных конструкций с применением методов конечных элементов.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, трехслойные композитные конструкции, сотовые конструкции, проектирование, расчет, технология производства

Введение. Композитные трехслойные сотовые конструкции (КТСК) находят применение в современных и перспективных корпусных изделиях ракетно-космической техники. Их востребованность объясняется высокими характеристиками удельной прочности и жесткости, высокой массовой эффективностью, хорошими теплоизолирующими и демпфирующими свойствами, технологичностью, пониженным применением механических соединений, возможностью изготовления изделий сложной формы в целом за один технологический цикл.

Достижению высоких показателей изделий из КТСК способствует развитие методов расчета, проектирования, конструирования, изготовления и испытаний.

Многообразие задач, решаемых в процессе создания КТСК, ведет к необходимости проведения большого числа теоретических и экспериментальных исследований с привлечением вычислительных программных комплексов и современного оборудования. Этим можно объяснить интерес специалистов и значительное число публикаций в данной области.

Цель настоящей работы — на основе отечественных и зарубежных научных публикаций провести обзор существующих методов анализа КТСК для ракетно-космической техники.

Применение КТСК. Вопросам выбора формы конструкции, материалов и технологии изготовления КТСК для ракетно-космической техники посвящен целый ряд работ. В них отмечаются неоспоримые преимущества композитных трехслойных сотовых конструкций, применяемых и внедряемых в изделиях ракетно-космической отрасли. Структура таких конструкций позволяет проектировщикам и технологам расширять функциональные возможности КТСК и создавать конструкции с новыми свойствами. Например, для уменьшения полей разброса отработавших створок головных обтекателей (ГО) ракет в [1] предлагается сжигать створки, размещая термитно-зажигающую смесь внутри сот.

В качестве одной из альтернатив КТСК можно рассматривать силовые оболочки крупногабаритных ракетно-космических конструкций с заполнителями в виде многостеночных структур из многослойного углепластика [2]. Такие структуры допускают изготовление методами инфузии или инъекции, обеспечивающими высокую производительность труда при сравнительно небольших энергозатратах. В случае применения силовых КТСК в ракетно-космической технике требуется крепить специальное оборудование, для чего предусматривается установка закладных элементов [3]. В перспективных космических аппаратах применяются термостатированные КТСК [4].

Для того чтобы размещать крупные космические аппараты на ракетах-носителях, применяются ГО сложной формы, собираемые из сферо-коническо-цилиндрических панелей [5] на полноразмерной форме за один технологический цикл. Для конструкций космической техники могут применяться сверхлегкие трехслойные панели [6], в которых заполнитель представляет собой каркас из соединенных между собой плоских элементов, образующих замкнутые ячейки треугольной, прямоугольной или квадратной формы. Существуют способы повышения весовой эффективности применения композитных конструкций [7].

Проектирование КТСК. На весовую отдачу КТСК существенно влияет уровень проектирования и производства конструкций, который достигается применением современных подходов [8]. При оптимальном проектировании КТСК авиационно-космической техники [9] следует учитывать нормированные допуски на физико-механические характеристики материалов конструктивных элементов и проводить обязательную проверку обеспечения несущей способности опорного варианта.

Несущая способность КТСК определяется параметрами несущих слоев, заполнителя и установленными закладными элементами [10].

Несущие слои воспринимают тангенциальные (в плоскости листа) нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг), заполнители передают трансверсальные (поперечные) нагрузки (поперечные сдвиговые и нормальные), закладные элементы работают на растяжение-сжатие в поперечном направлении. Вся трехслойная конструкция предназначена воспринимать, главным образом, изгибающие и скручивающие моменты, поэтому одними из важных ее проектных параметров считаются изгибная жесткость и эффективный поперечный модуль упругости [11]. Величина модуля нормальной упругости КТСК определяется модулем заполнителя при поперечном сжатии и зависит от начального технологического несовершенства заполнителя [12].

Внедрение КТСК в конструкции летательных аппаратов связано, в том числе, и с рациональным выбором конфигураций заполнителей [13], которые имеют преимущества и недостатки в разных условиях нагружения (эксплуатации). Применение углесотопластов [14] в виде нетканого материала из слоев однонаправленных углеродных волокон, скрепленных специальной клеевой композицией, расширяет линейку заполнителей, но для углесотопластов должны выбираться рациональные схемы армирования, например, с помощью методов конечно-элементной (МКЭ) поддержки [15].

В конструкциях космической техники все шире используются гибридные полимерные композитные материалы (ПКМ), в том числе с добавлением нетканых материалов, которые состоят из двух элементов, выполняющих функции наполнителя и связующего [11]. Созданы новые типы нетканых материалов, близких по своей структуре к сотовым заполнителям [11], а трехслойные образцы на их основе имеют модуль упругости, значения которого в среднем в 3 раза превышают этот параметр стандартной КТСК.

Технология и испытания. Проектирование реальных КТСК невозможно без размещения опорных узлов (закладных элементов), служащих для передачи сосредоточенных нагрузок. Методика проектирования опорных узлов для КТСК [16] опирается на знание экспериментально полученных механических характеристик. Конструкция КТСК с опорными узлами и способ сборки [17] предусматривают использование вспенивающейся (ВКВ-9) или заливочной (ЗК-1) клеевой композиции.

Изготовление КТСК зависит также от вида заполнителя. Например, существуют технологические особенности производства КТСК с пространственным заполнителем из композитов с реактопластичной матрицей [18]. При изготовлении КТСК необходимо предусматривать их структурную особенность, отражающуюся на способах укрепления краевых зон, где происходит передача внешних нагрузок. Для этого следует проводить испытания на образцах, вырезанных из реальной конструкции [19], с целью получения зачетного разрушения

и максимально возможного уровня прочностных характеристик. В случае торцового сжатия образца его торцы упрочняют на оптимальную глубину. Такие образцы позволяют достоверно определять эффективные характеристики прочности материала с учетом реального набора всех технологических дефектов конкретного производства.

Подробный обзор методов испытаний образцов КТСК, изложенный в [20], включает испытания на изгиб, растяжение, сжатие, сдвиг, отслаивание обшивки на барабане, способность поглощать энергию внешнего силового воздействия, статическое и ударное нагружение. Отражены также основные виды разрушений КТСК. В [20] приведены формулы для сравнения изгибной жесткости многослойной композитной панели $D_{\text{КМ}}$ и трехслойной панели $D_{\text{п}}$ с трансверсально-мягким наполнителем ($E_3 = 0$), имеющих одинаковые ширину b и толщину:

$$D_{\text{КМ}} = EI_x = \frac{2Ebt^3}{3};$$

$$D_{\text{п}} = \frac{Eb(d^3 - c^3)}{12} = \frac{1}{6}Ebt^3 \left[3\left(\frac{c}{t} + 1\right)^2 + 1 \right],$$

где $2t$ — толщина многослойной панели; d — толщина трехслойной панели; c — толщина наполнителя.

Отсюда имеем:

$$\frac{D_{\text{п}}}{D_{\text{КМ}}} = \frac{1}{4} \left[3\left(\frac{c}{t} + 1\right)^2 + 1 \right].$$

Таким образом, при $\frac{c}{t} = 2$ получаем $\frac{D_{\text{п}}}{D_{\text{КМ}}} = 7$, т. е. изгибная

жесткость трехслойной панели в 7 раз выше, чем многослойной панели.

Важную роль играют статические испытания на поперечное сжатие КТСК [21], при которых определяются поперечный модуль упругости E_{33} и поперечные деформации наполнителя.

На основе выполненных экспериментальных исследований проведено сравнение механических свойств наполнителей разных типов [22], получены данные о прочности на растяжение в продольном направлении КТСК с несущими слоями из углепластика и с наполнителями из разных материалов [23], определены усталостные свойства КТСК [24] с искусственными дефектами и без дефектов (для сравнения), отмечено отсутствие достаточного количества статических характеристик.

Испытания на сжатие (в плоскости) образца КТСК с ячеистым заполнителем, армированным сеткой [25], показали, что образцы с комбинированным заполнителем обеспечивают повышенную жесткость, энергопоглощение и восприятие критической нагрузки.

Исследование проблемы влагонасыщения КТСК в процессе эксплуатации выявило значительное влияние воды и других жидкостей на механические свойства сот [26]. Для неразрушающего контроля наличия воды в КТСК успешно применена [27] магнитно-резонансная томография, чувствительная к влаге.

Механические свойства КТСК во многом определяются формами и параметрами заполнителя. Рациональные формы сотового заполнителя для трехслойной балки могут определяться при действии статической нагрузки на изгиб [28]. Для КТСК используют заполнители разных видов: пенопласты, сотовые структуры, гофры, ферменные структуры, дискретные, складчатые, пористые или вспененные, многостеночные. В обзоре [29] показаны области применения трехслойных конструкций с призматическим и пенопластовым заполнителем, отмечено повышение ударопрочности и обеспечение сверхлегкого веса. Несмотря на широкое применение в ракетно-космической технике трехслойных конструкций с металлическими сотовыми заполнителями, сейчас разрабатываются гибридные [11] и пространственные [18] заполнители, а также углепластиковые [14], комбинированные заполнители с сеткой [25]. Проводятся исследования трех конфигураций сотового заполнителя [30], изготовленного методом 3D-печати проволокой из алюминиевого сплава. Эксперимент по разрушающей нагрузке при торцевом сжатии показал различие показателя для сот разной конфигурации [30]. Оптимальные конструктивные параметры КТСК в ракетно-космической технике должны определяться с использованием ограничений по прочности, общей и местной потери устойчивости, сдвиговой форме потери устойчивости [31].

На базе ферменных структур могут создаваться трехслойные панели с легким заполнителем [32] авиационно-космического назначения, имеющие одинарную или двойную кривизну, а также переменную строительную высоту. Для моделирования конструкции возможно применение программного обеспечения MATLAB, а для построения графических моделей — CAD-система SolidWorks. Трехслойные конструкции со стержневым заполнителем являются эффективными при условии их рационального проектирования [33].

Расчетно-экспериментальные исследования. Для оценки несущей способности ракетно-космических конструкций [2] и для исследования образцов при различных видах нагружения и при наличии дефектов применяются расчетно-экспериментальные методы анализа КТСК. Для МКЭ-расчетов алюминиевой сотовой конструкции [34] и экспериментов при поперечном сжатии [35] применялось

программное обеспечение ANSYS. Экспериментальные и расчетные результаты, полученные для нагружения различных типов [36, 37], показали, что наибольшее расхождение имеет место при торцевом сжатии трехслойной панели. Численное исследование повреждения алюминиевых сот отверстиями выявило снижение модуля упругости при изгибе [38] и зависимость уровня разрушения от размера повреждения.

Спроектированные КТСК для подтверждения их работоспособности должны быть рассчитаны на прочность и устойчивость. Расчеты предполагают выбор толщины несущих слоев и оптимальных параметров сотового заполнителя, а также определение размеров зон усиления заполнителя и обшивок, исходя из заданных граничных условий, типов соединений панелей и видов приложения нагрузок.

На всем участке выведения ракеты к статическим нагрузкам добавляются упругие колебания конструкции ракеты с переменной амплитудой и частотой 5...30 Гц (переходные процессы), возникающие при резком нарастании и спаде силы тяги в случаях старта и разделения ступеней ракеты-носителя, а также происходит вибронагружение, основными причинами которого являются пульсации силы тяги двигателей ступеней ракеты-носителя, атмосферная турбулентность и работа системы управления [39]. Наиболее опасна низкочастотная область, где происходят наибольшие отклонения от стационарного состояния. Частотный диапазон вибрационных нагрузок составляет 20...200 Гц. Кроме того, на ракету воздействует акустическое вибронагружение в диапазоне частот 2000...8000 Гц. Существуют также ударные нагрузки и тепловой нагрев.

Приближенная зависимость продольной перегрузки n_{x1}^B от частоты ω имеет вид

$$n_{x1}^B = 0,35 \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^{0,46}.$$

Из формулы следует, что при высоких частотах виброперегрузки могут быть значительными и носят знакопеременный характер. Однако они не вызывают разрушения конструкции вследствие крайне малых перемещений, амплитуду A которых можно определить как отношение

$$A = \frac{250n_{x1}^B}{\omega^2}.$$

Важным фактором предотвращения разрушения КТСК является хорошо сформированный клеевой слой между сотовым заполнителем и несущими слоями [40]. Для обеспечения адгезионной прочности соединения несущих слоев с сотовым заполнителем необходимо оптимальное сочетание материала заполнителя, плотности заполнителя,

размера ячеек и толщины клея. Выбор клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей должен осуществляться на основании их прочностных характеристик и оценки технологичности применяемых клеев [41].

Контактное взаимодействие сотового заполнителя с несущими слоями в КТСК может существенно влиять на конечные значения свойств трехслойных конструкций [42], а также на разброс их значений. Получены выводы [40, 43, 44] о значительной зависимости свойств соединения обшивок с заполнителем в КТСК от технологии производства, параметров формования, наличия дефектов и применяемых клеевых композиций.

Моделирование и расчет. При выполнении расчетов КТСК удобно использовать приведенные характеристики сотовых заполнителей различных форм [45]. Численное моделирование реакции композитных балок с сотовыми заполнителями [46] на низкоскоростной удар показало, что при низких изученных скоростях удара соты влияли на поглощение энергии несущими слоями, а при высоких скоростях удара влияние было малым. Влияние высокоскоростного удара [47], смоделированного с помощью объемных конечных элементов и реализованного в программном обеспечении ABAQUS/Explicit, позволило оценить поведение КТСК при ударной нагрузке и позднее подтвердить расчеты экспериментом. Изучение деформирования КТСК методом КЭ проводится при действии динамических нагрузок [48] и при наличии дефектов.

Численный анализ критических нагрузок на изгиб для КТСК с заполнителями из различных материалов [34] и с ячейками сот разных размеров, но с одинаковым общим их объемом привел к выводу о том, что с увеличением плотности сот прочность на изгиб трехслойной панели возрастает. При численном КЭ-моделировании в программном обеспечении ABAQUS/CAE трехслойных образцов для торцевого сжатия и дальнейшего статического расчета в нелинейной постановке с оценкой максимальных напряжений по Мизесу и отслеживания разрушения с использованием критерия Хашина в [49] установлено влияние глубины укрепления торцов на несущую способность образцов. При моделировании в [47] были приняты следующие допущения: обшивки моделировались объемными оболочечными восьмиузловыми элементами SC8R; для сотового заполнителя использовались плоские четырехузловые элементы S4R, контакт между обшивками и сотовым заполнителем учитывался как постоянно склеенный посредством эйлерово-лагранжевых контактных элементов при моделировании клеевого слоя.

Расчет КТСК в реальных конструкциях предполагает учет дефектов и повреждений [50–52]. Эксплуатационные дефекты и повреждения от ударных воздействий влияют на механические и прочностные

характеристики КТСК [50]. Концентрация напряжений из-за дефектов в сотовой структуре (отсутствуют некоторые стенки ячеек) приводит к перераспределению нагрузок в верхней части сот [51]. Конечно-элементный анализ [52] дефекта от вдавливания сферического бойка в трехслойную панель с пенообразным заполнителем дал возможность спрогнозировать остаточные напряжения и деформации, а также, что важно, величину вмятины.

Прочностной анализ КТСК с закладными элементами [53] и с дискретным заполнителем [54] подтвердил преимущества сотовых конструкций, которые имеют малый вес, большую удельную прочность и жесткость, хорошие теплоизолирующие и звукопоглощающие свойства.

Заключение. Проведенный анализ публикаций констатирует востребованность в ракетно-космической технике композитных трехслойных конструкций с сотовым заполнителем. Современные технологические приемы делают возможным изготовление трехслойных сотовых панелей сложной формы — с одинарной и двойной кривизной, — что значительно расширяет область их применения в конструкциях ракет космического назначения. На основе расчетов методом конечных элементов удастся оптимизировать геометрические и механические характеристики панелей из КТСК и добиваться максимальной весовой эффективности от их внедрения в конструкции летательных аппаратов. Разработанные методы неразрушающего контроля и испытаний позволяют получать надежные композитные трехслойные конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Трушляков В.И., Шатров Я.Т., Лемперт Д.Б., Иордан Ю.В., Зарко В.Е. *Головной обтекатель ракеты. Патент RU2581636 C1*. 2015. Оpubл. 20.04.2016. Бюл. № 11.
- [2] Смердов А.А., Таирова Л.П., Баслык К.П., Артемьев А.В., Нелюб В.А., Бородулин А.С. Расчетно-экспериментальный анализ двух типов структур из углепластика для крупногабаритных ракетно-космических конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/machin/rocket/859.html/rocket/859.html>
- [3] Иванов Е.А., Иконникова А.А., Клешина И.А., Наговицин В.Н., Похабов А.Ю. Применение конструкций сотовых панелей в космических аппаратах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5. URL: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/arce/dcpa/2177.html>
- [4] Кессельман Г.Д., Данилов Е.Н., Наговицин В.Н., Патраев Е.В., Грязнов В.Н. Применение термостатированных сотовых конструкций в перспективных космических аппаратах и антенных системах. *Конструкции из композиционных материалов*, 2005, № 3, с. 10–13.
- [5] Гребнев Н.Е., Ефремов В.А., Кашицын А.Н., Коротков А.Г., Максимов С.В., Поспелов О.В. *Способ изготовления крупногабаритных трехслойных конструкций из полимерных композиционных материалов. Патент RU2355583 C2*. Оpubл. 20.05.2009. Бюл. № 14.

- [6] Хмельницкий А.К., Гончаров К.А., Наседкин Ю.В., Буш А.В., Ширина О.В. Трехслойная панель. Патент RU2559474 C2. Оpubл. 10.08.2015. Бюл. № 22.
- [7] Замула Г.Н., Колесник К.А. Способы повышения весовой эффективности применения композиционных конструкций. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2018, № 10, с. 14–24. EDN YAJGKL
- [8] Kausar A., Ahmad I., Rakha S.A., Eisa M.H., Diallo A. State-of-the-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing-to-High Performance Applications. *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, art. 102. <https://doi.org/10.3390/jcs7030102>
- [9] Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Кириченко В.В., Сливинский В.И. *Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники*. Харьков, 2011, 172 с.
- [10] Тестоедов Н.А., Наговицин В.Н., Пермьяков М.Ю. применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах. *Вестник СибГАУ*, 2016, т. 17, № 1, с. 200–211.
- [11] Городецкий М.А., Михайловский К.В., Резник С.В. Определение параметров трехслойных композитных панелей для конструкции платформы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. *Космическая техника и технологии*, 2022, № 1 (36), с. 36–45.
- [12] Кондратьев А.В., Грицкив Л.Н. Определение модуля нормальной упругости сотового заполнителя при поперечном сжатии с учетом начального технологического несовершенства фольги. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*, 2007, т. 51, № 4, с. 131–139.
- [13] Wang Z. Recent advances in novel metallic honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 166, pp. 731–741.
- [14] Сливинский В.И., Харченко М.Е., Кондратьев А.В., Гаврилко В.В. Углетопласт — легкий и прочный заполнитель трехслойной конструкции космического назначения. *Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. научн. конф.*: в 2 ч. Красноярск, 2013, ч. 1, с. 96–98.
- [15] Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Сливинский В.И., Харченко М.Е. Определение рациональной схемы армирования углетопласта при помощи МКЭ-поддержки. *Системные технологии*, 2012, вып. 2 (79), с. 3–12.
- [16] Степанов Н.В. *Разработка методики проектирования опорных узлов для трехслойных сотовых платформ космических аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук*: 05.07.02. Обнинск, 2007.
- [17] Степанов Н.В., Выморков Н.В., Крюков А.М., Осауленко А.В. *Опорный узел трехслойной панели и способ сборки трехслойной панели с опорными узлами. Патент RU2544690 C1*. Оpubл. 20.03.2015. Бюл. № 8.
- [18] Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Анализ технологических особенностей изготовления трехслойной конструкции с пространственным заполнителем из композиционных материалов с реактопластичной матрицей. *Аэрокосмическая техника и технологии*, 2024, т. 2, № 2, с. 24–51. DOI: 10.52467/2949-401X-2024-2-2-24-51. EDN BQPGTE
- [19] Павлов М.В., Титов С.А., Свиридов А.А., Бурдов А.А. Экспериментальное определение действительных прочностных характеристик элементов трехслойных панелей вырезанных из агрегатов ЛА. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2025, т. 31, № 1, с. 101–116. EDN DYFKBG
- [20] Ерасов В.С., Сибяев И.Г., Сутубалов А.И. Испытания образцов из трехслойных конструкций с сотовым заполнителем. *Труды ВИАМ*, 2025, № 10, с. 133–155.
- [21] Nowakowski D. et al. Examination of honeycomb core compliance in sandwich structure. *Fatigue of Aircraft Structures*, 2019, vol. 2019, no. 11, pp. 19–27.
- [22] Jedral A. Review of testing methods dedicated for sandwich structures with honeycomb core. *Transactions on Aerospace Research*, 2018, vol. 3, pp. 7–20. <https://doi.org/10.2478/tar-2019-0006>

- [23] Widagdo D., Kuswoyo A., Nurpratama O.T., Hadi B.K. *Experimental flatwise tensile strength dataset of carbon fibre reinforced plastic sandwich panels with different core material preparations*. 2019. Data in brief 28 (2020) 105055. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105055>
- [24] Abbadì A., Tixier C., Gilgert J., Azari Z. Experimental study on the fatigue behavior of honeycomb sandwich panels with artificial defects. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.10.020>
- [25] Sun Z., Shi Sh., Guo X., Hu X., Chen H. On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.054>
- [26] Kim G., Sterkenburg R., Waterloo T. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. *Composite Structures*, 2018, vol. 206, pp. 535–549. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.054>
- [27] Laplante G. Detection of water ingress in composite sandwich structures: A magnetic resonance approach. *NDT & E International*, 2005, vol. 38, no. 6, pp. 501–507. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2005.01.006>
- [28] Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Киявов У.А., Устарханов Т.О. Определение рациональных форм сотового заполнителя для трехслойной балки при действии статической нагрузки. *Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения*, 2014, № 12, с. 46–51. EDN SYDCJD
- [29] Xiong J., Du Y., Mousanezhad D., Asl M.E., Norato J., Vaziri A. Sandwich structures with prismatic and foam cores: A review. *Advanced Engineering Materials*, 2019, vol. 21, no. 1, paper 1800036. DOI: 10.1002/adem.201800036
- [30] He R., Zhao C., Wang G., Zhang Z., Li F. Finite Element Analysis of in-plane compression of aluminum alloy honeycomb panels. *Structures*, 2023, vol. 49, pp. 267–280.
- [31] Башаров Е.А. Расчет оптимальных конструктивных параметров и применение в аэрокосмических конструкциях трехслойных сотовых панелей из полимерных композиционных материалов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 10. EDN JOFBHO
- [32] Мусави Сафави Сейед Мохаммад. *Моделирование и проектирование ферменных заполнителей трехслойных конструкций авиакосмического назначения: Дис. ... канд. техн. наук: 2.5.13*. Казань, 2022, 141 с.
- [33] Абдуллин И.Н. *Рациональное проектирование трехслойных конструкций со стержневым заполнителем: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02*. Казань, 2016, 125 с.
- [34] Kaman M.O., Solmaz M.Y., Turan K. Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 2010, vol. 44, no. 24, pp. 2819–2831. <https://doi.org/10.1177/0021998310371541>
- [35] Akkus H., Duzcukoglu H., Sahin O.S. Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with epoxy-based adhesives reinforced with nanoparticles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31 (1), pp. 165–170. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1216-0>
- [36] Jang J., Jeong S., Oh D., Cho Je-H., Noh J. Test and evaluation procedure of foam core materials for composite ships. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 2020, vol. 26 (3), pp. 103–119. DOI: 10.7837/kosomes.2020.26.3.286

- [37] Nurul Lailarul M., Taufiq Satrio Nurtiasto, Rezky Agung Pratomo, Afid Nugroho, Anis Mutiara Balqis. Studi sifat mekanik komposit sandwich divinycell foam dengan metode vacuum assisted resin infusion (vari) untuk float pesawat amfibi. *Conference: Prosiding Seminar Nasional Riset Teknologi Terapan*, 2021. Indonesia. e-ISSN:2747-1217
- [38] Djemaoune Y., Krstic B., Radulovic D., Rasic S., Dodic M. Numerical investigation of open-hole damaged NomexTM honeycomb panel under three-point bending load. *Scientific Technical Review*, 2021, vol. 71, no. 2, pp. 14–18. DOI: 10.5937/str2102014D
- [39] Евстафьев В.А. *Конструирование космических аппаратов*. Ч. 1. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2018.
- [40] Butukuri R.R., Bheemreddy V., Chandrashekhara K., Berkel T.R., Rupel K. Evaluation of skin-core adhesion bond of out-of-autoclave honeycomb sandwich structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, vol. 31, no. 5, pp. 331–339. DOI: 10.1177/0731684412437267
- [41] Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей. *Авиационные материалы и технологии*, 2018, № 4 (53), с. 26–30. DOI: 10/18577/2071-9140-2018-0-4-26-30
- [42] Павлова С.А. Анализ контактного взаимодействия полимерного сотового заполнителя с несущими слоями в трехслойных конструкциях. *Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2021, т. 20, № 1, с. 87–96. EDN XLOEFT
- [43] Grove S.M., Popham E., Miles M.E. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 5, pp. 804–812. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.07.005
- [44] Rion J., Leterrier Y., Manson J.-A.E. Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra-light sandwich structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, vol. 39, no. 9, pp. 1547–1555. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.05.022
- [45] Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устаханов О.М. Определение приведенных характеристик сотовых заполнителей различных форм. *Вестник Дагестанского гос. техн. ун-та. Технические науки*, 2016, т. 42, № 3, с. 155–166. DOI: 10.21822/2073-6185-2016-42-3-155-166
- [46] Ivañez I., Sanchez-Saez S. Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core. *Composites Structures*, 2013, vol. 106, pp. 716–727.
- [47] Buitrago B.L., Santiuste C., Sánchez-Sáez S., Barbero E., Navarro C. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact. *Composites Structures*, 2010, vol. 92, pp. 2090–2096.
- [48] Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В., Дедова Д.В. Численный анализ поведения трехслойной панели с сотовым заполнителем при наличии дефектов под действием динамической нагрузки. *Строительная механика инженерных конструкций*, 2021, № 17 (4), с. 357–365. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-357-365>
- [49] Павлов М.В. *Методики определения расчетных характеристик трехслойных материалов для обеспечения статической прочности конструкции летательного аппарата*. Дис. ... канд. техн. наук. Жуковский, 2025. 184 с.
- [50] Wang Z., Li Z., Zhou W., Hui D. On the influence of structural defects for honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 142, pp. 183–192.
- [51] Chen D.H., Ozaki S. Stress concentration due to defects in a honeycomb structure. *Composites Structures*, 2009, vol. 89, pp. 52–59.

- [52] Rizov V., Shipsha A., Zenkert D. Indentation study of foam core sandwich composite panels. *Composite Structures*, 2005, vol. 69, no. 1, с. 95–102.
- [53] Кессельман Г.Д., Зимин И.И., Данилов Е.Н., Наговицин В.Н., Патраев Е.В., Грязнов В.Н. Расчет на прочность трехслойной конструкции и закладных элементов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2006, № 1, с. 6–15. EDN KBEJYL
- [54] Волков А.Н. *Моделирование и расчет сложных трехслойных конструкций с дискретным заполнителем: Дис. ... канд. техн. наук: 2.5.14.* Москва, МАИ, 2023.

Статья поступила в редакцию 12.02.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Буш А.В., Свиридов А.Г., Егоров А.В. Анализ композитных трехслойных со-
товых конструкций в ракетно-космической технике. *Инженерный журнал: наука
и инновации*, 2026, вып. 3. EDN NDTWVD

Буш Александр Валерьевич — начальник конструкторского отдела, АО «ОНПП
«Технология» им. А.Г. Ромашина». e-mail: bush@technologiya.ru

Свиридов Анатолий Григорьевич — директор НПК «Композит» – главный кон-
структор, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».
e-mail: agsviridov@technologiya.ru

Егоров Антон Витальевич — д-р техн. наук, доцент по специальности 2.5.13,
профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители», МГТУ им. Н.Э. Бау-
мана. e-mail: av_egorov@bmstu.ru

Analysis of Composite Three-Layer Honeycomb Structures in Rocket and Space Technology

A.V. Bush¹, A.G. Sviridov¹, A.V. Egorov²

¹ JSC “ORPE “Technologiya” named after A. G. Romashin”,
Obninsk, Kaluga Region, 249031, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The review analyzes domestic and international publications devoted to the application of composite three-layer honeycomb structures in aerospace engineering. The works being reviewed are grouped according to the following directions: application, design, manufacturing technology and testing, computational and experimental studies, optimal parameters, modeling, and analysis. The tasks to be solved in the analyzed works were identified. The influence of structural factors on the load-bearing capacity of composite three-layer structures was demonstrated. Attention was paid to the problem of adhesive bonding of fillers with load-bearing layers. Three-layer structures with different types of fillers, as well as different configurations and materials, were presented. New possible forms of fillers were noted, including rod, discrete, and hybrid ones. The issues of obtaining rational designs, accounting for defects and operational damage, applying non-destructive testing methods and conducting tests were brought up. Information was provided on the use of computer software packages and the modelling of composite three-layer structures using finite element methods.

Keywords: aerospace engineering, three-layer composite structures, honeycomb structures, design, analysis, manufacturing technology

REFERENCES

- [1] Trushljakov V.I., Shatrov Ja.T., Lempert D.B., Iordan Ju.V., Zarko V.E. *Missile nose cone. Patent RU2581636 C1*. 2015. Date of publication: 20.04.2016. Bull. no. 11.
- [2] Smerdov A.A., Tairova L.P., Baslyk K.P., Artemiev A.V., Nelyub V.A., Borodulin A.S. Raschetno-eksperimentalnyy analiz dvukh tipov struktur iz ugleplastika dlya krupnogabaritnykh raketno-kosmicheskikh konstruktсий [Experiment-calculated analysis of two types of CFRP structures for large size rocket-space structures]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 7. Available at: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/machin/rocket/859.html/rocket/859.html>
- [3] Ivanov E.A., Ikonnikova A.A., Kleshnina I.A., Nagovitsin V.N., Pokhabov A.Yu. Primeneniye konstruktсий sotovykh paneley v kosmicheskikh apparatakh [Application of honeycomb panel structures in spacecraft]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 5. Available at: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/arise/dcpa/2177.html>
- [4] Kesselman G.D., Danilov E.N., Nagovitsin V.N., Patraev E.V., Gryaznov V.N. Primeneniye termostatirovannykh sotovykh konstruktсий v perspektivnykh kosmicheskikh apparatakh i antennykh sistemakh [Using of thermostatically controlled honeycomb structures in perspective spacecrafts and antenna systems]. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov — Composite Materials Constructions*, 2005, no. 3, pp. 10–13.
- [5] Grebnev N.E., Efremov V.A., Kashitsyn A.N., Korotkov A.G., Maksimov S.V., Pospelova O.V. *Production method of large three-layer structures from polymer composites. Patent RU2355583 C2*. Date of publication: 20.05.2009. Bull. no. 14.

- [6] Khmel'nitskiy A.K., Goncharov K.A., Nasedkin Ju.V., Bush A.V., Shirina O.V. *Sandwich Panel. Patent RU2559474 C2*. Date of publication: 10.08.2015. Bull. no. 22.
- [7] Zamula G.N., Kolesnik K.A. Sposoby povysheniya vesovoy effektivnosti primeneniya kompozitsionnykh konstruktsey [Weight-saving technique for composite structures]. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal "Polyot" — All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")*, 2018, no. 10, pp. 14–24. EDN: YAJGKL
- [8] Kausar A., Ahmad I., Rakha S.A., Eisa M.H., Diallo A. State-of-the-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing-to-High Performance Applications. *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, art. 102. <https://doi.org/10.3390/jcs7030102>
- [9] Gaidachuk V.E., Kondratiev A.V., Kirichenko V.V., Slivinskiy V.I. *Optimalnoe proektirovaniye kompozitnykh sotovykh konstruktsey aviakosmicheskoy tekhniki* [Optimal design of composite honeycomb structures for aerospace applications]. Kharkov, 2011, 172 p.
- [10] Testodov N.A., Nagovitsin V.N., Permyakov M.Yu. Primeneniye trekhsloynnykh sotovykh konstruktsey v kosmicheskikh apparatakh [Spacecraft application of three-layer honeycomb structures]. *Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 200–211.
- [11] Gorodetskiy M.A., Mikhailovskiy K.V., Reznik S.V. Opredeleniye parametrov trekhsloynnykh kompozitnykh paneley dlya konstruktsey platformy kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Determining parameters of sandwich composite panels for Earth remote sensing satellite bus]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2022, no. 1 (36), pp. 36–45.
- [12] Kondratiev A.V., Gritskiv L.N. Opredeleniye modulya normalnoy uprugosti sotovogo zapolnitelya pri poperechnom szhatii s uchetom nachalnogo tekhnologicheskogo nesovershenstva folgi [Determination of the modulus of normal elasticity of a honeycomb core under transverse compression, taking into account the initial technological imperfection of the foil]. In: *Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruktsey letatelnykh apparatov: sbornik nauchnykh trudov* [Issues of design and production of aircraft structures: collection of scientific works]. Vol. 51, no. 4. Kharkov, KhAI, 2007, pp. 131–139.
- [13] Wang Z. Recent advances in novel metallic honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 166, pp. 731–741.
- [14] Slivinskiy V.I., Kharchenko M.E., Kondratiev A.V., Gavrilko V.V. Uglesotoplast — legkiy i prochnyy zapolnitel' trekhsloynnoy konstruktsey kosmicheskogo naznacheniya [Carbon fiber reinforced plastic is a lightweight and durable filler for three-layer structures for space applications]. In: *Reshetnevskiyechteniya: materialy XVII Mezhdunar. nauchn. konf.: v 2 ch.* [Reshetnev Readings: Proceedings of the XVII International Scientific Conf.: in 2 parts]. Krasnoyarsk, 2013, pt. 1, pp. 96–98.
- [15] Gaidachuk V.E., Kondratiev A.V., Slivinskiy V.I., Kharchenko M.E. Opredeleniye ratsionalnoy skhemy armirovaniya ugleplasta pri pomoschi MKE-podderzhki [Determination of a rational scheme for reinforcing carbon fiber using FEM support]. *Sistemnyye tekhnologii — System Technologies*, 2012, issue 2 (79), pp. 3–12.
- [16] Stepanov N.V. *Razrabotka metodiki proyektirovaniya opornykh uzlov dlya trekhsloynnykh sotovykh platform kosmicheskikh apparatov: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.07.02* [Development of a methodology for designing support units for three-layer honeycomb platforms of spacecraft: Diss. ... Cand. Sc. in Engineering]. Obninsk, 2007.

- [17] Stepanov N.V., Vymorkov N.V., Krjukov A.M., Osaulenko A.V. Three-ply panel support and method of assembly of said panel with supports. *Patent RU2544690 C1*. Date of publication: 20.03.2015. Bull. no. 8.
- [18] Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Analiz tekhnologicheskikh osobennostey izgotovleniya trekhsloynnoy konstruktssii s prostranstvennym zapolnitelem iz kompozitsionnykh materialov s reaktoplastichnoy matritsey [Analysis of technological features manufacture of three-layer structures with space filler made from composite materials with reactoplastic matrix]. *Aerospace Engineering and Technology*, 2024, vol. 2, no. 2, pp. 24–51. DOI: 10.52467/2949-401X-2024-2-2-24-51. EDN BQPGTE
- [19] Pavlov M.V., Titov S.A., Sviridov A.A., Burdov A.A. Eksperimentalnoe opredeleniye deystvitelnykh prochnostnykh kharakteristik elementov trekhsloynnykh paneley vyrezannykh iz agregatov LA [Experimental determination of the actual strength characteristics for the elements of three-layer panels cut from the aircraft assembly]. *Journal on Composite Mechanics and Design*, 2025, vol. 31, no. 1, pp. 101–116. EDN: DYFKBG
- [20] Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I. Ispytaniya obraztsov iz trekhsloynnykh konstruktssiy s sotovym zapolnitelem [Testing of samples from three-layer structures with honeycomb filler]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2025, no. 10, pp. 133–155. dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2025-0-10-133-155
- [21] Nowakowski D. et al. Examination of honeycomb core compliance in sandwich structure. *Fatigue of Aircraft Structures*, 2019, vol. 2019, no. 11, pp. 19–27.
- [22] Jedral A. Review of testing methods dedicated for sandwich structures with honeycomb core. *Transactions on Aerospace Research*, 2018, vol. 3, pp. 7–20. <https://doi.org/10.2478/tar-2019-0006>
- [23] Widagdo D., Kuswoyo A., Nurpratama O.T., Hadi B.K. *Experimental flatwise tensile strength dataset of carbon fibre reinforced plastic sandwich panels with different core material preparations*. 2019. Data in brief 28 (2020) 105055. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105055>
- [24] Abbadi A., Tixier C., Gilgert J., Azari Z. Experimental study on the fatigue behavior of honeycomb sandwich panels with artificial defects. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.10.020>
- [25] Sun Z., Shi Sh., Guo X., Hu X., Chen H. On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.054>
- [26] Kim G., Sterkenburg R., Waterloo T. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. *Composite Structures*, 2018, vol. 206, pp. 535–549. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.054>
- [27] Laplante G. Detection of water ingress in composite sandwich structures: A magnetic resonance approach. *NDT & E International*, 2005, vol. 38, no. 6, pp. 501–507. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2005.01.006>
- [28] Ustarkhanov O.M., Muselemov Kh.M., Kiayvov U.A., Ustarkhanov T.O. Opredeleniye ratsionalnykh form sotovogo zapolnitelya dlya trekhsloynnoy balki pri deystvii staticheskoy nagruzki [Definition of rational forms honeycomb core for sandwich beams under static loading]. *Sovremennaya nauka: aktualnyye problemy i puti ikh resheniya (Modern Science: Current Problems and Solutions)*, 2014, no. 12, pp. 46–51. EDN: SYDCJD
- [29] Xiong J., Du Y., Mousanezhad D., Asl M.E., Norato J., Vaziri A. Sandwich structures with prismatic and foam cores: A review. *Advanced Engineering Materials*, 2019, vol. 21, no. 1, paper 1800036. DOI: 10.1002/adem.201800036

- [30] He R., Zhao C., Wang G., Zhang Z., Li F. Finite Element Analysis of in-plane compression of aluminum alloy honeycomb panels. *Structures*, 2023, vol. 49, pp. 267–280.
- [31] Basharov E.A. Raschet optimal'nykh konstruktivnykh parametrov i primeneniye v aerokosmicheskikh konstruksiyakh trekhsloynnykh sotovykh paneley iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Computation of optimal design parameters and introduction of the three-layer honeycomb panels made from polymer composite materials in the aerospace systems]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2024, iss. 10. EDN JOFBHO
- [32] Mousavi Safavi Seyed Mohammad. *Modelirovaniye i proyektirovaniye fermenynykh zapolniteley trekhsloynnykh konstruksiy aviakosmicheskogo naznacheniya: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.5.13* [Modeling and design of truss cores of three-layer structures for aerospace applications: Diss. ... Cand. Sc. in Engineering]. Kazan, 2022, 141 p.
- [33] Abdullin I.N. *Ratsionalnoe proektirovaniye trekhsloynnykh konstruksiy so sterzhnevym zapolnitelem: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.07.02* [Rational design of three-layer structures with rod filler: Diss. ... Cand. Sc. in Engineering]. Kazan, 2016, 125 p.
- [34] Kaman M.O., Solmaz M.Y., Turan K. Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels. *Journal of composite materials*, 2010, vol. 44, no. 24, pp. 2819–2831. <https://doi.org/10.1177/0021998310371541>
- [35] Akkus H., Duzcukoglu H., Sahin O.S. Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with epoxy-based adhesives reinforced with nanoparticles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31 (1), pp. 165–170. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1216-0>
- [36] Jang J., Jeong S., Oh D., Cho Je-H., Noh J. Test and evaluation procedure of foam core materials for composite ships. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 2020, vol. 26 (3), pp. 103–119. DOI: 10.7837/kosomes.2020.26.3.286
- [37] Nurul Lailarul M., Taufiq Satrio Nurtiasto, Rezky Agung Pratomo, Afid Nugroho, Anis Mutiara Balqis. Studi sifat mekanik komposit sandwich divinycell foam dengan metode vacuum assisted resin infusion (vari) untuk float pesawat amfibi. Conference: *Prosiding Seminar Nasional Riset Teknologi Terapan*, 2021. Indonesia. e-ISSN:2747-1217
- [38] Djemaoune Y., Krstic B., Radulovic D., Rasic S., Dodic M. Numerical investigation of open-hole damaged NomexTM honeycomb panel under three-point bending load. *Scientific Technical Review*, 2021, vol. 71, no. 2, pp. 14–18. DOI: 10.5937/str2102014D
- [39] Evstafiev V.A. *Konstruirovaniye kosmicheskikh apparatov* [Design of spacecraft]. Part 1. St. Petersburg, BSTU "VOENMEKh" named after D.F. Ustinov, 2018.
- [40] Butukuri R.R., Bheemreddy V., Chandrashekhara K., Berkel T.R., Rupel K. Evaluation of skin-core adhesion bond of out-of-autoclave honeycomb sandwich structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, vol. 31, no. 5, pp. 331–339. DOI: 10.1177/0731684412437267
- [41] Malysheva G.V., Grashchenkov D.V., Guzeva T.A. Otsenka tekhnologichnosti ispol'zovaniya kleyev i kleyevykh prepregov pri izgotovlenii trekhsloynnykh paneley [Evaluation of technological use efficiency of adhesives and glue prepregs in the manufacture of three-layer panels]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii* (Aviation Materials and Technology), 2018, no. 4 (53), pp. 26–30. DOI: 10/18577/2071-9140-2018-0-4-26-30

- [42] Pavlova S.A. Analiz kontaktного vzaimodeystviya polimernogo sotovogo zapolnitelya s nesushchimi sloyami v trekhsloynnykh konstruktsiyakh [Analysis of contact interaction of polymer honeycomb core and CFRP base layers in sandwich-core constructions]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye — VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 87–96. EDN XLOEFT
- [43] Grove S.M., Popham E., Miles M.E. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 5, pp. 804–812. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.07.005
- [44] Rion J., Leterrier Y., Manson J.-A.E. Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra-light sandwich structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, vol. 39, no. 9, pp. 1547–1555. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.05.022
- [45] Vishtalov R.I., Muselemov H.M., Ustarkhanov O.M. Opredeleniye privedennykh kharakteristik sotovykh zapolniteley razlichnykh form [The definition of the given characteristics of honeycomb fillers of the different shapes]. *Vestnik Dagestanskogo gos. tekhn. un-ta. Tekhnicheskiye nauki — Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*, 2016, vol. 42, no. 3, pp. 155–166. DOI: 10.21822/2073-6185-2016-42-3-155-166
- [46] Ivañez I., Sanchez-Saez S. Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core. *Composites Structures*, 2013, vol. 106, pp. 716–727.
- [47] Buitrago B.L., Santiuste C., Sánchez-Sáez S., Barbero E., Navarro C. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact. *Composites Structures*, 2010, vol. 92, pp. 2090–2096.
- [48] Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Chislenyy analiz povedeniya trekhsloynnoy paneli s sotovym zapolnitelem pri nalichii defektov pod deystviyem dinamicheskoy nagruzki [Numerical analysis of the behavior of a three-layer honeycomb panel with interlayer defects under action of dynamic load]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий — Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2021, no. 17 (4), pp. 357–365. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-357-365>
- [49] Pavlov M.V. *Metodiki opredeleniya raschetnykh kharakteristik trekhsloynnykh materialov dlya obespecheniya staticheskoy prochnosti konstruktсий letatel'nogo apparata. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methods for determining the design characteristics of three-layer materials to ensure the static strength of an aircraft structure. Diss. ... Cand. Sc. in Engineering]. Zhukovsky, 2025, 184 p.
- [50] Wang Z., Li Z., Zhou W., Hui D. On the influence of structural defects for honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 142, pp. 183–192.
- [51] Chen D.H., Ozaki S. Stress concentration due to defects in a honeycomb structure. *Composites Structures*, 2009, vol. 89, pp. 52–59.
- [52] Rizov V., Shipsha A., Zenkert D. Indentation study of foam core sandwich composite panels. *Composite Structures*, 2005, vol. 69, no. 1, c. 95–102.
- [53] Keselman G.D., Zimin I.I., Danilov E.N., Patraev E.V., Gryaznov V.N. Raschet na prochnost' trekhsloynnoy konstruktсий i zakladnykh elementov [Calculation on strength of three-layered design and fitted elements]. *Konstruktсий iz kompozitsionnykh materialov — Composite Materials Constructions*, 2006, no. 1, pp. 6–15. EDN: KBEJYL

- [54] Volkov A.N. *Modelirovaniye i raschet slozhnykh trekhsloynnykh konstruktsey s diskretnym zapolnitelem: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.5.14* [Modeling and calculation of complex three-layer structures with discrete filler: Diss. ... Cand. Sc. in Engineering]. Moscow, MAI, 2023.

Bush A.V., Head of the Design Department, JSC “ORPE “Technologiya” named after A. G. Romashin”. e-mail: bush@technologiya.ru

Sviridov A.G., Director of SPC “Composite” — Chief Designer, JSC “ORPE “Technologiya” named after A. G. Romashin”. e-mail: agsviri-dov@technologiya.ru

Egorov A.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: av_egorov@bmstu.ru