

## СЕТЧАТЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ – ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В РОССИИ И МИРЕ

А. А. Склезнев✉

Акционерное общество «Центр перспективных разработок»  
г. Хотьково, Московская область, Российская Федерация

*В работе приведён обзор современного состояния исследований в области проектирования и создания анизотридных сетчатых композитных структур – силовых сетчатых конструкций оболочечного типа – в России и за рубежом. Приведены исторические сведения о возникновении сетчатых конструкций, краткая история их становления – проводимые исследования, достигнутые результаты, решённые задачи. Проведён анализ применения сетчатых структур за рубежом в авиакосмической отрасли. В работе дана обобщённая информация о существующих и применяющихся в настоящий момент методах проектирования анизотридных структур, методах расчёта сетчатых конструкций на прочность, жёсткость и устойчивость, а также об основных технологических приёмах и способах изготовления анизотридных сетчатых структур с разделением на отечественную и зарубежную практику. В работе представлена информация о текущих направлениях применения сетчатых анизотридных структур в ракетной технике, авиации и космонавтике, определён круг проблемных вопросов и направлений будущих исследований. Приведены примеры инновационного применения сетчатых анизотридных конструкций, прорабатываемых в настоящий момент, снабжённые иллюстрациями, указаны основные научные центры России, занимающиеся разработками в области создания и изготовления композитных сетчатых анизотридных структур.*

*Ключевые слова: сетчатая структура, анизотрид, композитный материал.*

### Введение

Как показывает практика применения силовых конструкций из композитных материалов, в настоящий момент сетчатые композитные анизотридные конструкции (рисунок 1) являются наиболее эффективными конструкциями по весовому совершенству, обладающими высокими удельными жёсткостью и прочностью, а также технологичностью изготовления, при сравнении их с такими конструктивно-силовыми схемами, как подкреплённые оболочечные конструкции и трёхслойные оболочки из композитных материалов. В сетчатых конструкциях рёбра из однонаправленного композитного материала, образующие регулярную структуру, являются основными несущими элементами и обеспечивают одновременно прочность, изгибную и мембранную жёсткости конструкции.

История возникновения сетчатых конструкций началась в начале семидесятых годов в Московском авиационном институте и связа-

на с разработкой И.М. Зайцевым тетраструктур (иногда ошибочно ассоциируемых с анизотридными структурами). Эти исследования и привели к идее академика В.В. Васильева по применению композитов на полимерной основе для создания регулярной сетчатой структуры по аналогии с гиперболическими башнями и перекрытиями зданий русского инженера конца XIX-начала XX века В.Г. Шухова [1], которые изготавливались из металлических сплавов. Одним из ярчайших памятников является Шуховская башня на Шаболовке в Москве. Стоит отметить, что в последующие десятилетия с начала XX столетия идея регулярных сетчатых структур применялась серийно в авиации во время Второй мировой войны. Так, английский бомбардировщик Wellington [2], выпускавшийся с 1940 по 1945 год, имел сетчатую конструкцию планера.

Исследования сетчатых структур, методов их проектирования и расчёта, технологическая отработка создания конструкций подобного рода были продолжены в МАТИ на кафедре академика В.В. Васильева такими учёными, как В.А. Бунаков, Е.В. Морозов, А.В. Лопатин,

✉ andrey.skleznev@gmail.com

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024



Рисунок 1. Сетчатая анизотридная конструкция

с привлечением в дальнейшем сотрудников АО «ЦНИИСМ» А.Ф. Разина, А.А. Бабичева, А.В. Азарова, и далее распространились на другие научно-технические центры России и мира. В частности, серьёзными исследованиями по сетчатым структурам в настоящий момент в НГТУ занимается Т.В. Бурнышева, в Италии ученик академика В.В. Васильева G. Totaro, в ЦАГИ Е.А. Дубовиков, продолжаются исследования сетчатых структур в АО «РЕШЕТНЁВ», ЦНИИСМ и ЦПР (г. Хотьково) и МГТУ им. Баумана.

Результатом проводимых исследований и разработок к началу 2000-х годов стали первые попытки успешного применения сетчатых структур в ракетно-космической отрасли. В качестве примеров можно упомянуть совместные работы ЦНИИСМ и американской компании McDonnell Douglas Corp., впоследствии объединённой с Boeing в области создания сетчатых конструкций [3–4]; межступенные отсеки модернизированной ракеты-носителя (РН) Протон-М вместе с коническим адаптером полезной нагрузки, имевшие диаметр 4,1 м и рассчитанные на восприятие эквивалентной осевой сжимающей силы порядка 1100 тонн, успешно запущенные в составе РН более 100 раз за последние 20 лет; а также универсальную спутниковую несущую платформу – силовую сетчатую конструкцию корпуса тяжёлого космического аппарата в тандеме с сетча-

тым адаптером полезной нагрузки производства АО «РЕШЕТНЁВ», успешно запущенные более 25 штук с 2011 года и работающие по сей день.

В итоге в настоящее время применение сетчатых структур не только успешно развивается в ракетно-космической отрасли, о чём будет сказано несколько слов ниже, но и распространяется на другие отрасли народного хозяйства – строительную, авиационную, в том числе иностранными коллегами, о чём свидетельствуют обзоры [5, 6].

## 1. Проектирование и расчёт сетчатых конструкций

Работы по проектированию, расчёту прочности и устойчивости сетчатых структур – оболочечных цилиндрических и конических конструкций, пластин, балок – представляют наибольшее количество публикаций и исследований в общей массе работ по сетчатым анизотридным структурам.

При этом в последние годы растёт количество исследований в первую очередь теоретических и вычислительных с применением, например, метода конечных элементов, проводимых исследователями за пределами России, в частности – в Китае, Корее и Японии, Иране, странах Европейского содружества, Великобритании, Австралии. Меньше всего информации о наличии таких работ в Северной и Южной Америке,

несмотря на то, что учёные Северной Америки хорошо знакомы с концепцией композитных сетчатых структур по совместным работам с ЦПП компаний McDonnell Douglas и Boeing в начале XXI века.

Основные результаты, достигнутые в области проектирования, расчёта и применения сетчатых композитных конструкций, отражены в книге [7], обзорах [8–11] и диссертациях А.Ф. Разина, А.В. Азарова, А.А. Бабичева, Т.В. Бурнышовой и автора настоящей статьи. В статье [8] приводится обзор российского опыта разработки и приложения в космической технике анизотропных композитных сетчатых конструкций (Anisogrid – Анизотропная Сетка), изготавливаемых в АО «Центр перспективных разработок» и АО «ЦНИИСМ».

Значительный интерес зарубежных авторов в настоящее время вызывают вопросы численного подтверждения работоспособности, прочности и устойчивости разнообразных сетчатых структур, что подтверждается большим количеством работ в последние годы [12–29]. Однако стоит отметить, что данные работы в большей части носят теоретический характер, в исключительных случаях приводя сведения об экспериментах над модельными лабораторными образцами, – широкого промышленного внедрения в производстве за рубежом сетчатые конструкции до сих пор не имеют.

Меньше всего, несмотря на значительное количество работ по частотному анализу сетчатых конструкций [30–33], исследованы вопросы динамического поведения сетчатых конструкций.

Среди таких работ можно выделить [34–37] исследования поведения сеток при локальном ударном воздействии [38], анализ демпфирующей способности сетчатых структур приведён в работе П.А. Зиновьева [39].

## 2. Анизотропные структуры в конструкции РН-отсеки, адаптеры, топливные баки

Композитная сетчатая структура является основной конструктивно-силовой схемой, используемой в конструкции переходных отсеков РН Протон-М, первый запуск которых осуществлён в 2006 году. В частности, показаны верхняя проставка и хвостовая проставка РН Протон-М, изготовленные совместно с наружной обшивкой из углепластика и способные воспринимать до 12 МН эквивалентной сжимающей силы. Также широкое применение нашёл сетчатый адаптер полезной нагрузки (рисунок 2), развивающийся в новые виды конструкций [40, 41], способных выводить без дополнительных конструктивных решений не один, а множество космических аппаратов, в том числе малых – для создания группировок спутников, по аналогии со Старлинком.

Новым направлением применения сетчатых структур является идея совмещения конструкции силового корпуса и бака высокого давления в конструктивно-силовой схеме криогенных топливных металлокомпозитных баков для применения в составе ракет-носителей на жидком или газообразном топливе [42]. Данное направление в последнее время получило бурное развитие и со-

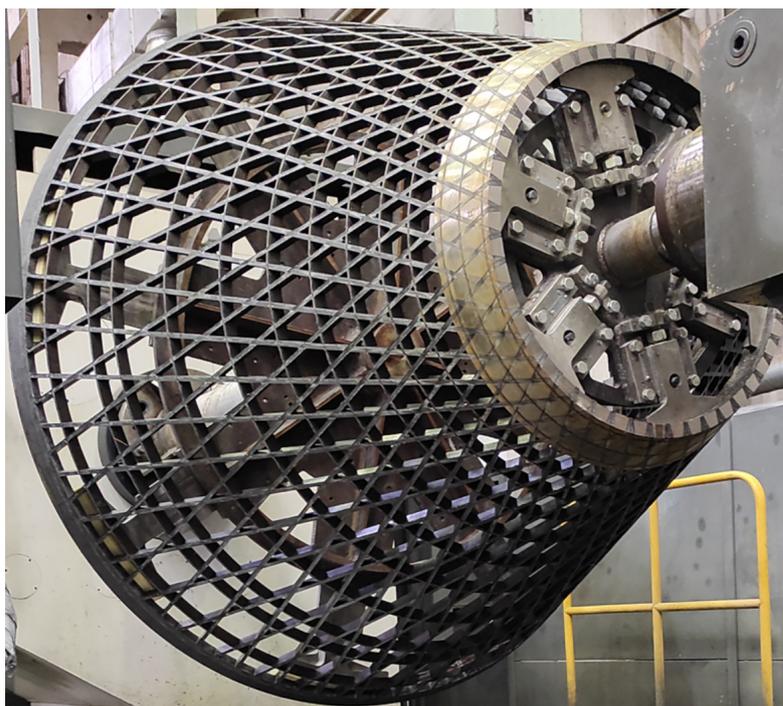


Рисунок 2. Сетчатый переходный отсек – адаптер полезной нагрузки

держит огромное количество новых нерешённых научно-технических задач.

### 3. Сетчатые структуры в конструкции космических кораблей

Наиболее разнообразное применение в настоящий момент сетчатые анизотридные конструкции получили в конструктивных элементах космических кораблей [43, 44]. При этом они могут не только использоваться как силовые конструкции корпуса космического корабля (рисунок 1), но и являться несущим элементом для крепления баков рабочего тела на системах крепления с натяжением [45], представлять собой элементы жёсткости – фермы, каркасы рефлекторов антенн, а также разнообразные панели для крепления бортовой аппаратуры и иных целей. Типовые конструкции имеют форму цилиндрических оболочек, закреплённых по нижнему основанию при выведении на орбиту.

Эффективность использования сетчатых структур в качестве силовых корпусов космических аппаратов привела к тому, что в АО «РЕШЕТНЁВ» эти конструкции используются в качестве основы универсальной космической платформы для создания своих новых космических аппаратов [46].

Вместе с тем за рубежом кроме лабораторного и макетного использования сетчатые структуры пока не получили широкого применения в космических аппаратах, даже несмотря на то, что в конце 2015 года Европейским космическим агентством (ESA) был объявлен конкурс на разработку композитной сетчатой трубы космического аппарата.

### 4. Сетчатые конструкции в авиационной технике

Несмотря на успешное применение в космической области, в авиационной технике применение сетчатых структур ещё не так развито. Ведутся единичные исследовательские работы над макетными образцами [47]. На базе АО «ЦНИИСМ» с привлечением специалистов АО «ЦПР» с 80-х годов XX века создано несколько макетов фюзеляжей гражданских пассажирских самолётов, ведутся работы по технологической отработке применения обшивок из разнородных материалов [48, 49], например металлических, совместно с композитными сетчатыми структурами, работы по созданию несущего кессона сетчатого крыла [50].

Зарубежные исследователи в последнее время также некоторое внимание уделяют использованию сетчатых структур [51, 52] в конструкциях элементов атмосферных летательных аппаратов.

### 5. Сетчатые структуры в гражданском строительстве

Новым в создании сетчатых конструкций и их применении является попытка использования сетчатых структур в качестве армирующих элементов для бетона [53] или даже льда [54] – для арктического, например, применения. Стоит отметить, что данные исследования могут помочь в будущем при строительстве внеземных баз и сооружений – в том случае, когда будет использован строительный вяжущий материал и вода с Луны или другого небесного тела, а армирующие структуры будут извлечены из корпусов прибывших космических кораблей.

### 6. Технология изготовления

Одними из самых важных вопросов являются технологические вопросы, напрямую связанные с изготовлением сетчатых структур в России и за рубежом. В отечественной практике для изготовления такого рода конструкций применяется технология автоматизированной «мокрой» намотки, в то время как за границей она практически не используется. Вместо нее применяют либо выкладку роботизированными установками, либо намотку «сухим» препрегом с последующей вакуумно-инфузионной пропиткой или температурным дополнительным отверждением конструкции. Не вдаваясь в критику такого подхода, отмечу, что, по нашему мнению, именно такой подход является сдерживающим фактором для распространения применения сетчатых структур за рубежом, не позволяя нашим коллегам и по совместительству конкурентам получать нужные для эффективного применения физико-механические характеристики материала и свойства готовых изделий.

В настоящий момент в отечественной «мокрой» намотке также остаётся ряд недостаточно проработанных задач и вопросов, в частности, связанных с производством крупногабаритных конструкций [55], выбором формообразующего материала [56], применением разнородных материалов [57] оправок и изделий. Технологические вопросы изготовления сетчатых структур рассматриваются также и иностранными авторами [58].

### 7. Нерешённые задачи в области сетчатых структур

Среди нерешённых задач в настоящий момент, основываясь на собственном опыте и вышеизложенной информации, автор выделяет следующие. В первую очередь малоизученной остаётся область динамического поведения сетчатых конструкций – демпфирующая способность анизотридов, анализ ударного и вибраци-

онного воздействия на конструкцию извне в процессе длительной эксплуатации. Кроме этого, с конструктивно-технологической точки зрения недостаточно проработанными и отработанными остаются вопросы применения разнородных с материалом сетчатой структуры внешней и внутренней обшивок, вопросы качественного соединения рёбер сетки с обшивками. И третьим по порядку, но не последним по своему значению является решение вопроса повышения верхнего предела диапазона температур эксплуатации сетчатых структур к границам 300–400 °С, что может быть реализовано как поиском и применением новых видов полимерных реактопластических связующих для серийного производства сетчатых структур методами автоматизированной «мокрой» намотки, так и форсированием работ по применению новых суперконструкционных термопластических связующих, например РЕЕК, с внедрением в технологический процесс изготовления сетчатых структур

намоткой с натяжением, в основном применяемый на предприятиях отечественной промышленности.

## Заключение

Анализируя представленную выше информацию, можно сделать вывод о том, что развитие сетчатых конструкций в настоящий момент выходит на новый уровень – анизотридные структуры выходят из специализированной ниши космического применения, распространяясь на авиационную технику, другие области, включая строительство. Идут попытки зарубежных исследователей внедрить данную концепцию для решения собственных задач. Вместе с тем сдерживающим фактором является недостаточная развитость технологической базы для применения новых термопластических материалов, новых высокотемпературных связующих, недостаточные вопросы исследования динамического поведения сетчатых конструкций.

## Список литературы

- [1] Васильев В.В. Идеи В.Г. Шухова в современной аэрокосмической технике / В.В. Васильев, под. ред. Ф.Л. Черноусько // Актуальные проблемы механики. Современная механика и развитие идей В.Г. Шухова. Москва: Наука, 2011. С. 111–127.
- [2] Маккей Р. Веллингтон в действии. Эскадрилья (на англ.) / Сигнал Публикейшнс. 1986. 17 с.
- [3] Васильев В. В., Разин А. Ф., Андронов А. И., Салов В. А. Композитная оболочка в форме тела вращения и узел соединения панелей // Патент US 6068902А, Корп. МакДоннел-Дуглас/ЦПР, 29.10.1997
- [4] Васильев В. В., Разин А. Ф., Салов В. А., Бунаков В. А., Солдатов С. А., Захаревич Л. П., Вольдман М. Композитная поперечная нервюра крыла и устройство для изготовления из нее плоской ячеисто-ребристой конструкции // Патент US 5993941А, Корп. МакДоннел-Дуглас/ЦПР, 30.11.1999
- [5] Хант К. Дж., Морабито Ф., Грейс К., Чжао Я., Вудс Б. К. С. Обзор композитных решетчатых структур (на англ.) // Композитные структуры. Т. 284, 15 марта 2022, 115120
- [6] Ли М., Чжу Х., Лай Ч., Бао В., Хань Х., Линь Ж., Хэ В., Фань Х. Последние достижения в области легких армированных углеродным волокном сетчатых цилиндрических оболочек (на англ.) // Прогресс в аэрокосмических науках. 2022. Т. 135. 100860.
- [7] Васильев В. В., Разин А. Ф., Азаров А. В. Композитные сетчатые конструкции – проектирование, расчёт и изготовление // М.: Инновационное машиностроение. 2023. 488 с.
- [8] Васильев В. В., Разин А. Ф. Анизотридные сетчатые композитные конструкции для космических и авиационных аппаратов // Композитные конструкции. 2006. Т. 76 (1–2). С. 182–189.
- [9] Тотаро Дж., Спена П., Джусто Г., Де Никола Ф., Кириенко С., Дас С. Высокоэффективные сетчатые конструкции из анизотрипной углеродной резины для центральных труб спутников среднего класса: проектирование, изготовление и эксплуатационные характеристики (на англ.) // Композитные структуры. 2021. Т. 258. 113368.
- [10] Тотаро Дж., Де Никола Ф. Последние достижения в проектировании и производстве композитных анизотридных структур для космических ракет-носителей // Композитные конструкции. 2012. Т. 81. С. 570–577.
- [11] Рауф Н., Давар А., Пуртакдуст С. Х. Анализ надежности композитной анизотридной сетчатой межступенчатой структуры (на англ.) // Проектирование конструкций и машин на основе механики. 2020. Т. 50, Вып. 9. С. 3322–3330.
- [12] Хэ Л., Маалла А., Чжоу С., Тан Х.. Выпучивание и последующее выпучивание анизотридных сэндвич-пластин с решетчатым сердечником и нанокompозитными оболочками (на англ.) // Тонкостенные конструкции. 2024. Т. 199. 111828.
- [13] Бао В., Ли М., Ань С., Хань Х., Лу Ю., Фань Х. Анализ отказов на иерархическом уровне для сетчатой углепластиковой панели (на англ.) // Тонкостенные конструкции. 2023. Т. 183. 110354.
- [14] Ким Ё., Ким И., Юнгсун П. Приближенная формулировка для анализа прогрессирующего отказа композитной сетчатой цилиндрической панели в аэрокосмических приложениях (на англ.) // Аэрокосмическая наука и техника. 2020. Т. 106. 106212.

- [15] Ли М., Лай Ч., Чжэн Ц., Фань Х. Многократный анализ отказов армированных углеродным волокном анизотридных сетчатых цилиндров (на англ.) // *Аэрокосмическая наука и техника*. 2020. Т. 100. 105777.
- [16] Лопатин А. В., Морозов Е. В., Шатов А. В. Выпучивание двухосносжатой анизотридной композитной цилиндрической панели с заземленными краями (на англ.) // *Европейский журнал механики – А / Твердые тела*. 2021. Т. 85. 104090.
- [17] Ли Ё.-Г., Чой Д.-Х., Ли М.-Д., Ким С.-М. Метод изготовления стабилизирующего прочность на сжатие ребер композитной конструкции из анизотридной сетки без внешней оболочки (на англ.) // *Композиты Часть В: Инженерия*. 2020. Т. 203. 108452.
- [18] Абеди М. М., Недушан Р. Д., Шейхзаде М., Вунг-Рёль Ю. Характеристики ударопрочности тонкостенных сверхлегких плетеных сетчатых композитных колонн: экспериментальное и конечно-элементное исследование (на англ.) // *Композиты, часть В: Инженерное дело*. 2020. Т. 202. 108413.
- [19] Фаллах Ф., Таати Э., Асгари М. Разделенное уравнение устойчивости для анализа потери устойчивости функционально структурированных и многослойных цилиндрических оболочек на основе теории деформации сдвига первого порядка (на англ.) // *Композиты Часть В: Инженерное дело*. 2018. Т. 154. С. 225–241.
- [20] Лай Ч., Ху Я., Чжэн Ц., Фань Х. Цельнокомпозитные фланцы для сэндвич-панелей с сетчатым сердечником из анизотридной стали, выдерживающие растягивающую нагрузку (на англ.) // *Композитные коммуникации*. 2020. Т. 19. С. 189–193.
- [21] Смитс Б. Дж. Р., Фаган Э. М., Мэтьюз К., Телфорд Р., Мюррей Б. Р., Павлов Л., Уифер Б., Мейер П., Гоггинс Д. Структурные испытания точки крепления сдвиговой сетки на композитном сетчатом цилиндре для аэрокосмических применений (на англ.) // *Композиты Часть В: Инженерия*. 2021. Т. 212. 108691.
- [22] Чон М.-Х., Ким И.-Г., Кёнсик У. Анализ прогрессирующего разрушения анизотридной цилиндрической композитной сетчатой структуры с производственными дефектами (на англ.) // *Композитные конструкции*. 2023. Т. 321. 117237.
- [23] Ниманн С., Вагнер Х. Н. Р., Хюне К. Панель с анизотридом, усиленная осевым сжатием: изготовление, численный анализ и экспериментальные испытания (на англ.) // *Тонкостенные конструкции*. 2021. Т. 161. 107483.
- [24] Чжэн Ц., Цзян Д., Хуан Ч., Шан С., Цзюй С. Анализ разрушающих нагрузок и оптимальное проектирование композитного сетчатого цилиндра при осевом сжатии (на англ.) // *Композитные конструкции*. 2015. Т. 131. С. 885–894.
- [25] Маес В. К., Павлов Л., Симонян С. М. Эффективный полуавтоматический подход к оптимизации для (усиленных сеткой) композитных конструкций: применение к переходному отсеку РН Ариан 6 (на англ.) // *Композитные конструкции*. 2019. Т. 209. С. 1042–1049.
- [26] Шрофф С., Акар Э., Кассапоглу Х. Проектирование, анализ, изготовление и испытания композитных панелей с сетчатым усилением для авиационных конструкций (на англ.) // *Тонкостенные конструкции*. 2017. Т. 119. С. 235–246.
- [27] Лопатин А. В., Морозов Е. В., Шатов А. В. Осевая деформируемость сетчатой цилиндрической оболочки из композитного материала при сжимающей нагрузке: Приложение к несущему трубчатому корпусу космического аппарата (на англ.) // *Композитные конструкции*. 2016. Т. 146. С. 201–206.
- [28] Тотаро Г. Свойства изгибной, крутильной и осевой глобальной жесткости конических оболочек из анизотридной сетки из композитного материала (на англ.) // *Композитные конструкции*. 2016. Т. 153. С. 738–745.
- [29] Ёкодзеки Т., Симидзу Ё., Исии М., Кимизука К., Судзуки С., Ямасаки Ё., Тэрашима К., Камита Т., Аоки Т. Механическое поведение при сжатии композитной панели Х-решетки с обшивкой и гофрированными ребрами (на англ.) // *Композитные конструкции*. 2017. Т. 168. С. 863–871.
- [30] Ло Ц., Пэн Ш., Хоу С., Киани Я. Анализ вибрации пластин анизотридной структуры с одинаковой шириной ребра на основе непрерывной модели (на англ.) // *Тонкостенные конструкции*. 2024. Т. 195. 111386.
- [31] Баниджамали С. М., Джафари А. А. Анализ вибрации и критические скорости вращающейся функционально-градиентной конической оболочки, усиленной сетчатой анизотридной структурой на основе теории деформации сдвига первого порядка (на англ.) // *Тонкостенные конструкции*. 2023. Т. 188. 110841.
- [32] Чжан Д., Ван Ю., Пан Г., Хозури А. Нелинейное моделирование свободных колебаний пластин с анизотридной сеткой на основе анализа слабой формулировки (на англ.) // *Сообщения по нелинейной науке и численному моделированию*. 2023. Т. 123. 107277.
- [33] Ши Х., Фань Х., Шао Г. Динамическая теория композитных анизотридных сетчатых конических оболочек с непостоянной жесткостью и плотностью (на англ.) // *Прикладное математическое моделирование*. 2023. Т. 115. С. 661–690.
- [34] Бунаков В. А., Лебедев И. К. Динамическая устойчивость оболочек сетчатой структуры из композитных материалов // *Науч. вестн. МГТУ ГА*. 2000. № 29. С. 45–50.
- [35] Разин А. Ф. Расчётно-экспериментальная отработка сетчатых композитных отсеков летательных аппаратов // *Вопросы оборонной техники. Серия 15*. 2000. Вып. 1(122). С. 23–25.

- [36] Склезнев А. А. Прикладной метод определения собственных частот колебаний цилиндрических и конических сетчатых композитных конструкций космических аппаратов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2010. Т. 16. № 2. С. 241–250.
- [37] Склезнев А. А. Влияние технологических отверстий на собственные частоты колебаний сетчатых композитных конструкций летательных аппаратов // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*. 2012. № 4 (51). С. 3–10.
- [38] Бабичев А. А., Васильев В. В., Разин А. Ф., Склезнев А. А., Шаныгин А. Н., Фомин Д. Ю., Марескин И. В. Исследование сопротивления композитных сетчатых конструкций ударному повреждению // *Конструкции из композиционных материалов*. 2021. № 3 (163). С. 3–6.
- [39] Зиновьев П. А. Энергетические структурно-феноменологические модели диссипативных свойств анизотропных тел и волокнистых композитов // *Дисс. ... докт. техн. наук. М.: МГТУ*. 1997. 373 с.
- [40] Склезнев А. А., Бабичев А. А., Разин А. Ф. Конструкция и технология изготовления сетчатого адаптера из полимерных композиционных материалов для одновременного вывода нескольких полезных нагрузок // В сборнике: *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского*. Москва. 2021. С. 142–147.
- [41] Склезнев А. А., Бабичев А. А., Борисов В. Н. Поликонический композитный сетчатый адаптер полезной нагрузки и технология его изготовления // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 2 (249). С. 52–55.
- [42] Титов В. А., Юранев О. А., Разин А. Ф., Бабичев А. А., Склезнев А. А., Пшеничников И. В., Бородулин Д. А. Проектирование и изготовление криогенных металлокомпозитных топливных баков // *Конструкции из композиционных материалов – межотраслевой научно-технический журнал*. 2023. № 2 (170). С. 12–20.
- [43] Разин А. Ф., Никитюк В. А., Халиманович В. И. Анализ сетчатых структур из композиционных материалов, применяемых в силовых конструкциях космических аппаратов // *Конструкции из композиц. матер*. 2011. № 2. С. 3–7.
- [44] Тотаро Г., Спена П., Джусто Г., Де Никола Ф., Кириенко С., Дас С. Высокоэффективные сетчатые анизотропные конструкции из углепластика для центральных труб спутников среднего класса: проектирование, изготовление и эксплуатационные характеристики (на англ.) // *Композитные конструкции*. 2021. Т. 258. 113368.
- [45] Мироненко Е. Д., Бабичев А. А., Склезнев А. А. К вопросу обеспечения натяжения вант композитного бака высокого давления космического аппарата // *Вестник НПО им. С. А. Лавочкина*. 2019. № 1 (43). С. 66–70.
- [46] Жуль Н. С., Мошкин И. Д., Шаклеин П. А. и др. Космическая платформа // *Патент 2688630 Российской Федерации; заявл. 10.11.2016; опубл. 05.21.2019.* – Бюл. № 15.
- [47] Склезнев А. А. Применение сетчатых композитных конструкций при проектировании новых летательных аппаратов // В сборнике: *Перспективное развитие науки, техники и технологий. Материалы II-ой Международной научно-практической конференции в 2 т. Ответственный редактор: Горохов А. А.* 2012. С. 113–116.
- [48] Склезнев А. А., Червяков А. А., Агапов И. Г. Решение задачи оптимизации в целях проектирования сетчатой структуры из полимерных композиционных материалов с наружной обшивкой // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2022. Т. 25. № 4. С. 70–82.
- [49] Склезнев А. А., Бабичев А. А. К вопросу расчёта жёсткостных характеристик сетчатых композитных конструкций с металлическими обшивками // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29. № 2. С. 220–227.
- [50] Склезнев А. А. Программное обеспечение для проектирования композитного сетчатого крыла самолёта // *Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015614050.– 06.04.2015.*
- [51] Кусни М., Хади Б. К., Гунаван Л., Сьямсудин Х. Разработка анизотропных сетчатых композитных конструкций для применения в крыле самолёта-истребителя (на англ.) // *Международный журнал аэрокосмической техники*. 2024. 6667586.
- [52] Белардо М. А., Гарди Р. А. Концептуальное проектирование соединения между системой тепловой защиты C/SiC и холодной анизотропной конструкцией фюзеляжа (на англ.) // *Процедия Инжиниринг*. 2015. Т. 114. С. 46–53
- [53] Склезнев А. А., Разин А. Ф. Бетонные конструкции с сетчатой композитной арматурой // *Композиты и наноструктуры*. 2015. Т. 7. № 3 (27). С. 145–150.
- [54] Разин А. Ф., Бабичев А. А., Склезнев А. А. Арктический строительный материал, армированный композитной сетчатой структурой (на англ.) // *Материаловедческий форум*. 2019. Т. 945. С. 15–19.
- [55] Кузьмин А. А., Бабичев А. А., Склезнев А. А., Слитков М. Н. Анализ температурного воздействия на габаритные изделия из полимерных композиционных материалов в процессе их изготовления и эксплуатации // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2019. Т. 1. С. 71–74.

- [56] Склезнев А. А., Разин А. Ф. Влияние формы ребра на несущую способность анизотридных сетчатых структур // В сборнике: Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник трудов 6-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского: в 2 т.– 2016. С. 184–189.
- [57] Склезнев А. А., Бабичев А. А., Разин А. Ф. Исследование взаимного влияния заготовки изделия из полимерного композиционного материала и технологической оправки друг на друга в процессе изготовления при температурной обработке // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 1 (47). С. 56–60.
- [58] Ли Ё.-Г., Ли Д.-О. Технология изготовления и проверка секции механического крепления композитных конструкций из анизотридных армированных углеродным волокном композитных материалов (на англ.) // Композитные конструкции. 2021. Т. 268. 113895.

## LATTICE COMPOSITE STRUCTURES – CURRENT STATE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT IN RUSSIA AND THE WORLD

**A. A. Skleznev**

*Joint-Stock Company “Center for Advanced Developments”  
Khotkovo Moscow Region, The Russian Federation*

*The paper provides an overview of the current state of research in the field of design and creation of anisotrid lattice composite structures – shell-type load-bearing structures – in Russia and abroad. Historical information about the emergence of lattice structures is provided, as well as a brief history of their formation – the research carried out, the results achieved, and the problems solved. An analysis of the use of mesh structures abroad in the aerospace industry was conducted. The paper provides generalized information on existing and currently used methods for designing anisotrid structures, applied methods for calculating mesh structures for strength, rigidity and stability, as well as on the main technological methods and techniques for manufacturing anisotrid lattice structures with a division into domestic and foreign practice. The paper presents information on current areas of application of lattice anisotrid structures in rocket technology, aviation and astronautics, and identifies a range of problematic issues and directions for future research. The work also provides examples of innovative applications of lattice anisotrid structures currently being developed, supplied with illustrations, and indicates the main scientific centers in Russia engaged in developments in the field of creation and production of composite lattice anisotrid structures.*

*Keywords: lattice structure, anisotrid, composite material.*

### References

- [1] Vasiliev V. V. V. G. Shukhov’s ideas in modern aerospace engineering / V. V. Vasiliev, ed. F. L. Chernousko // Actual problems of mechanics. Modern mechanics and development of V. G. Shukhov’s ideas. Moscow: Nauka, 2011, pp. 111–127.
- [2] Mackay R. Wellington in action. Squadron / R. Mackay. Signal Publications. 1986. 17 p.
- [3] Vasiliev V. V., Razin A. F., Andronov A. I., Salov V. A. Composite shell shaped as a body of revolution, and panel connection joint // Patent US 6068902A, McDonnell Douglas Corp./CRISM–CAT, 29.10.1997.
- [4] Vasiliev V. V., Razin A. F., Salov V. A., Bunakov V. A., Soldatov S. A., Zakharevich L. P., Voldman M. Composite transverse wing rib and apparatus for producing flat cellular-ribbed structure thereof // Patent US 5993941A, McDonnell Douglas Corp./CRISM–CAT, 30.11.1999.
- [5] Christopher J. Hunt, Francescogiuseppe Morabito, Chris Grace, Yian Zhao, Benjamin K. S. Woods. A review of composite lattice structures // Composite Structures, Vol. 284, 15 March 2022, 115120.

- [6] Ming Li, Hengyi Zhu, Changliang Lai, Wenyi Bao, Han Han, Renbang Lin, Weiping He, Hualin Fan. Recent progresses in lightweight carbon fibre reinforced lattice cylindrical shells // *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 135, 2022, 100860.
- [7] Vasiliev V. V., Razin A. F., Azarov A. V. Composite lattice structures – design, calculation and manufacturing. M.: Innovative mechanical engineering, 2023, 488 p.
- [8] Vasiliev V. V., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications, *Compos. Struct.* 76 (1–2) (2006) 182–189.
- [9] Totaro G., Spina P., Giusto G., De Nicola F., Kiryenko S., Das S. Highly efficient CFRP anisogrid lattice structures for central tubes of medium-class satellites: design, manufacturing, and performance, *Compos. Struct.* 258 (2021), 113368.
- [10] Totaro G., De Nicola F. Recent advance on design and manufacturing of composite anisogrid structures for space launchers, *Compos. Struct.* 81 (2012) 570–577.
- [11] Raouf N., Davar A., Pourtakdoust Seid H. Reliability analysis of composite anisogrid lattice interstage structure // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020. Vol.50, Iss. 9. pp. 3322–3330.
- [12] Li He, Allam Maalla, Xiao Zhou, Hua Tang. Buckling and post-buckling of anisogrid lattice-core sandwich plates with nanocomposite skins // *Thin-Walled Structures*, Vol. 199, 2024, 111828.
- [13] Wenyi Bao, Ming Li, Xiyue An, Han Han, Yunfeng Lou, Hualin Fan. Hierarchical-level failure analysis for CFRC lattice stiffened panel // *Thin-Walled Structures*, Vol. 183, 2023, 110354.
- [14] Yongha Kim, Ingul Kim, Jungsun Park. An approximate formulation for the progressive failure analysis of a composite lattice cylindrical panel in aerospace applications // *Aerospace Science and Technology*, Vol. 106, 2020, 10621.2
- [15] Ming Li, Changliang Lai, Qing Zheng, Hualin Fan. Multi-failure analyses of carbon fiber reinforced anisogrid lattice cylinders // *Aerospace Science and Technology*, Vol. 100, 2020, 105777.
- [16] Lopatin A. V., Morozov E. V., Shatov A. V. Buckling of biaxially compressed anisogrid stiffened composite cylindrical panel with clamped edges // *European Journal of Mechanics – A/Solids*, Vol. 85, 2021, 104090.
- [17] Yeon-Gwan Lee, Jin-Ho Choi, Min-Jung Lee, Sang-Min Kim. Compressive strength stabilizing manufacturing method of anisogrid composite structure ribs without an outer skin // *Composites Part B: Engineering*, Vol. 203, 2020, 108452.
- [18] Mohammad Mahdi Abedi, Reza Jafari Nedoushan, Mohammad Sheikhzadeh, Woong-Ryeol Yu. The crashworthiness performance of thin-walled ultralight braided lattice composite columns: Experimental and finite element study // *Composites Part B: Engineering*, Vol. 202, 2020, 108413.
- [19] Famida Fallah, Ehsan Taati, Mohsen Asghari. Decoupled stability equation for buckling analysis of FG and multilayered cylindrical shells based on the first-order shear deformation theory // *Composites Part B: Engineering*, Vol. 154, 2018, pp. 225–241.
- [20] Changliang Lai, Yang Hu, Qing Zheng, Hualin Fan. All-composite flanges for anisogrid lattice-core sandwich panels to bear stretching load // *Composites Communications*, Vol. 19, 2020, pp. 189–193.
- [21] Bart J. R. Smeets, Edward M. Fagan, Kelly Matthews, Robert Telford, Brendan R. Murray, Leonid Pavlov, Bryan Weaver, Patrick Meier, Jamie Goggins. Structural testing of a shear web attachment point on a composite lattice cylinder for aerospace applications // *Composites Part B: Engineering*, Vol. 212, 2021, 108691.
- [22] Min-Hyeok Jeon, In-Gul Kim, Kyeongsik Woo. Progressive failure analysis of anisogrid cylindrical composite lattice structure with manufacturing defects // *Composite Structures*, Vol. 321, 2023, 117237.
- [23] Niemann S., Wagner H. N. R., Hühne C. Anisogrid stiffened panel under axial compression: Manufacturing, numerical analysis and experimental testing // *Thin-Walled Structures*, Vol. 161, 2021, 107483.
- [24] Qing Zheng, Dazhi Jiang, Chunfang Huang, Xinlong Shang, Su Ju. Analysis of failure loads and optimal design of composite lattice cylinder under axial compression // *Composite Structures*, Vol. 131, 2015, pp. 885–894.
- [25] Vincent K. Maes, Leonid Pavlov, Sahak M. (Samo) Simonian. An efficient semi-automated optimisation approach for (grid-stiffened) composite structures: Application to Ariane 6 Interstage // *Composite Structures*, Vol. 209, 2019, pp. 1042–1049.
- [26] Sonell Shroff, Ertan Acar, Christos Kassapoglou. Design, analysis, fabrication, and testing of composite grid-stiffened panels for aircraft structures // *Thin-Walled Structures*, Vol. 119, 2017, pp. 235–246.
- [27] Lopatin A. V., Morozov E. V., Shatov A. V. Axial deformability of the composite lattice cylindrical shell under compressive loading: Application to a load-carrying spacecraft tubular body // *Composite Structures*, Vol. 146, 2016, pp. 201–206.
- [28] Totaro G. Flexural, torsional, and axial global stiffness properties of anisogrid lattice conical shells in composite material // *Composite Structures*, Vol. 153, 2016, pp. 738–745.
- [29] Tomohiro Yokozeki, Yosuke Shimizu, Masato Ishii, Ken Kimizuka, Shigeo Suzuki, Yoshihiro Yamasaki, Keita Terashima, Toru Kamita, Takahira Aoki. Mechanical behavior in compression of skin-added X-lattice composite panel with corrugated ribs // *Composite Structures*, Vol. 168, 2017, pp. 863–871.

- [30] Jijun Luo, Shengguang Peng, Suxia Hou, Yaser Kiani. Vibration analysis of FGM anisogrid lattice plates with one width fold based on the continuous model using the GDQE method // *Thin-Walled Structures*, Vol. 195, 2024, 111386.
- [31] Seyed Masih Banijamali, Ali Asghar Jafari. Vibration analysis and critical speeds of a rotating functionally graded conical shell stiffened with Anisogrid lattice structure based on FSDT // *Thin-Walled Structures*, Vol. 188, 2023, 110841.
- [32] Danli Zhang, Yong Wang, Guangyong Pan, Artin Hozuri. Nonlinear free vibration modeling of anisogrid lattice sandwich plates based on a weak formulation analysis // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 123, 2023, 107277.
- [33] Hougai Shi, Hualin Fan, Guojian Shao. Dynamic theory of composite anisogrid lattice conical shells with nonconstant stiffness and density // *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 115, 2023, pp. 661–690.
- [34] Bunakov V.A., Lebedev I.K. Dynamic stability of lattice structure shells made of composite materials // *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2000. No. 29. pp. 45–50.
- [35] Razin A. F. Calculation and experimental development of lattice composite sections of aircraft // *Issues of defense equipment*. Series 15. 2000. issue 1(122). pp. 23–25.
- [36] Skleznev A.A. Applied method for determining natural frequencies of oscillations of cylindrical and conical lattice composite structures of spacecraft // *Mechanics of composite materials and structures*. 2010. Vol. 16. No. 2. pp. 241–250.
- [37] Skleznev A.A. Influence of technological holes on natural frequencies of oscillations of lattice composite structures of aircraft // *Bulletin of Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi*. 2012. No. 4 (51), pp. 3–10.
- [38] Babichev A.A., Vasiliev V.V., Razin A. F., Skleznev A.A., Shanygin A. N., Fomin D. Yu., Mareskin I.V. Study of resistance of composite lattice structures to impact damage // *Structures from composite materials*. 2021. No. 3 (163). pp. 3–6.
- [39] Zinoviev P.A. Energy structural-phenomenological models of dissipative properties of anisotropic bodies and fibrous composites // *Diss. ... Doctor of Engineering Sciences*. Moscow: Moscow State Technical University. 1997. 373 p.
- [40] Skleznev A.A., Babichev A.A., Razin A. F. Design and manufacturing technology of a lattice adapter made of polymer composite materials for the simultaneous launch of several payloads // In the collection: *mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media*. Collection of works of the 11th All-Russian scientific conference with international participation named after I.F. Obraztsov and Yu.G. Yanovsky // *Moscow*, 2021, pp. 142–147.
- [41] Skleznev A.A., Babichev A.A., Borisov V.N. Polyconical composite lattice payload adapter and its manufacturing technology // *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2021. No. 2 (249). pp. 52–55.
- [42] Titov V.A., Yuranev O.A., Razin A. F., Babichev A.A., Skleznev A.A., Pshenichnikov I. V., Borodulin D.A. Design and manufacture of cryogenic metal-composite fuel tanks // *Composite Material Structures – interdisciplinary scientific and technical journal*. 2023. No. 2 (170), pp.12–20.
- [43] Razin A. F., Nikityuk V.A., Khalimanovich V.I. Analysis of lattice structures made of composite materials used in power structures of spacecraft // *Structures made of composite materials*. 2011. No. 2, pp. 3–7.
- [44] Totaro G., Spena P., Giusto G., De Nicola F., Kiryenko S., Das S. Highly efficient CFRP anisogrid lattice structures for central tubes of medium-class satellites: Design, manufacturing, and performance // *Composite Structures*, Vol. 258, 2021, 113368.
- [45] Mironenko E. D., Babichev A.A., Skleznev A.A. On the issue of ensuring tension of the cables of a composite high-pressure tank of a spacecraft // *Bulletin of NPO im. S.A. Lavochkin*. 2019. No. 1 (43), pp. 66–70.
- [46] Zhul N. S., Moshkin I. D., Shaklein P.A. et al. Space platform // Patent 2688630 of the Russian Federation; declared 10.11.2016; published 05.21.2019, Bulletin No. 15.
- [47] Skleznev A.A. Application of mesh composite structures in designing new aircraft // In the collection: *Prospective development of science, engineering and technology*. Proceedings of the II International scientific and practical conference in 2 volumes. Editor-in-chief: Gorokhov A. A., 2012, pp. 113–116.
- [48] Skleznev A.A., Chervyakov A.A., Agapov I. G. Solution of the optimization problem for the purpose of designing a lattice structure made of polymer composite materials with external cladding // *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2022. Vol. 25. No. 4, pp. 70–82.
- [49] Skleznev A.A., Babichev A.A. On the issue of calculating the rigidity characteristics of lattice composite structures with metal sheathing // *Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 2022. Vol. 29. No. 2, pp. 220–227.
- [50] Skleznev A.A. Software for designing a composite lattice aircraft wing // *Certificate of registration of computer program RU 2015614050*, 06.04.2015.
- [51] Muhammad Kusni, Bambang Kismono Hadi, Leonardo Gunawan, Hendri Syamsudin. Development of Anisogrid Lattice Composite Structures for Fighter Wing Applications // *International journal of Aerospace Engineering*, 2024, 6667586.
- [52] Belardo M.A, Gardi R.A. Conceptual Design of the Junction between C/SiC Thermal Protection System and Anisogrid Fuselage Cold Structure // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 114, pp. 46–53.

- [53] Skleznev A. A., Razin A. F. Concrete structures with lattice composite reinforcement // Composites and nanostructures. 2015. Vol. 7. No. 3 (27), pp. 145–150.
- [54] Razin A. F., Babichev A. A., Skleznev A. A. Arctic building material reinforced by composite lattice structure // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945, pp. 15–19.
- [55] Kuzmin A. A., Babichev A. A., Skleznev A. A., Slitkov M. N. Analysis of temperature effects on large-sized products made of polymer composite materials during their manufacture and operation // Aerospace engineering, high technology and innovation. 2019. Vol. 1, pp. 71–74.
- [56] Skleznev A. A., Razin A. F. Influence of the rib shape on the bearing capacity of anisogrid lattice structures // In the collection: Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media. Collection of works of the 6th All-Russian scientific conference with international participation named after I. F. Obraztsov and Yu. G. Yanovsky: in 2 volumes. 2016, pp. 184–189.
- [57] Skleznev A. A., Babichev A. A., Razin A. F. Study of the mutual influence of a workpiece made of polymer composite material and a technological mandrel on each other during the manufacturing process during temperature treatment // South Siberian Scientific Bulletin. 2023. No. 1 (47), pp. 56–60.
- [58] Yeon-Gwan Lee, Dae-Oen Lee. Manufacturing technique and verification for the mechanical fastening section of carbon fiber reinforced anisogrid composite structures // Composite Structures, Vol. 268, 2021, 113895.

### Сведения об авторе

*Склезнев Андрей Анатольевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института. Директор и главный конструктор Акционерного общества «Центр перспективных разработок» (АО «ЦПР»). Окончил МАТИ в 2002 году. Область научных интересов: проектирование композитных конструкций, технология композитных конструкций, сетчатые оболочки и композитные баллоны высокого давления.