

Обзорная статья

УДК 691.714

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/94-104>

Конструкции с применением сотовых структур

Иван Леонидович Шипелев[✉], Николай Леонидович Тишков

Тихоокеанский государственный университет,

Хабаровск, Российская Федерация

[✉] iva-shipelev@mail.ru

Аннотация. Инновационные сотовые конструкции привлекли значительное внимание исследователей в последние годы благодаря своим уникальным механическим характеристикам и особым свойствам. В статье приведены ключевые зарубежные публикации, содержащие яркие примеры исследований в области сотовых структур, представлен достаточно широкий обзор достижений в разработке инновационных сотовых конструкций за последние двадцать лет, охватывая темы заполнения, интегрирования, конструкций с отрицательным коэффициентом Пуассона и др. Рассмотрены основные механические свойства этих конструкций, выявлены их сильные и слабые стороны, обусловленные особенностями их геометрии, механическими параметрами и динамическими откликами. Анализ литературных источников позволил выделить актуальные проблемы и обозначить возможные направления будущих исследований. Выводы обзора предлагают ценные рекомендации для дальнейшего изучения и проектирования лёгких, прочных пролётных конструкций с использованием сотовых структур. Чтобы углубить понимание особенностей поведения сотовых конструкций, необходимы дополнительные исследования аналогичных элементов и полноценных образцов конструкций.

Ключевые слова: сотовые структуры, соты, сотовые конструкции, строительные конструкции, композитные панели, прочность, устойчивость

Для цитирования: Шипелев И.Л., Тишков Н.Л. Конструкции с применением сотовых структур // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 94–104.

Review article

Structures using honeycomb structures

Ivan L. Shipelev[✉], Nikolay L. Tishkov

Pacific National University,

Khabarovsk, Russian Federation

[✉] iva-shipelev@mail.ru

Abstract. Innovative honeycomb structures have attracted significant attention from researchers in recent years due to their unique mechanical properties and special characteristics. The article presents key foreign publications containing striking examples of research in the field of honeycomb structures, and provides a fairly broad overview of achievements in the development of innovative honeycomb structures over the past twenty years, covering the topics of filling, integration, structures with a negative Poisson ratio, etc. It examines the main mechanical properties of these structures, identifies their strengths and weaknesses based on geometry, mechanical parameters, and dynamic responses. Analysis of literature sources has highlighted current challenges and outlined potential directions for future research. The conclusions offer valuable recommendations for further investigation and design of lightweight, robust span structures using cellular configurations. To deepen understanding of the behavior of cellular structures, additional studies are needed on analogous elements and full-scale structural samples.

Keywords: honeycomb structures, honeycombs, cellular structures, building structures, composite panels, strength, stability

For citation: Shipelev I.L., Tishkov N.L. Structures using honeycomb structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 94–104. (In Russ.).

Введение

Задачей научно-технического прогресса в области строительства является эффективное распределение материалов в несущих конструкциях, обеспечивающее высокий процент использования материалов по прочности и снижение итоговой массы конструкций. Создание пролётных конструкций, обладающих высокой прочностью, жёсткостью и способных противостоять различным воздействиям, представляет собой сложную задачу. Для выполнения ряда противоречивых требований возникла идея использовать составные конструкции, где каждый элемент отвечает за выполнение одной или нескольких функций. Одним из видов таких конструкций являются конструкции с применением сотовых структур (КсПСС). Эти конструкции обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными видами. Лёгкость: эффективность по массе сотовых конструкций возрастает с увеличением удельной жёсткости несущих слоёв [1]. Высокий коэффициент внутреннего поглощения энергии: затухание колебаний на один-два порядка выше, чем у классических конструкций. Выносливость: предел выносливости увеличивается при снижении жёсткости заполнителя на сдвиг [2]. Помимо вышеперечисленных достоинств, следует отметить также повышенные теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства.

Сферы применения сотовых структур

Сотовые структуры нашли применение во множестве отраслей промышленности благодаря своим уникальным свойствам и преимуществам.

Авиация и аэрокосмическая промышленность. Сотовые структуры используются в конструкциях самолётов и космических аппаратов для снижения веса и повышения прочности. Такие структуры отличаются от клёпанных более высокой удельной прочностью и меньшим количеством деталей, обладают улучшенными аэродинамическими качествами и менее трудоёмки в изготовлении [3].

Строительство. Использование сотовых структур в строительных элементах, таких как сотовые панели для стен и крыш, которые обеспечивают сравнительную лёгкость и теплоизоляцию строительных конструкций.

Автомобильная, железнодорожная и судостроительная промышленность. Применение сотовых материалов в кузовах автомобилей, вагонов и судах для улучшения безопасности и уменьшения веса. Некоторые элементы машин и судов заменяются слоистыми конструкциями, представляющими собой две листовые обшивки с внутренним заполнителем, придающим конструкции устойчивость при нагружении [4].

Энергетика. Сотовые структуры используются в ветряных турбинах и солнечных панелях для повышения эффективности и прочности.

Упаковка. Сотовые структуры в упаковочных материалах обеспечивают защиту товаров и лёгкость.

Медицинская техника. Используются в различных устройствах и имплантатах для обеспечения лёгкости и биосовместимости.

Спортивное оборудование. Применение сотовых структур в спортивном инвентаре для улучшения характеристик и снижения веса.

Если говорить о нематериальном применении сотовых структур, то следует упомянуть и *телекоммуникации*. Применение сотовых структур в мобильной связи, где они обеспечивают эффективное покрытие и распределение сигналов.

Приведённые примеры показывают, как сотовые структуры помогают улучшать характеристики продуктов и процессов в различных отраслях.

Предпосылки к созданию сотовых структур

Учёные обнаружили, что шестиугольная структура, сравнимая с пчелиными сотами, превосходно ведёт себя при относительно малом весе и при этом демонстрирует хороший механический потенциал [5]. Первая искусственная сотовая структура была сделана из бумаги в Китае несколько тысяч лет назад. А в 1945 году была изготовлена первая полностью алюминиевая сэндвич-панель. С тех пор виды сотовых структур изготавливались из множества различных материалов, таких как алюминиевый сплав [6], нержавеющая сталь [7], титан [8] и неметаллические материалы (стекловолокно [9], Nomex [10], крафт-бумага [11]).

За последние десятилетия было предложено много креативных сотовых структур, таких как Nomex (рис.1), панельные конструкции из сот (рис. 2).



Рис. 1. Сотовые структуры Nomex, испытание сот на растяжение [10]

Fig. 1. Nomex honeycomb structures, honeycomb tensile testing [10]

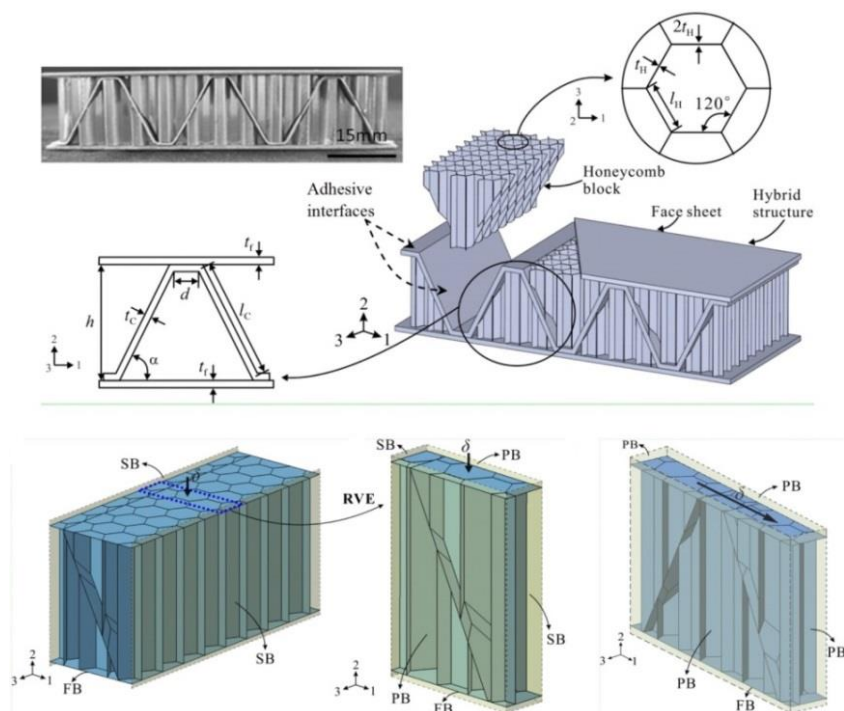


Рис. 2. Панельные конструкции из сот

Fig. 2. Honeycomb panel structures

Виды исследований сотовых структур

За последние два десятилетия исследования сотовых структур проводились следующие виды испытаний: осевое сжатие [12], выпучивание [13, 14], усталостное разрушение [15], определение тепловых и акустических характеристик [16, 17]. Имеются многочисленные специализированные исследования, направленные на изучение механических характеристик сотовых структур [18], испытываемых разнообразными видами нагрузок. Изучалось поведение сот под воздействием нагрузок, действующих в плоскости наибольшей жёсткости [19, 20], из плоскости наибольшей жёсткости [21]. Отдельные работы посвящены изучению реакций сотовых структур на низкоскоростные [22] и высокоскоростные ударные воздействия [23]. Кроме того, проводились исследования по поведению сот под действием изгибающих [24, 25] и сдвиговых [26, 27] усилий. Также рассматриваются вопросы, связанные с расположением сот под определённым углом к вертикальной оси [28]. Эти исследования показали, что нагрузка на наклонные соты существенно влияет на характер деформации.

Экспериментальные данные подчёркивают, что сотовые структуры отличаются хорошими показателями энергоёмкости [29, 30]. Однако способность единичной сотовой ячейки поглощать энергию недостаточна для большинства приложений. Чтобы достичь требуемого уровня эффективности, необходим тщательный подбор оптимальной формы и размеров ячеек. Рациональные параметры, определяемые в ходе исследований инновационных структур, оказывают существенное влияние на связь между элементами сот и общую несущую способность конструкции, а также определяют места потенциальных повреждений.

Методы исследования

Типичными методами исследования работы является экспериментальный анализ, который общепризнано является наиболее надёжным способом.

С развитием технологий компьютерного моделирования численные методы анализа получили широкое распространение и применяются практически во всех сферах инженерии. Важное преимущество численного анализа состоит в том, что проведение натурных экспериментов зачастую ограничено различными факторами, такими как высокая стоимость, временные ограничения и сложность воспроизведения необходимых условий. Поэтому большинство современных инженерных расчётов выполняются с применением специализированных программных комплексов, таких как **ANSYS** (США) и **ABAQUS** (США).

Отечественными учёными расчёты и анализ поведения сотовых структур проводятся преимущественно с использованием программного комплекса **ANSYS** и пакета **ЛИРА САПР** (Украина). Оба инструмента зарекомендовали себя как надёжные средства благодаря своим мощным инструментам для параметрического анализа, позволяя инженерам быстро тестировать большое количество вариантов конструкций и оценивать их характеристики.

Расчётные модели сотовых структур могут разрабатываться как полноразмерные [31] (например, целая панель), так и локально детализованные (отдельные фрагменты или секции). Такой подход помогает уменьшить вычислительную нагрузку и повышает точность полученных результатов.

При численном моделировании сотовых структур, по результатам расчётов, предлагалось увеличение геометрии ячеек [32]. Основная идея заключается в том, что сотовые структуры с одинаковым соотношением толщины стенки к длине стенки должны проявлять схожее механическое поведение и распределение усилий.

Наиболее распространённой теоретической моделью элементов сот, предложенной Вежбицким [33], является теоретическая основа для анализа способности структур выступать в роли эффективных поглотителей энергии от внешних воздействий. Эта модель наглядно демонстрирует процесс распределения напряжений внутри сот при их сжатии.

Метод эквивалентной однородности широко применялся для изучения сотовых структур [34, 35]. Этот метод позволял упростить анализ механических характеристик сот, особенно для определения их упругих свойств [36] и жёсткости на сдвиг [37], заменяя полную масштабную модель упрощёнными приближениями.

Какой бы метод ни использовался, все они прошли проверку временем и доказали свою обоснованность и достоверность как в научных исследованиях, так и в практических инженерных приложениях.

Виды сотовых структур

Сотовые конструкции с заполнением занимают лидирующие позиции среди композитных структур благодаря своим преимуществам: простоты конфигурации и несложности в производстве. Идея заполнения впервые была применена к пенопластовым структурам. Для нахождения оптимальной комбинации были исследованы различные наполнители и вставки по образцу контейнеров (рис. 3). В качестве наполнителей использовались различные металлические квадратные трубы, включая рифлёные трубы [38], многоячеистые трубы [39] и армированные конусные трубы [40].



Рис. 3. Сотовые структуры со вставками-трубками

Fig. 3. Honeycomb structures with tube inserts

Рассматривались и другие схемы заполнения – полиуретановые, стеклянные, полиэфирные с закрытыми ячейками, множество тонкостенных, со встроенными алюминиевыми цилиндрическими трубками, решётчатые композитные панели, заполненные пеной. Исходя из вышеупомянутых исследований, можно заключить, что заполненные структуры являются эффективным и надёжным способом рассеивания значительных напряжений при осевом сжатии. Существует ряд исследований, посвящённых экспериментальным и численным испытаниям тонких квадратных труб, заполненных сотовыми элементами. Полученные результаты демонстрируют, что подобные структуры обладают лучшими механическими свойствами, обеспечивающими эффективное поглощение энергии и повышение несущей способности.

Авторами работы [41] была предложена новая конструкция – двойная функционально-градиентная структура, включающая градиентный сотовый наполнитель с переменной толщиной стенок. Анализ поведения данной конфигурации в условиях динамического нагружения показал, что с ростом величины смещения при разрушении такая структура обладает наиболее высокой способностью к поглощению энергии по сравнению с традиционными аналогами. Данная закономерность сохраняется независимо от углов приложения нагрузки.

Использование сотовых структур в качестве наполнителей способствует значительному увеличению энергопоглощающих способностей и несущей способности конструктивных элементов. При воздействии осевых нагрузок наблюдается заметное улучшение устойчивости металлических оболочек благодаря наличию сотового заполнения.

Вместе с тем необходимо учитывать зависимость между формой контейнера и типом наполняющего материала. Различия в физических и механических свойствах компонентов мо-

гут приводить к различным реакциям конструкции на внешние воздействия, зависящим главным образом от назначения самой сотовой структуры.

Некоторые авторы отмечают, что правильное позиционирование и выбор расположения сот оказывает значительное влияние на деформативность [42]. Ошибочное размещение сот может вызвать образование дефектов и негативно сказаться на стабильности системы при сжимающей нагрузке.

Отдельно следует упомянуть и сотовые структуры с отрицательным коэффициентом Пуассона. Соты обеспечиваются отрицательным коэффициентом Пуассона за счёт специально разработанной ячеистой геометрии (рис. 4). Представлена наиболее изученная конфигурация сотовых структур — шестигранные соты [43]. В данном типе сот, благодаря направленному внутрь прогибу стенок каждой ячейки, соты расширяются под действием растягивающей нагрузки, в то время как сжимаются под действием сжимающей нагрузки.

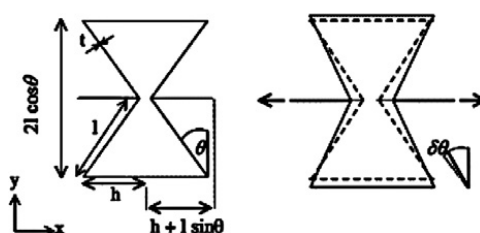


Рис. 4. Фрагмент ячейки сот с отрицательным коэффициентом Пуассона

Fig. 4. Fragment of honeycomb cell with negative Poisson's ratio

Основой функционирования конструкций из сот служит реакция отдельных ячеек. Благодаря взаимосвязанной сетке распорок между элементарными ячейками, возникает частично ауксетическое поведение, которое проявляется на уровне всей глобальной структуры.

Теоретический анализ предложил новый подход к рассмотрению элементарной ячейки с учётом специфичных конфигураций. Это позволило описать поведение всей сотовой конструкции через исследование одной типичной ячейки, предоставляя возможность эффективного повторного моделирования.

Ряд новых конфигураций, направленных на увеличение прочности плоскостных сот с отрицательным коэффициентом Пуассона, описан в работе [44]. Было показано, что одним из эффективных методов усиления является введение дополнительного элемента (полосы) внутрь первоначальных сот. Такие модификации позволили добиться повышенной способности к поглощению энергии и ударостойкости. Это делает соты перспективными материалами для защиты оборудования от взрыва, применения в трансформируемых самолётах, железнодорожных вагонах и других областях.

Стоит подчеркнуть, что технология изготовления крупногабаритных сотовых структур с отрицательным коэффициентом Пуассона пока находится на начальной стадии своего развития.

Заключение

Все упомянутые работы проливают свет на адаптацию КсПСС для инженерного применения и демонстрируют потенциальную ценность структурного усовершенствования конструкции с желаемыми свойствами и функциями.

Хотя исследования традиционных и инновационных сотовых структур привели к значительным успехам в области разработки новых материалов и конфигураций, они всё ещё сталкиваются с рядом ограничений. Среди основных проблем выделяются сложности в производстве, низкая функциональность и другие аспекты, препятствующие массовому внедрению и применению данных разработок.

Для ранее упомянутых инновационных сот, особенно для сотовых структур с наполнениями и контейнерами, необходимы дальнейшие исследования напряжённо деформированного состояния по критериям смещения, жёсткости и прочности.

Хотя представленные инновационные сотовые структуры имеют уникальные преимущества, они остаются скорее идеализированными моделями, разработанными исследователями в лабораторных условиях.

Следует отметить, что, несмотря на очевидные преимущества сотовых структур (повышенные показатели устойчивости, жёсткости, способности поглощать энергию, сопротивление взрывному воздействию, теплоизолирующие и звукозащитные качества), сфера их практического применения остаётся ограниченной из-за высоких производственных издержек и технологической сложности. Тем не менее, учитывая указанные достоинства, включение таких структур в строительные конструкции становится целесообразным решением.

Представленные исследования показывают, что сотовые материалы проявляют высокие эксплуатационные характеристики по таким параметрам, как распределение напряжений и повышенная прочность при осевом сжатии. Следовательно, интеграция таких структур в пролётные конструкции зданий и сооружений способна обеспечить существенными преимуществами

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

И.Л. Шипелев – обзор иностранных статей, краткие описания основных исследований, выводы по результатам исследований, постановка задачи будущих исследований, ответственность за целостность всех частей статьи; Н.Л. Тишков – общее руководство, обобщение результатов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

I.L. Shipilev – review of foreign articles, brief description of the main studies, conclusions based on the results of the studies, setting the task of future studies, responsibility for the integrity of all parts of the article; N.L. Tishkov – general management, generalization of the results. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Руденко М.С., Михеев А.Е., Гирн А.В. Технология изготовления сотовых заполнителей из полимерных композиционных материалов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 391–397. DOI: <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-2-391-397>
2. Иванов А.А., Гофин М.Я. Механика сотовых заполнителей. Т. 1. Московский лесотехнический институт, 1989. 315 с.
3. Берсудский В.Е., Крысин В.Н., Лесных С.И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
4. Благов В.А., Калмачков А.Н., Кобелев В.Н., Прохоров Б.Ф. Лёгкие судовые конструкции из пластмасс. Л.: Судостроение, 1969. 264 с.
5. Першин. А.М. Расчётное исследование статической устойчивости сотовых заполнителей из композиционных материалов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 5(47). Часть 1. С. 118–123.
6. Yang X., Sun Y., Yang J., Pan Q. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructured // Thin-Walled Struct. 2018.
7. Hong S., Pan J., Tyan T., Prasad P. Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under compression dominant combined loads // Int. J. Plast. 2006. P. 73–109.
8. Dharmasena K.P., Wadley H.N.G., Xue Z., Hutchins J.W. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading // Int. J. Impact Eng. 2008. № 35. P. 1066–1075.
9. Shahdin A., Mezeix L., Bouvet C., Morlier J., Gourinat Y. Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: a comparison with honeycomb and foam sandwich beams // Composite Structures. 2009. P. 404–412.
10. Garam K., Ronald S., Waterloo T. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets // Composite Structures. 2018. № 206. P. 535–549.

11. Chen Z., Yan N. Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels // *Compos B Eng.* 2012. № 43. P. 2107–2114.
12. Wang Q., Li Z., Zhang Y., Cui S., Yang Z., Lu Z. Ultra-low density architected metamaterial with superior mechanical properties and energy absorption capability // *Compos. B Eng.* 2020. P. 202–215.
13. Okumura D., Ohno N., Noguchi H. Post-buckling analysis of elastic honeycombs subject to in-plane biaxial compression // *Int J Solids Struct.* 2002. № 39. P. 3487–3503.
14. Jang W.Y., Kyriakides S. On the buckling and crushing of expanded honeycomb // *Int J Mech Sci.* 2015. № 91. P. 81–90.
15. Abbadi A., Azari Z., Belouettar S., Gilgert G., Freres P. Modelling the fatigue behavior of composites honeycomb materials (aluminium/aramide fibre core) using four-point bending tests // *Int J Fatigue.* 2010. № 32. P. 1739–1747.
16. Yeh C.L., Chen Y.F., Wen C.Y., Li K.T. Measurement of thermal contact resistance of aluminum honeycombs // *Exp Therm Fluid Sci.* 2003. № 27. P. 27–281.
17. Ng C.F., Hui C.K. Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels // *Appl Acoust.* 2008. № 69. P. 293–301.
18. Ruan D., Lu G., Wang B., Yu T. In-plane dynamic crushing of honeycombs – a finite element study // *Int J Impact Eng.* 2003. № 28. P. 161–182.
19. Cricri G., Perrella M., Calì C. Honeycomb failure processes under in-plane loading // *Compos Part B.* 2013. № 45. P. 1079–1090.
20. Hua L., You F., Yu T. Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs // *Mater Des.* 2013. № 46. P. 511–523.
21. Khan M.K., Baig T., Mirza S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb // *Mat Sci Eng A-Struct.* 2012. № 539. P. 135–142.
22. Besant T., Davies G.A.O., Hitchings D. Finite element modeling of low velocity impact of composite sandwich panels // *Compos Part A-Appl S.* 2001. № 32. P. 1189–1196.
23. 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 // *Composite Structures.* 2010. № 92. P. 2090–2096.
24. He L., Yuan-Sheng Ch., Liu J. Precise bending stress analysis of corrugatedcore, honeycomb-core and X-core sandwich panels // *Composite Structures.* 2012. № 94. P. 1656–1668.
25. Santosa S., Wierzbicki T. Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns // *Int J Mech Sci.* 1999. № 41. P. 995–1019.
26. Zhou Q., Mayer R.R. Characterization of aluminum honeycomb material failure in large deformation compression, shear, and tearing // *J Eng Mater-T Asme.* 2002. № 124. P. 412–420.
27. Pan S.D., Wu L.Z., Sun Y.G., Zhou Z., Qu J. Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores // *Composite Structures.* 2006. № 72. P. 42–46.
28. Montazeri A., Saeedi A., Bahmanpour E. Enhancing the compressive properties of re-entrant honeycombs by line defects with insight from nature // *Materials Today Communications.* 2024. № 38. P. 700–713.
29. Lu G.X., Yu T.X. Energy absorption of structures and materials // Cambridge: Woodhead Publishing. 2001. Vol. 1. 402 p.
30. Yamashita M., Gotoh M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications–numerical simulation and experiment // *Int J Impact Eng.* 2005. № 32. P. 618–630.
31. Meran A.P., Toprak T., Muğan A. Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures // *Thin-Walled Struct.* 2014. № 78. P. 87–94.
32. Habib F.N., Iovenitti P., Masood S.H., Nikzad M. Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures // *Int J Adv Manuf Technol.* 2018. № 94. P. 2369–2380.
33. Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs // *Int J Impact Eng.* 1983. № 1. P. 157–174.
34. Xu F., Qiao P. Homogenized elastic properties of honeycomb sandwich with skin effect // *Int J Solids Struct.* 2002. № 39. P. 2153–2188.
35. Catapano A., Montemurro M. A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. Part I: Homogenisation of core properties // *Composite Structures.* 2014. № 118. P. 677–690.
36. Li Y.M., Hoang M.P., Abbes B., Abbes F., Guo Y.Q. Analytical homogenization for stretch and bending of honeycomb sandwich plates with skin and height effects // *Composite Structures.* 2015. Vol. 120. P. 406–416.

37. Shi G., Tong P. Equivalent transverse shear stiffness of honeycomb cores // *Int J Solids Struct.* 1995. № 32. P. 1383–1393.
38. Niknejad A., Abedi M.M., Liaghat G.H., Nejad M.Z. Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis // *Mater Des.* 2012. № 37. P. 144–151.
39. Güden M., Kavi H. Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes // *Thin-Walled Struct.* 2006. № 44. P. 739–750.
40. Lin J.S., Wang X., Lu G. Crushing characteristics of fiber reinforced conical tubes with foam-filler // *Composite Structures.* 2014. № 116. P. 18–28.
41. Zhu G., Li S., Sun G., Li G., Li Q. On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases // *Thin-Walled Struct.* 2016. № 109. P. 377–389.
42. Wang Chengjian, Wang Cheng, Li Z., He Y., Zhang Z., Zhang Y. Mechanical properties of novel 3D printing 316L stainless steel honeycomb structure reinforced aluminum matrix composites // *Intermetallics.* 2025. № 181. P. 743–753.
43. Prawoto Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative Poisson's ratio // *Comput Mater Sci.* 2012. № 58. P. 140–153.
44. Zied K., Osman M., Elmahdy T. Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores // *Phys Status Solidi B.* 2015. № 252. P. 2685–2692.

REFERENCES

1. Rudenko M.S., Miheev A.E., Girn A.V. Technology of manufacturing honeycomb fillers from polymer composite materials. *Siberian Aerospace Journal.* 2021, vol. 22, no 2, pp. 391–397. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-2-391-397>
2. Ivanov A.A., Gofin M.Ya. Mechanics of honeycomb cores. Moskovskij lesotekhnicheskij institut. 1989, vol. 1, 315 p. (In Russ.).
3. Bersudskij V.E., Krysin V.N., Lesnyh S.I. Manufacturing technology of cellular aircraft structures. M.: Mechanical Engineering, 1975. 296 p. (In Russ.).
4. Blagov V.A., Kalmachkov A.N., Kobelev V.N., Prohorov B.F. Lightweight ship structures made of plastics. L.: Shipbuilding, 1969, 264 p. (In Russ.).
5. Pershin A.M. Computational study of static stability of honeycomb cores made of composite materials. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2014, no. 5(47), pp. 118–123. (In Russ.).
6. Yang X., Sun Y., Yang J., Pan Q. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructured. *Thin-Walled Struct.*, 2018.
7. Hong S., Pan J., Tyan T., Prasad P. Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under compression dominant combined loads. *Int. J Plast.* 2006, pp. 73–109.
8. Dharmasena K.P., Wadley H.N.G., Xue Z., Hutchins J.W. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *Int. J Impact Eng.*, 2008, no. 35, pp. 1066–1075.
9. Shahdin A., Mezeix L., Bouvet C., Morlier J., Gourinat Y. Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: a comparison with honeycomb and foam sandwich beams. *Composite Structures*, 2009, pp. 404–412.
10. Garam K., Ronald S., Waterloo T. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. *Composite Structures*, 2018, no. 206, pp. 535–549.
11. Chen Z., Yan N. Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels. *Compos B Eng.*, 2012, no. 43, pp. 2107–2114.
12. Wang Q., Li Z., Zhang Y., Cui S., Yang Z., Lu Z. Ultra-low density architected metamaterial with superior mechanical properties and energy absorption capability. *Compos. B Eng.* 2020, pp. 202–215.
13. Okumura D., Ohno N., Noguchi H. Post-buckling analysis of elastic honeycombs subject to in-plane biaxial compression. *Int J Solids Struct.*, 2002, no. 39, pp. 3487–3503.
14. Jang W.Y., Kyriakides S. On the buckling and crushing of expanded honeycomb. *Int J Mech Sci.*, 2015, no. 91, pp. 81–90.
15. Abbadi A., Azari Z., Belouettar S., Gilgert G., Freres P. Modelling the fatigue behavior of composites honeycomb materials (aluminium/aramide fibre core) using four-point bending tests. *Int J Fatigue*, 2010, no. 32, pp. 1739–1747.

16. Yeh C.L., Chen Y.F., Wen C.Y., Li K.T. Measurement of thermal contact resistance of aluminum honeycombs. *Exp Therm Fluid Sci.*, 2003, no. 27, pp. 27–281.
17. Ng C.F., Hui C.K. Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels. *Appl Acoust.*, 2008, no. 69, pp. 293–301.
18. Ruan D., Lu G., Wang B., Yu T. In-plane dynamic crushing of honeycombs – a finite element study. *Int J Impact Eng.*, 2003, no. 28, pp. 161–182.
19. Cricri G., Perrella M., Calì C. Honeycomb failure processes under in-plane loading. *Compos Part B.*, 2013, no. 45, pp. 1079–1090.
20. Hua L., You F., Yu T. Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs. *Mater Des.*, 2013, no. 46, pp. 511–523.
21. Khan M.K., Baig T., Mirza S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb. *Mat Sci Eng A-Struct.*, 2012, no. 539, pp. 135–142.
22. Besant T., Davies G.A.O., Hitchings D. Finite element modeling of low velocity impact of composite sandwich panels. *Compos Part A-Appl S.*, 2001, no. 32, pp. 1189–1196.
23. 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. *Composite Structures*, 2010, no. 92, pp. 2090–2096.
24. He L., Yuan-Sheng Ch., Liu J. Precise bending stress analysis of corrugatedcore, honeycomb-core and X-core sandwich panels. *Composite Structures*, 2012, no. 94, pp. 1656–1668.
25. Santosa S., Wierzbicki T. Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns. *Int J Mech Sci.*, 1999, no. 41, pp. 995–1019.
26. Zhou Q., Mayer R.R. Characterization of aluminum honeycomb material failure in large deformation compression, shear, and tearing. *J Eng Mater-T Asme.* 2002, no. 124, pp. 412–420.
27. Pan S.D., Wu L.Z., Sun Y.G., Zhou Z., Qu J. Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores. *Composite Structures*, 2006, no. 72, pp. 42–46.
28. Montazeri A., Saeedi A., Bahmanpour E. Enhancing the compressive properties of re-entrant honeycombs by line defects with insight from nature. *Materials Today Communications*, 2024, no. 38, pp. 700–713.
29. Lu G.X., Yu T.X. Energy absorption of structures and materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2001.
30. Yamashita M., Gotoh M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications—numerical simulation and experiment. *Int J Impact Eng.*, 2005, no. 32, pp. 618–630.
31. Meran A.P., Toprak T., Muğan A. Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures. *Thin-Walled Struct.*, 2014, no. 78, pp. 87–94.
32. Habib F.N., Iovenitti P., Masood S.H., Nikzad M. Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures. *Int J Adv Manuf Technol.*, 2018, no. 94, pp. 2369–2380.
33. Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs. *Int J Impact Eng.*, 1983, no. 1, pp. 157–174.
34. Xu F., Qiao P. Homogenized elastic properties of honeycomb sandwich with skin effect. *Int J Solids Struct.*, 2002, no. 39, pp. 2153–2188.
35. Catapano A., Montemurro M. A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. Part I: homogenisation of core properties. *Composite Structures*, 2014, no. 118, pp. 677–690.
36. Li Y.M., Hoang M.P., Abbes B., Abbes F., Guo Y.Q. Analytical homogenization for stretch and bending of honeycomb sandwich plates with skin and height effects. *Composite Structures*. 2015, vol. 120, pp. 406–416.
37. Shi G., Tong P. Equivalent transverse shear stiffness of honeycomb cores. *Int J Solids Struct.*, 1995, no. 32, pp. 1383–1393.
38. Niknejad A., Abedi M.M., Liaghat G.H., Nejad M.Z. Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis. *Mater Des.*, 2012, no. 37, pp. 144–151.
39. Güden M., Kavi H. Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes. *Thin-Walled Struct.*, 2006, no. 44, pp. 739–750.
40. Lin J.S., Wang X., Lu G. Crushing characteristics of fiber reinforced conical tubes with foam-filler. *Composite Structures*, 2014, no. 116, pp. 18–28.

41. Zhu G., Li S., Sun G., Li G., Li Q. On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases. *Thin-Walled Struct.*, 2016, no. 109, pp. 377–389.
42. Wang Chengjian, Wang Cheng, Li Z., He Y., Zhang Z., Zhang Y. Mechanical properties of novel 3D printing 316L stainless steel honeycomb structure reinforced aluminum matrix composites. *Intermetallics*, 2025, no. 181, pp. 743–753.
43. Prawoto Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative Poisson's ratio. *Comput Mater Sci.*, 2012, no. 58, pp. 140–153.
44. Zied K., Osman M., Elmahdy T. Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores. *Phys Status Solidi B*, 2015, no. 252, pp. 2685–2692.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шипелев Иван Леонидович – аспирант, старший преподаватель, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация),

✉ iva-shipelev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2835-893X>

Ivan L. Shipelev, Postgraduate Student, Senior Lecturer, of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation).

Тишков Николай Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация),

✉ n.tishkov87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>

Nikolay L. Tishkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 30.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 02.06.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.