



Review Article







Received: November 6, 2023

Accepted: December 12, 2023

Published: December 22, 2023

ISSN 2658-5553

# Sandwich Structures Under Low-Velocity and Ballistic Impact: A Review

Vatin, Nikolai Ivanovich<sup>1</sup>   
Nemova, Darya Viktorovna<sup>1</sup>   
Kotov, Evgeny Vladimirovich<sup>1</sup>   
Olshevskiy, Vyacheslav Yanushevich<sup>1</sup>   
Vafaeva, Khristina Maksudovna<sup>1\*</sup>   
Rozhdestvenskiy, Oleg Igorevich<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;  
[vafaeva.khm@gmail.com](mailto:vafaeva.khm@gmail.com) (V.K.M.); [olegrojd@spbstu.ru](mailto:olegrojd@spbstu.ru) (R.O.I.)

Correspondence:\* email [vafaeva.khm@gmail.com](mailto:vafaeva.khm@gmail.com);

## Keywords:

Sandwich Structures; Low-Velocity Impact; Ballistic Impact; Sandwich Beams; Analytical Models; Explosive Loads; Sandwich Shells; Dynamic Response; Structural Behavior; Impact Resistance

## Abstract:

**The object of the research** is sandwich structures (beams and shells) under low-velocity and ballistic impact. The research is motivated by the widespread use of sandwich structures in various applications where they are subjected to impact loads. **Method.** The method involves an analytical approach using various models to calculate the deformation and failure of sandwich structures. **Results.** The specific results include detailed insights into the behavior of sandwich structures under different impact conditions. Notably, the study derives analytical models that depict the dynamic response, offering a comprehensive understanding of deflection and other key performance characteristics. In conclusion, this review consolidates current knowledge on the dynamic response of sandwich structures to low-velocity and ballistic impacts. The presented analytical models contribute valuable insights for optimizing the design of sandwich constructions in real-world applications.

## 1 Introduction

Сэндвич-конструкции представляют собой композитные материалы, состоящие из двух внешних панелей, называемых облицовками, и сердечника, который находится между ними [1], [2]. Сэндвич-конструкции широко используются в различных отраслях промышленности, включая авиацию [3]–[5], судостроение [6], [7], автомобилестроение [8], [9] и строительство [10], [11], благодаря своим превосходным механическим свойствам, легкости и жесткости. Однако, при эксплуатации сэндвич-конструкций возникают различные нагрузки и воздействия, которые могут привести к их повреждению или разрушению [12]–[14]. Механические нагрузки, такие как изгиб, сжатие, сдвиг и удары, а также температурные эффекты и факторы окружающей среды, могут вызывать деформации, трещины и разрушение в структурных элементах сэндвич-конструкций. Для обеспечения безопасности и надежности сэндвич-конструкций необходимо проводить анализ и исследования их поведения под различными нагрузками. Экспериментальные исследования могут быть дорогостоящими, трудозатратными и сложными, приводящими к ограниченным возможностям и практическим ограничениям.

В связи с этим, разработка аналитических моделей для анализа поведения сэндвич-конструкций становится важным и актуальным направлением исследований [15]–[17]. Аналитические модели позволяют предсказывать поведение и характеристики сэндвич-



конструкций при различных нагрузках, что позволяет сэкономить время и средства при разработке и проектировании таких структурных элементов.

Целью данного обзора является представление различных аналитических моделей для анализа поведения сэндвич-конструкций при низкоскоростных и баллистических ударах. Кроме того, такие модели могут быть применимы и для других типов нагрузок и условий эксплуатации сэндвич-конструкций. В дальнейшем начальные параметры, граничные условия и материалы сэндвич-конструкций рассмотрены с точки зрения аналитических моделей, разработанных для изучения и анализа их поведения. Также представлены результаты исследований и выводы, полученные с использованием этих моделей. Таким образом, данное исследование имеет большое значение для проектировщиков, инженеров и других специалистов, работающих в данной области, и может подтвердить эффективность аналитических моделей при проектировании и анализе поведения сэндвич-конструкций. Знание и понимание таких моделей позволяет оптимизировать конструкцию, предсказать ее прочностные и деформационные характеристики, а также оценить ее поведение в различных условиях эксплуатации.

Один из подходов к аналитическому моделированию поведения сэндвич-конструкций основан на классической теории оболочек [18], [19]. Эта теория предполагает, что внешние панели сэндвич-конструкции работают как оболочка исключительно в плоскости оболочки, не допуская деформаций в направлениях, перпендикулярных этой плоскости. Сердцевина сэндвич-конструкции рассматривается как идеально жесткий материал, не допускающий деформаций.

Еще одним подходом является использование теории плоских деформаций, которая учитывает допустимость деформаций во всем поперечном сечении сэндвич-конструкции [20], [21]. Эта теория позволяет более точно оценить деформации и напряжения, возникающие в материалах и элементах сэндвич-конструкции. Кроме того, существуют и другие методы аналитического моделирования, такие как конечно-элементный анализ [22], [23] и методы теории упругости [24], [25]. Они позволяют разбить сэндвич-конструкцию на конечные элементы, учитывающие ее геометрию, материальные характеристики и граничные условия. Такие модели могут быть более сложными и требовать значительных вычислительных ресурсов, но они также обладают более высокой точностью и применимы для более сложных структур и условий эксплуатации.

В ходе исследования было выяснено, что аналитические модели позволяют достаточно точно предсказывать поведение сэндвич-конструкций при низкоскоростных и баллистических ударах [26]–[29]. Они позволяют определить важные параметры, такие как максимальные деформации, напряжения и распределение нагрузок в структуре. Это помогает разработчикам и инженерам принимать обоснованные решения при проектировании и выборе материалов для сэндвич-конструкций.

Таким образом, аналитические модели являются важным инструментом для анализа поведения сэндвич-конструкций и предсказания их характеристик при различных нагрузках. Они позволяют сэкономить время и ресурсы, обеспечивая более эффективное проектирование и более точные результаты. Развитие и совершенствование аналитических моделей будет продолжаться, что позволит еще более точно и надежно анализировать, и проектировать сэндвич-конструкции с учетом их поведения и требований эксплуатации. Следует также отметить, что аналитические модели имеют свои ограничения и предположения, которые могут не учитывать все реальные аспекты поведения материалов и структур. Поэтому, помимо аналитического моделирования, проведение экспериментов и испытаний является неотъемлемой частью процесса разработки и анализа сэндвич-конструкций.

Экспериментальные данные позволяют подтвердить или скорректировать результаты, полученные с помощью аналитических моделей, а также учитывать реальные условия эксплуатации, изменения в процессе производства и другие факторы, которые могут повлиять на поведение и характеристики сэндвич-конструкции. Вместе аналитическое моделирование и экспериментальное исследование позволяют получить более полное и надежное представление о поведении сэндвич-конструкций. Это позволит реализовывать более инновационные и эффективные конструкции, учитывая требования по прочности, жесткости, массе, тепло- и звукоизоляции, а также других параметров, в зависимости от задачи и условий эксплуатации.

## 2 Materials and Methods

В данном разделе предоставляется детальное описание методологии исследования, начиная с постановки целей и задач. Для комплексного анализа соответствующих работ осуществляется поиск научной литературы с применением баз данных Scopus и поисковой системы Google Scholar. Полученные данные подвергаются тщательному анализу с помощью инструмента VOSviewer. VOSviewer используется для создания наглядного представления научного ландшафта, выделяя ключевые темы и авторов. Иллюстрация общей схемы методологии представлена на Рисунке 1.

### А. Поиск литературы

Был проведен поиск литературы с использованием двух основных источников – библиографической и реферативной базы данных Scopus и поисковой системы Google Scholar. Поиск осуществлялся с использованием сочетания ключевых слов и фраз, тщательно отобранных для полного охвата соответствующей литературы. В Таблице 1 представлены поисковые запросы и количество полученных результатов в базе данных Scopus.

Таблица 1. Параметры поиска  
Table 1. Search Parameters

№	Поисковой запрос	Кол-во результатов	Ограничения поиска	Примечание
1	sandwich AND structure OR honeycomb AND composite OR composite AND sandwich AND low-velocity AND impact OR ballistic AND impact	13 008	без ограничений по датам	выгружены 13 008
2	sandwich AND structure OR honeycomb AND composite OR composite AND sandwich AND (dynamic AND response OR structural AND behavior) AND (analytical AND model OR numerical AND model)	16 120	без ограничений по датам	выгружены 16 120
3	(sandwich AND structure OR honeycomb AND composite OR composite AND sandwich) AND (blast OR explosion)	10 597	без ограничений по датам	выгружены 10 597
4	sandwich AND beam OR honeycomb AND beam AND explosion AND load	1 524	без ограничений по датам	выгружены 1 524
5	foam AND core AND sandwich OR metallic AND sandwich AND blast AND wave AND dynamic AND response	1 560	без ограничений по датам	выгружены 1 560
6	curved AND sandwich AND panel OR cylindrical AND sandwich AND shell AND explosion	341	без ограничений по датам	выгружены 341
<b>Итого: 43 150</b>			<b>Выгружено результатов: 43 150</b>	

### В. Извлечение данных

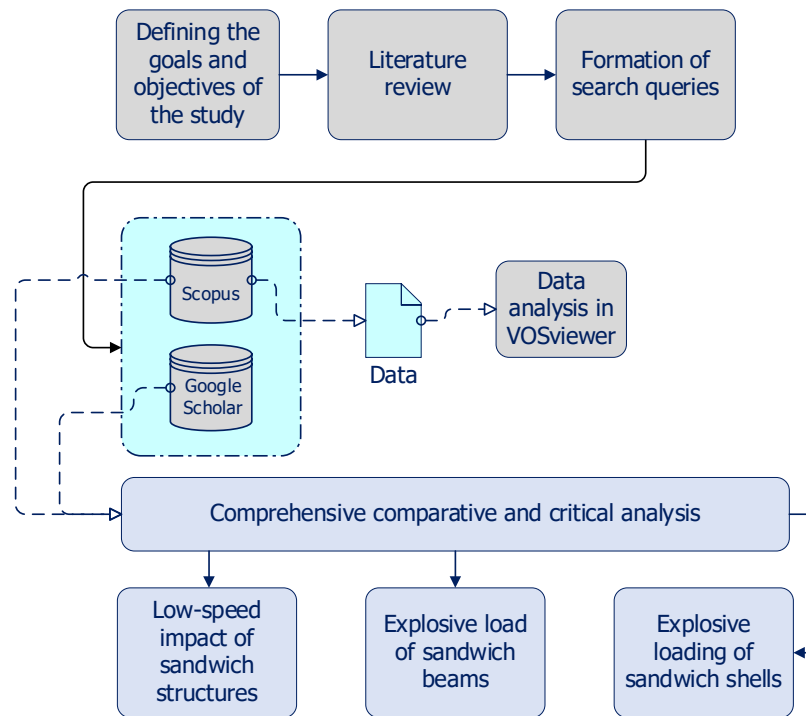
После получения исходных результатов поиска, была произведена выгрузка необходимой информации из базы данных Scopus. Для удобства дальнейшего анализа, данные были экспортированы в формате RIS (Research Information Systems). RIS является широко используемым форматом для обмена библиографическими данными и совместим с различными инструментами анализа данных.

### С. Анализ в VOSviewer

Для визуализации и дополнительного анализа данных было использовано программное обеспечение VOSviewer. С его помощью созданы визуальные представления ключевых слов и публикаций из набора данных. Это позволило получить информацию о тематиках исследований, выявить закономерности и взаимосвязи между различными концепциями.

### Д. Интеграция результатов

Результаты анализа данных, полученные с помощью VOSviewer, были объединены для создания полного представления об исследуемой научной области. Обобщенные результаты позволили выявить основные направления исследований и выделить крупные группы связанных публикаций.



**Рисунок 1 – Схема методологии**  
**Fig. 1 - Methodology diagram**

Предложенная методология позволяет получить полезную информацию об исследуемой области. Полученные данные являются надежными и могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

## 3 Results and Discussion

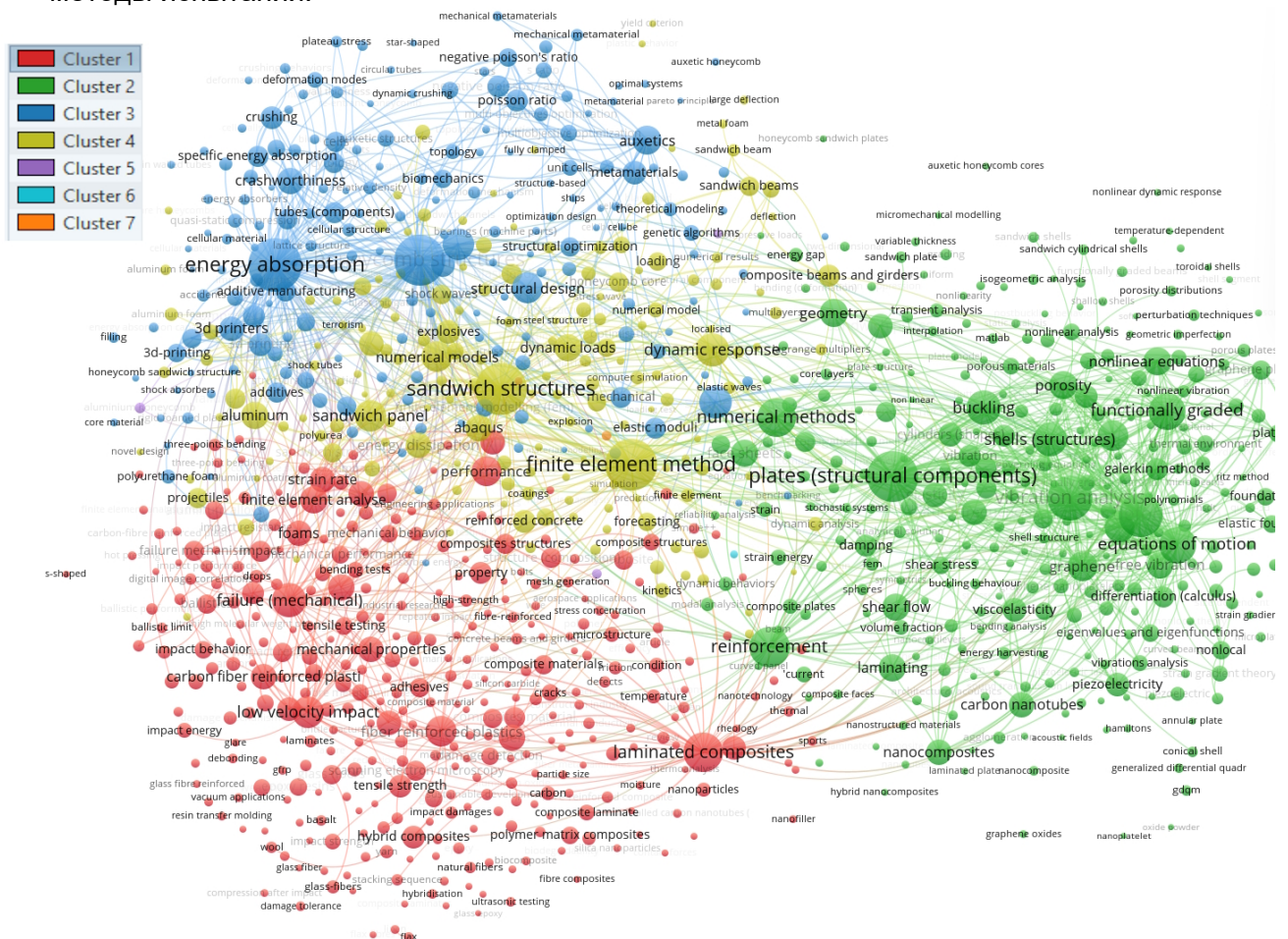
### 3.1 Анализ в VOSviewer

Для визуализации и анализа сети связей в исследуемой предметной области был использован инструмент VOSviewer. Данные результатов поиска по заданным запросам в Таблице 1 были объединены и загружены для комплексной аналитики в VOSviewer. Этот инструмент позволяет визуализировать структуру и взаимосвязи между научными работами на основе их цитирования и тематики.

На Рисунке 2 представлен общий вид взаимосвязей между ключевыми словами, полученный в VOSviewer. Размер круга соответствует частоте встречаемости ключевого слова, а цвет – кластеру, к которому оно принадлежит. Толщина линии связи между двумя ключевыми словами отражает силу их связи. Анализ этой сети связей позволяет выделить ключевые темы и тенденции в области исследований о сэндвич-конструкциях. Также это обеспечивает представление о степени влияния определенных работ в данной области и выявляет перспективные направления для дополнительного изучения. VOSviewer позволяет разбить ключевые слова на кластеры, основанные на их ко-встречаемости в публикациях. В данном случае было выделено 7 кластеров, каждый из которых представляет собой тематическую область:

- Кластер 1: сэндвич-конструкции и их материалы (композитные материалы, алюминий, полиуретановая пена).
- Кластер 2: испытания сэндвич-конструкций на различные нагрузки (квазистатические, ударные) и улучшение их поглощения энергии и стойкости к повреждениям.
- Кластер 3: моделирование поведения сэндвич-конструкций с помощью метода конечных элементов и расчет их механических свойств.
- Кластер 4: новые материалы и технологии для сэндвич-конструкций, направленные на снижение веса, улучшение поглощения энергии и повышение прочности.
- Кластер 5: динамическое поведение сэндвич-конструкций под ударными нагрузками, расчет напряжений и деформаций, микромеханическое моделирование.

- Кластер 6: нелинейное поведение сэндвич-конструкций, анализ устойчивости, влияние геометрических параметров и дефектов.
- Кластер 7: композитные материалы, используемые в сэндвич-конструкциях, их свойства и методы испытаний.



**Рисунок 2 – Общий вид взаимосвязей в VOSviewer**  
**Fig. 2 - General view of relationships in VOSviewer**

Можно также выделить ключевые темы и результаты:

- механические метаматериалы и их применение в сэндвич-структурах, в том числе с отрицательным коэффициентом Пуассона;
- оптимизация структурного дизайна сэндвич-конструкций для повышения их поглощения энергии и стойкости к различным нагрузкам;
- использование аддитивного производства (3D-печать) для создания легких и эффективных сэндвич-структур;
- моделирование динамического поведения сэндвич-конструкций под ударными нагрузками с помощью численных методов;
- исследования влияния материалов (алюминий, композиты) и геометрических параметров (сотовая структура, толщина слоев) на характеристики сэндвич-конструкций;
- разработка новых покрытий и технологий для повышения защиты сэндвич-конструкций от повреждений;
- анализ нелинейного поведения сэндвич-конструкций, включая влияние геометрических несовершенств и дефектов;
- исследования механических свойств композитных материалов, используемых в сэндвич-конструкциях, и разработка методов их испытаний.

Тенденции и перспективы, выявленные в результате этого анализа, включают в себя растущее применение механических метаматериалов, развитие методов структурной оптимизации и применение аддитивного производства для создания более эффективных конструкций. Также отмечается совершенствование численных методов и моделей для более



точного прогнозирования поведения сэндвич-конструкций, а также исследования новых материалов и технологий для улучшения защиты сэндвич-конструкций. Важными направлениями также являются разработка методов нелинейного анализа с учетом геометрических несовершенств и дефектов, а также создание интегрированных программных комплексов для проектирования и анализа сэндвич-конструкций.

### 3.2 Низкоскоростное воздействие сэндвич-конструкций

*Низкоскоростное ударное воздействие на сэндвич-конструкции: аналитические модели и экспериментальные исследования.* При низкоскоростном ударе в облицовочных листах и сердцевине многослойных балок наблюдаются следующие деформации и разрушения:

- упругий изгиб: обратимая деформация балки без разрушения;
- пластическая деформация: необратимая деформация, сопровождающаяся поглощением энергии и снижением несущей способности;
- разрушение: разделение материала, приводящее к полному разрушению балки.

Для аналитического прогнозирования реакции многослойных балок с легкими пористыми наполнителями при низкоскоростном ударе часто используется закон сохранения энергии, который предполагает поглощение кинетической энергии ударника/индентора посредством выявленных режимов деформации сэндвич-балок [30], [31]. В созданных аналитических моделях также учитываются граничные условия, локальный вмятиновый эффект [32], [33] и геометрическая асимметрия [34], [35].

Многие исследователи независимо изучали низкоскоростную реакцию сэндвич-балок на удар, используя разные методы и учитывая различные факторы. Изначально были исследованы локальные вмятины в сэндвич-балках [32]. Выявлено, что общие деформации изгиба и растяжения играют важную роль в деформации и поглощении энергии тонких многослойных балок, в то время как эффект локальных вмятин имеет меньшее значение. Влияние локальных вмятин и прочности сердцевины на общий изгиб изучалось с использованием квазистатического метода, пренебрегая влиянием осевой силы и силы поперечного сдвига на режим разрушения лицевой текучести [35]. Было отмечено, что поглощение энергии сэндвич-балками с коэффициентом асимметричности больше единицы происходит лучше, чем с коэффициентом асимметричности меньше единицы.

Кроме того, была предложена трехэтапная аналитическая модель для композитных сэндвич-балок из пеноматериала, позволяющая прогнозировать их динамические характеристики при низкоскоростном ударе с использованием идеализированного изгибающего шарнира [36]. Он разделил процесс деформации на упругую стадию, стадию разрушения сердечника и стадию окончательного разрушения, а также спрогнозировал силы дробления многослойных балок.

Авторы [37] разработали аналитические модели, используя квазистатический метод, для исследования поведения многослойных сэндвич-балок из пенопласта при низкоскоростном ударе. Эти модели объединяют в себе режимы интегрального изгиба и локальных вмятин, и результаты экспериментов подтверждают согласованность с аналитической моделью.

Метод энергетического баланса широко использовался для теоретического изучения поведения сэндвич-плит с МГК [38], сэндвич-плит с МТЭ [39], композитных сэндвич-плит [40] при низких скоростях. На основе модели энергетического баланса предполагается, что сэндвич-пластина реагирует квазистатически во время удара, и что кинетическая энергия сэндвич-пластины поглощается за счет изгиба, сдвига и контактной деформации [41].

Теоретический подход заключался в моделировании сэндвич-пластины, как комбинации линейной пружины и нелинейной пружины в модели пружинной массы, представляющей глобальное отклонение и эффекты локальных вмятин [42]. В соответствии с законом сохранения энергии, авторы [43] описали взаимосвязь между напряжением плато и углом нагрузки, плоскостью и скоростью.

В результате анализа различных режимов деформации и разрушения сэндвич-балок при низкоскоростных ударах, представленного в Таблице 2, можно выделить несколько ключевых типов деформации. Упругий изгиб, представляющий собой обратимую деформацию балки без разрушения, пластическая деформация с необратимой деформацией и поглощением энергии, а также разрушение с разделением материала и полным разрушением - все эти режимы демонстрируют разнообразие поведения сэндвич-балок в условиях низкоскоростных ударов.

**Таблица 2. Различные режимы деформации и разрушения**  
**Table 2. Various Modes of Deformation and Failure**

Тип деформации/разрушения	Описание
Упругий изгиб	Обратимая деформация балки без разрушения
Пластическая деформация	Необратимая деформация с поглощением энергии
Разрушение	Разделение материала, приводящее к полному разрушению

Таблица 3 представляет результаты исследования воздействия различных факторов на упругий изгиб сэндвич-балок при низкоскоростных ударах. Факторы, такие как влияние локальных вмятин, геометрическая асимметрия и использование квазистатического метода, вносят свой вклад в общий упругий изгиб сэндвич-балок. Эти результаты позволяют более глубоко понять влияние различных параметров на механическое поведение конструкции.

**Таблица 3. Воздействие различных факторов на упругий изгиб**  
**Table 3. Influence of Various Factors on Elastic Bending**

Фактор	Значение
Влияние локальных вмятин	Меньшее влияние на общий изгиб
Геометрическая асимметрия	С коэффициентом асимметричности $> 1$ - лучше поглощение энергии
Квазистатический метод	Исследование режимов интегрального изгиба и локальных вмятин

Сравнение различных материалов для сердечника сэндвич-балок, представленное в Таблице 4, является важным шагом в определении оптимальных материалов для данного типа конструкций. Различные материалы, такие как пенополистирол, пенополиуретан, пенополиэтилен, арамидная бумага и алюминиевая панель, обладают разными плотностями, прочностью при сжатии и модулем упругости при сжатии, что отражено в таблице. Стоит отметить, что конечный выбор материала для сердечника должен учитывать дополнительные факторы, включая требования к прочности, весу конструкции и особенности окружающей среды и др.

**Таблица 4. Сравнение различных материалов**  
**Table 4. Comparison of Various Materials**

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Модуль упругости при сжатии, ГПа
Пенополистирол	15–30	0.1–0.5	0.005–0.03
Пенополиуретан	20–40	0.5–1.5	0.03–0.1
Пенополиэтилен	20–50	0.1–0.8	0.005–0.04
Арамидная бумага	60–200	2–15	0.1–1
Алюминиевая панель	1500–3000	20–200	1–10

Таблица 5 представляет сравнение различных типов облицовочных листов с учетом их материала, толщины и прочности при растяжении. Стальные, алюминиевые, стеклопластиковые, карбоновые и деревянные листы представляют разнообразие материалов, которые могут использоваться в качестве облицовочных слоев сэндвич-балок. Необходимо учитывать, что выбор облицовочного материала также зависит от конкретных требований и условий эксплуатации, а данные в таблице представляют лишь общий усредненный обзор характеристик.

**Таблица 5. Сравнение различных типов облицовочных листов**  
**Table 5. Comparison of Different Types of Facing Sheets**

Тип листа	Материал	Толщина, мм	Прочность при растяжении, МПа
Стальной лист	Сталь	0.5-1.5	200-500
Алюминиевый лист	Алюминий	0.5-1.5	100-300
Стеклопластиковый лист	Стекловолокно, полиэфирная смола	1-3	100-200
Карбоновый лист	Карбоновое волокно, эпоксидная смола	0.5-1.5	500-1000



Тип листа	Материал	Толщина, мм	Прочность при растяжении, МПа
Деревянный лист	Древесина	10-30	50-100

В области исследований низкоскоростного воздействия на сэндвич-конструкции, представленной в этом разделе, проведено обширное исследование аналитических моделей и экспериментальных исследований. Проанализированы различные типы деформаций и разрушений, которые происходят в облицовочных листах и сердцевине многослойных балок при низкоскоростных ударах, включая упругий изгиб, пластическую деформацию и разрушение. Аналитическое прогнозирование реакции многослойных балок при низкоскоростных ударах основано на законе сохранения энергии, учитывая граничные условия, локальный вмятиновый эффект и геометрическую асимметрию.

### 3.3 Взрывная нагрузка сэндвич-балок

*Аналитические модели.* Сэндвич-структуры благодаря своим конструктивным особенностям демонстрируют высокую стойкость к взрывным воздействиям. Аналитический подход является эффективным инструментом для изучения механизмов деформации и разрушения сэндвич-балок под взрывной нагрузкой. Фундаментальной работой в этой области стала модель Флека и Дешпанде [44], в которой динамический отклик полностью зажатой сэндвич-балки при взрывном нагружении был разделен на три стадии:

- взаимодействие жидкости со структурой (FSI), где происходит передача энергии от взрывной волны к сэндвич-балке;
- сжатие активной зоны, в котором происходит деформация и разрушение сердцевины;
- изгиб и растяжение балки, где происходит деформация всей конструкции как единого целого.

В последующие десятилетия эта трехэтапная модель стала основой для многочисленных исследований, посвященных динамическому отклику сэндвич-балок под взрывной нагрузкой.

Развитие аналитических моделей:

- модель FSI, учитывающая влияние давления жидкости, массы облицовки и относительной плотности сердцевины [45];
- модель, разделяющая деформацию на две фазы: сжатие сердцевины и общую деформацию [46];
- модели, учитывающие различные конфигурации сердцевины: сотовый, пирамидальный, ромбовидный, MFC [44], [47];
- модели, учитывающие влияние толщины слоя, сдвиговых и упругих свойств, сдвиговой деформации, момента инерции, сочетания деформации растяжения и изгиба, продольной жесткости сжимающего слоя [48], [49], [50], [51];
- введение метода мембранного фактора для анализа зажатых сэндвич-балок при равномерной и локальной импульсной нагрузке [50], [51].

Многие другие методы исследования были также предложены для точной характеристики реакции взрыва сэндвич-балок, включая разделение деформации на стадию только изгиба и стадию пластиковой струны [52], [53]. Представлена расширенная теория сэндвич-панелей высокого порядка, способная описать геометрию до и после деформации [54], [55]. Применение принципа виртуального смещения, метода суперпозиции нормальной моды [46] и использование преобразования Лапласа и метода Эйлера [56] также входят в перечень методов. Исследовано влияние оптимальной поперечной прочности многослойной балки с анизотропным пенопластовым сердечником и упругими идеально пластичными обшивками на прогиб задней обшивки и силу реакции опор при взрывной нагрузке [57].

Для повышения взрывостойкости сэндвич-балок появились инновационные материалы сердцевины и поперечные сечения сэндвич-балок. Авторы [58] предложили упругопластическую аналитическую модель реакции взрыва многослойной сэндвич-балки со сложным сердечником и обнаружили, что коэффициент Пуассона сильно зависит от начального угла сгиба, в то время как плотность сердцевины мало влияет на деформация сэндвич-балки.

Динамическая реакция цельнометаллических сэндвич-панелей при взрывной нагрузке была впервые изучена аналитически. Деформация сэндвич-панелей с MFC подразделяется на





различные фазы, соответствующие деформации лицевого листа, разрушению сердцевины, а также общему структурному изгибу и растяжению. На основе деформации создается аналитическая модель, которая используется для выполнения оптимального проектирования с учетом таких факторов влияния, как плотность и прочность сердечника, толщина лицевого листа, а также были получены верхняя и нижняя границы максимального отклонения и времени отклика [59–63].

Среди массовых аналитических моделей цельнометаллических сэндвич-пластин использовался закон баланса скоростей диссипации энергии [59], была создана модель пластиковой струны [64] для прогнозирования динамического отклика зажатых сэндвич-пластин со всеми типами металлических сердечников. Для изучения лучших противовзрывных характеристик сэндвич-панелей проводились исследования вариаций традиционных конфигураций сэндвич-балок. Например, сэндвич-плита с металлическим двухслойным МТЭ показывает лучшую импульсную устойчивость по сравнению с сэндвич-плитами с однослойным МТЭ [65]. Геометрически асимметричная сэндвич-панель с МФС или МНС превосходит симметричную сэндвич-плиту при взрывной нагрузке, когда передняя лицевая сторона имеет более высокую плотность, чем задняя [66], [67]. Кроме того, учитывая постоянное отклонение задней облицовки, разрабатываются оптимальные конструкции, обеспечивающие максимальную взрывостойкость.

В слой МНС вводится эффект NPR для достижения превосходного поглощения энергии и минимального общего отклонения. Метод функции напряжений, приближенное решение и подход к балансу скорости диссипации энергии используются для создания аналитических моделей сэндвич-панелей АХР, страдающих от взрывной нагрузки [68]. Решетчатое ребро жесткости FG повышает взрывостойкость сэндвич-плиты с усиленными гранями решетчатого ребра жесткости FG и АХР, а оптимальный угол наклонного ребра жесткости определяется на основе других геометрических параметров [69]. Кроме того, были исследованы и другие формы конфигурации сердцевины, такие как сэндвич-панели с пирамидальной решетчатой сердцевиной [70], [71], трапециевидной сердцевиной [70] и гофрированной сердцевиной с пенопластом [72].

Основываясь на трехэтапной модели, предложенной Флеком и Дешпанде [73], исследователи [70] представили трехступенчатую аналитическую модель для сэндвич-пластин с пирамидальным решетчатым сердечником при ударной нагрузке. На первом этапе учтено воздействие FSI из-за передачи воздушного удара на сэндвич-плиту. На втором этапе происходит неравномерная деформация сердцевинного слоя, в результате чего толщина сэндвич-плиты становится неравномерной. На третьем этапе наблюдается ступенчатая деформация лицевой и задней облицовок из-за выхода наружу.

Другие исследователи [71] разработали модифицированную модель взаимодействия жидкости и конструкции Тейлора для интерпретации динамической реакции многослойных сэндвич-панелей с пирамидальным решетчатым ядром, подвергающихся нагрузке от водяного удара. Аналитически был предсказан импульсный отклик пяти типов пенопластовых вставленных/невставленных сердечников, включая синусоидальную гофрированную пластину, пирамидальную ферму, квадратную сотовую структуру, гофрированную и двутавровую сердцевину. Стоит отметить, что аналитические результаты хорошо согласуются с результатами конечных элементов [74], [75].

С развитием материаловедения и технологий производства появляются разнообразные материалы и конструкции, такие как FML [76], композитная пластина [77] и пористая пенокерамика [78]. Неметаллические материалы также находят применение в составе сэндвич-панелей с целью достижения оптимальных характеристик защиты и поглощения энергии. Установлено, что для вызова одинаковых повреждений при водяной струе требуется более высокое давление, чем при воздушной струе. Более мягкие лицевые листы и более пластичный сердечник превосходят сэндвич-плиты с обратной конфигурацией [79], [80]. Увеличение толщины ядра и относительной плотности ядра приводит к уменьшению реакции взрыва [76], [77]. Кроме того, прогиб многослойной пластины увеличивается с увеличением коэффициента пористости, и прогиб сэндвич-плиты с равномерно распределенной пористой сердцевиной больше, чем прогиб с неравномерно распределенной пористой сердцевиной [78].

Краткое изложение аналитических решений для сэндвич-панелей при взрывной нагрузке представлено в Таблице 6. Различные типы сэндвич-панелей, включая сэндвич-балку, с МФС и анизотропным пенопластовым сердечником, а также сэндвич-панель АХР и с пирамидальным

решетчатым сердечником, рассмотрены с учетом разнообразных моделей и учитываемых эффектов.

**Таблица 6. Аналитические решения для сэндвич-панелей**  
**Table 6. Analytical Solutions for Sandwich Panels**

Тип сэндвич-панели	Модель	Учитываемые эффекты	Результаты
Сэндвич-балка	Трехэтапная модель Флека и Дешпанде	FSI, сжатие активной зоны, изгиб и растяжение балки	Максимальное отклонение, время отклика
Сэндвич-балка с MFC	Модель FSI	Давление жидкости, масса облицовки, плотность сердечника	Импульс, давление опор
Сэндвич-балка с анизотропным пенопластовым сердечником	Модель с оптимизацией поперечной прочности	Прочность и упругость сердечника	Прогиб, сила реакции опор
Сэндвич-панель АХР	Модель с эффектом NPR	Поглощение энергии, деформация, напряжение	Отклонение, деформация, напряжение
Сэндвич-панель с пирамидальным решетчатым сердечником	Трехступенчатая модель	FSI, неравномерная деформация сердцевины, деформация облицовок	Импульсный отклик

Таблица 7 представляет сравнительные свойства различных типов сердечников, включая сотовый, пирамидальный, ромбовидный и MFC, охватывая их упругость, плотность и прочность при растяжении.

**Таблица 7. Свойства различных типов сердечников**  
**Table 7. Properties of Various Types of Core Materials**

Тип сердечника	Упругость, МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при растяжении, МПа
Сотовый	10-100	50-300	5-50
Пирамидальный	50-200	100-500	10-100
Ромбовидный	100-300	200-800	20-150
MFC	500-1000	500-1500	100-300

Таблица 8 демонстрирует обзор типов обшивок для сэндвич-балок, включая стальную, алюминиевую и композитную, с указанием их упругости и прочности при растяжении.

**Таблица 8. Типы обшивок для сэндвич-балок**  
**Table 8. Types of Facings for Sandwich Beams**

Тип обшивки	Упругость, МПа	Прочность при растяжении, МПа
Стальная	200–500	500–1000
Алюминиевая	100–300	300–500
Композитная	500–1000	1000–2000

Таблица 9 выделяет влияние различных конфигураций сердечников на реакцию сэндвич-балок на взрывную нагрузку. Сотовый сердечник, пирамидальный сердечник, ромбовидный сердечник и MFC имеют различные эффекты на диссипацию энергии, силу и жесткость сэндвич-балки.

**Таблица 9. Влиянии конфигураций сердечников**  
**Table 9. Influence of Core Configurations**

Конфигурация сердечника	Влияние на реакцию на взрывную нагрузку
Сотовый сердечник	Улучшает диссипацию энергии и поглощение ударной волны
Пирамидальный сердечник	Увеличивает силу и жесткость сэндвич-балки

Конфигурация сердечника	Влияние на реакцию на взрывную нагрузку
Ромбовидный сердечник	Обеспечивает более равномерное распределение напряжения при нагрузке
MFC	Обладает высокой прочностью и жесткостью, позволяет снизить прогиб и деформацию

Влияние различных факторов и свойств, таких как толщина слоя, сдвиговые и упругие свойства, сочетание деформации и продольная жесткость сердечника, обсуждается в Таблице 10. Эти факторы оказывают влияние на силу, жесткость, распределение напряжения и поглощение энергии сэндвич-балок при взрывной нагрузке.

**Таблица 10. Влияние факторов и свойств на реакцию сэндвич-балок**  
**Table 10. Influence of Factors and Properties on the Response of Sandwich Beams**

Фактор/свойство	Влияние на реакцию на взрывную нагрузку
Толщина слоя	Влияет на силу и жесткость сэндвич-балки
Сдвиговые и упругие свойства	Влияют на распределение напряжения и поглощение энергии
Сочетание деформации	Может привести к более сложной реакции на взрыв
Продольная жесткость сердечника	Может снижать прогиб задней обшивки и силу реакции опор

Таким образом, аналитические исследования взрывной нагрузки сэндвич-балок продемонстрировали значительный прогресс. Разработанные модели и полученные результаты расширяют знания о механизмах деформации и разрушения сэндвич-балок под взрывной нагрузкой, способствуют разработке более совершенных сэндвич-конструкций с улучшенными характеристиками защиты и поглощения энергии.

### 3.4 Взрывная загрузка сэндвич-оболочек

Трехэтапная теория Флека и Дешпанде [44] была улучшена и расширена в рамках аналитической модели динамического отклика многослойных оболочек при воздействии взрывной нагрузки. Примером такого усовершенствования является создание упрощенной аналитической модели динамического отклика полностью зажатых изогнутых сэндвич-плит с МФЦ. В данной модели деформация изогнутой сэндвич-плиты разделена на три отдельные стадии. Применяется классическая теория монолитных оболочек, основанная на подходе баланса скоростей диссипации энергии. Максимальные отклонения центральной точки задней лицевой поверхности и время отклика получаются путем включения комплексного описания [81]. Кроме того, для исследования взрывостойкости изогнутых сэндвич-панелей с композитными или металлическими лицевыми листами и сжимающим сердечником использовались классические методы, такие как принцип Гамильтона, вариационный принцип Рейснера-Хеллингера и многослойный метод.

Применение сжимающего сердечника позволяет изогнутой сэндвич-панели выдерживать более высокий уровень взрывной нагрузки, особенно для сэндвич-плит с толстыми и неглубокими гранями [82], [83]. С дальнейшим развитием исследований в сфере внимание ученых было уделено двойным изогнутым сэндвич-плитам. С использованием метода функций напряжений Эйри, метода Рунге-Кутты четвертого порядка и других методов проведены исследования противовзрывных характеристик на воздухе и под водой сэндвич-панелей двойной кривизны с алюминиевыми лицевыми листами и алюминиевым сердечником AXP или FG, размещенным на упругих основаниях. Исследования параметров проводились в соответствии с предложенной теорией [84]–[87].

*Баллистическое воздействие сэндвич-конструкций.* На основе режимов деформации, выявленных в экспериментах и моделировании, были разработаны теоретические модели для прогнозирования баллистического отклика сэндвич-плит и остаточных скоростей снарядов. Одна из таких аналитических моделей, учитывающая малую деформацию и повышающая точность расчета динамических характеристик многослойных балок с минерало-гранулированным композитом при воздействии снаряда, была представлена авторами [88].



Сэндвич-плиты с ДСП, подвергнутые баллистическому воздействию, проходили три стадии деформации: перфорацию лицевой грани, пробитие пенопластовой сердцевины и перфорацию задней грани. Эта трехэтапная теоретическая модель, основанная на методе энергетического баланса, успешно использовалась для прогнозирования остаточных скоростей снарядов с коническими, плоскими и полусферическими носами после проникновения в сэндвич-плиты [89]. Важное влияние на баллистический предел многослойной пластины оказывают диаметр снарядов и толщина сердцевинного слоя [90].

Для построения аналитических моделей был принят во внимание ряд влияющих факторов, таких как продолжительность контакта с нагрузкой, время прохождения по толщине, время поперечного прохождения [91], толщины, материалы и расстояния [92]. Подобно сэндвич-плитам с минерало-гранулированным композитом, была создана трехэтапная модель для сэндвич-плит с минерало-гранулированным композитом, включающая перфорацию передней грани, повреждение МГК и перфорацию задней грани. Этот подход позволил определить, что от 55% до 85% энергии, передаваемой снарядами, рассеивается задней поверхностью сэндвич-панели [93]. Кроме того, были разработаны новые баллистические предельные уравнения (BLE) для многослойных пластин с минерало-гранулированным композитом, подвергнутых сверхскоростному баллистическому удару [94].

Для неметаллических сэндвич-панелей были получены эмпирические формулы для баллистической перфорации сэндвич-панелей с лицевыми листами из стеклопластика и сердцевинной из пенопласта ПВХ, подвергающихся воздействию снарядов с полусферическими и коническими носами [95]. Учитывая углы укладки волокон композитного лицевого листа, была предложена улучшенная модель для прогнозирования динамических характеристик сэндвич-панелей с композитными лицевыми листами и пено/сотовым наполнителем [96]. Энергетическое распределение упругой деформации и необратимого повреждения сэндвич-панелей, состоящих из лицевых листов ламината, армированного волокном (FRP) и сердцевины из пенопласта, было аналитически смоделировано с использованием метода энергетического баланса, а также прямых и обратных преобразований Ханкеля [97].

Баллистический предел снаряда и рассеивание энергии удара многослойных пластин из конфигурации WRM/эпоксидная смола/пена и хлорсульфированный полиэтилен (CSM)/эпоксидная смола/пена были исследованы с помощью аналитической модели, основанной на принципе энергетического баланса [98]. Дополнительно, была разработана аналитическая модель для прогнозирования остаточной скорости полусферического снаряда, сталкивающегося с сэндвич-панелью, содержащей тканый ровинг из полиэстера Е-стекла и сердцевину из пенопласта ПВХ. Эта модель учитывает деформацию и разрушение лицевых листов, распространение ударных волн в толщине активной зоны и разрушение активной зоны при сдвиге. Уравнения движения сэндвич-панелей с тканевыми лицевыми слоями из полиэстера Е-стекла и пенопласта ПВХ при баллистической нагрузке были получены с использованием лагранжевой механики [99].

Авторы [100], учитывая трение, прочность на сдвиг и силу разрыва клеток сердцевинного слоя, провели аналитическое исследование рассеиваемой энергии и остаточной скорости снаряда, сталкивающегося с кевларовыми и композитными сэндвич-панелями из джутового волокна, и выявили, что толщина композитных слоев является ключевым фактором в распределении поглощения энергии.

Таблица 11 представляет обзор ключевых факторов, оказывающих влияние на баллистический отклик сэндвич-плиты при воздействии снарядов. В ней учтены параметры, такие как диаметр снаряда, толщина сердцевины и лицевой грани, материалы лицевых листов и сердцевины, а также расстояние между снарядами. Эти факторы имеют существенное значение для определения баллистических характеристик сэндвич-панелей и их способности справляться с воздействием взрывных нагрузок.

**Таблица 11. Факторы, влияющие на баллистический отклик**  
**Table 11. Factors Affecting Ballistic Response**

Фактор	Влияние на баллистический отклик
Диаметр снаряда	Оказывает влияние на баллистический предел пластины
Толщина сердцевины	Влияет на энергию рассеивания и прочность пластины



Толщина лицевой грани	Влияет на степень перфорации и пробития
Материалы лицевых листов и сердцевины	Определяют прочность и устойчивость пластины
Расстояние между снарядами	Влияет на перфорацию и повреждение пластины
Продолжительность контакта с нагрузкой	Оказывает влияние на энергию рассеивания
Время прохождения по толщине пластины	Влияет на динамику деформаций внутри пластины
Время поперечного прохождения снаряда	Влияет на реакцию пластины в поперечном направлении

Таблица 12 обращает внимание на влияние конструктивных параметров на баллистическую эффективность сэндвич-плит. Рассматриваются параметры, такие как толщина лицевых листов и сердцевины, материалы лицевых листов, присутствие энергетических рассеивателей, расстояние между панелями и продолжительность контакта с нагрузкой. Эти параметры оказывают влияние на способность сэндвич-панелей справляться с баллистическими ударами, формируя основу для оптимизации конструкции с учетом требований к баллистической защите.

Важно отметить, что представленные в таблицах 11 и 12 значения являются усредненными и основаны на данных предыдущих исследований и моделей. Фактические значения могут варьироваться в зависимости от конкретных условий эксплуатации, материалов, методов производства и других факторов. Вариации могут возникнуть из-за неоднородностей в материалах, различий в конструкции, а также в разнообразных условиях эксплуатации.

Параметры, такие как диаметр снаряда, толщина сердцевины, толщина лицевой грани, материалы лицевых листов и сердцевины, расстояние между панелями, продолжительность контакта с нагрузкой и время прохождения снаряда, могут быть подвержены изменениям в зависимости от конкретных сценариев использования. Вариабельность этих параметров следует учитывать при интерпретации результатов и принятии решений в области дизайна и инжиниринга. Исследования исходных данных в контексте конкретных применений являются ключевым элементом для более точных и надежных оценок баллистической эффективности сэндвич-панелей.

**Таблица 12. Влияние конструктивных параметров**  
**Table 12. Influence of Structural Parameters**

Параметр	Влияние на баллистическую эффективность
Толщина лицевых листов	Имеет прямую зависимость с эффективностью - чем толще, тем лучше
Толщина сердцевины	Имеет обратную зависимость с эффективностью - чем толще, тем хуже
Материалы лицевых листов	Различные материалы могут иметь разную эффективность
Присутствие энергетических рассеивателей	Увеличивает баллистическую эффективность
Расстояние между панелям	Имеет обратную зависимость с эффективностью - чем меньше расстояние, тем лучше
Продолжительность контакта с нагрузкой	Влияет на энергию рассеивания и эффективность

Таким образом, проведенные исследования баллистического воздействия на сэндвич-конструкции выявили важные аспекты и факторы, влияющие на их поведение под воздействием снарядов. Разработанные теоретические модели, такие как аналитическая модель, учитывающая малую деформацию, и трехэтапная модель для сэндвич-плит с минерало-гранулированным композитом, оказались эффективными инструментами для прогнозирования баллистического отклика и остаточных скоростей. Влияние параметров, таких как диаметр снаряда, толщина сердцевины, и других конструктивных особенностей, было подробно рассмотрено, что позволяет лучше понять и оптимизировать баллистическое поведение многослойных сэндвич-панелей.

Дополнительно, созданные модели для различных конфигураций, таких как WRM/эпоксидная смола/пена и CSM/эпоксидная смола/пена, а также для сэндвич-панелей с тканым ровингом из полиэстера Е-стекла и сердцевиной из пенопласта ПВХ, позволяют более глубоко взглянуть на динамику воздействия снарядов на различные типы сэндвич-конструкций. Подытоживая вышесказанное, можно отметить, что аналитические модели могут служить основой



для разработки более безопасных и эффективных защитных систем в различных областях, включая области, где обеспечение высокой степени защиты при минимизации потенциального ущерба является критически важным.

## 4 Conclusions

1. Низкоскоростной удар на сэндвич-конструкции: при низкоскоростном ударе на сэндвич-конструкции наблюдается разнообразие деформаций и разрушений, включая упругий изгиб, пластическую деформацию и полное разрушение материала. Аналитическое прогнозирование реакции таких конструкций широко основывается на законе сохранения энергии, учитывая различные режимы деформации. Множество исследователей изучали низкоскоростную реакцию сэндвич-балок, моделируя деформации с учетом граничных условий, локальных вмятинных эффектов и геометрической асимметрии. Трехэтапные аналитические модели для сэндвич-балок из пеноматериала позволяют успешно прогнозировать их динамические характеристики при низкоскоростном ударе, учитывая упругую стадию, стадию разрушения сердечника и окончательное разрушение.

2. Высокая стойкость сэндвич-структур к взрывным воздействиям: экспериментальные и аналитические исследования подтверждают, что сэндвич-структуры благодаря своим конструктивным особенностям обладают высокой стойкостью к воздействию взрывных нагрузок. Основная модель Флека и Дешпанде описывает динамический отклик полностью зажатой сэндвич-балки под воздействием взрывной нагрузки на три стадии: взаимодействие с жидкостью, сжатие активной зоны и изгиб всей конструкции. Эта модель стала основой для многочисленных последующих исследований, учитывая различные аспекты деформации и разрушения сэндвич-балок под воздействием взрывной нагрузки. Последующие аналитические модели учтены различные факторы, такие как давление жидкости, конфигурации сердцевины и свойства материалов, успешно описывая различные фазы деформации цельнометаллических сэндвич-панелей.

3. Практические и теоретические основы для дальнейших исследований: полученные результаты и разработанные модели предоставляют важные практические и теоретические основы для дальнейших исследований в области взрывостойкости сэндвич-оболочек. Применение упрощенной аналитической модели для изогнутых сэндвич-плит с МФЦ позволяет более детально разделить деформацию на три стадии, что важно для предсказания сил дробления многослойных балок. Дополнительные исследования по баллистическому воздействию сэндвич-конструкций успешно предсказывают их отклик и остаточные скорости снарядов, что имеет важное практическое применение в разработке более эффективных и безопасных конструкций для различных применений.

## 5 Fundings

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2022-010 dated 14 January 2022 and No. 075--01568-23-04 dated 28 March 2023 (Additional agreement 075-03-2022-010/10 dated 09 November 2022, Additional agreement 075-03-2023-004/4 dated 22 May 2023), FSEG-2022-0010.

## References

- 1 Kamble, Z. (2023) Advanced Structural and Multi-Functional Sandwich Composites with Prismatic and Foam Cores: A Review. *Polymer Composites*, John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/PC.27849>.
- 2 Al-Khazraji, M.S., Bakhy, S.H. and Jweeg, M.J. (2023) Composite Sandwich Structures: Review of Manufacturing Techniques. *Journal of Engineering, Design and Technology*, Emerald Publishing, **ahead-of-print**. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2022-0141/FULL/XML>.
- 3 Djemaoune, Y., Krstic, B., Rasic, S., Radulovic, D. and Dodic, M. (2022) Experimental Investigation of an Alternative Approach to Temporarily Repair Nomex Honeycomb Sandwich Structures in Aerospace Applications. <https://doi.org/10.1177/14644207221139182>, SAGE Publications/Sage UK: London, England, **237**, 1215–1228.



- <https://doi.org/10.1177/14644207221139182>.
- 4 Ginot, M., Bouvet, C., Castanié, B., D'Ottavio, M., Serra, J. and Mahuet, N. (2023) Local Buckling on Large Sandwich Panels Applied to Light Aviation: Experimental and Computation Dialogue. *International Journal of Solids and Structures*, Pergamon, **268**, 112170. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2023.112170>.
- 5 Ginot, M., Bouvet, C., Castanié, B., Serra, J. and Mahuet, N. (2023) Local Buckling on Large Sandwich Panels Used in Light Aviation: Experimental Setup and Failure Scenarios. *Composite Structures*, Elsevier, **304**, 116439. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116439>.
- 6 Tuswan, T., Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B. and Sukma Sukma, N.P.L. (2023) A Critical Review on Structural Testing and Assessment of Lightweight Sandwich Structure for Ship Structure Application. *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., **2674**. <https://doi.org/10.1063/5.0116355/2890340>.
- 7 Di Bella, G. and Palomba, G. (2023) Cork/Aluminium Double-Layer Sandwich Panels under Impact Loading for Lightweight Ship Structures. *International Journal of Crashworthiness*, Taylor & Francis, **28**, 797–808. <https://doi.org/10.1080/13588265.2022.2130619>.
- 8 Kausar, A., Ahmad, I., Rakha, S.A., Eisa, M.H. and Diallo, A. (2023) State-Of-The-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing—to—High Performance Applications. *Journal of Composites Science 2023, Vol. 7, Page 102*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **7**, 102. <https://doi.org/10.3390/JCS7030102>.
- 9 Awd Allah, M.M., Abd El-baky, M.A., Alshahrani, H., Sebaey, T.A. and Hegazy, D.A. (2023) Multi Attribute Decision Making through COPRAS on Tensile Properties of Hybrid Fiber Metal Laminate Sandwich Structures for Aerospace and Automotive Industries. *Journal of Composite Materials*, SAGE Publications Ltd, **57**, 3757–3773. [https://doi.org/10.1177/00219983231194260/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_00219983231194260-FIG9.JPEG](https://doi.org/10.1177/00219983231194260/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_00219983231194260-FIG9.JPEG).
- 10 Sampathkumar, D., Mohankumar, A., Teekaraman, Y., Kuppusamy, R. and Radhakrishnan, A. (2023) Bioinspired Sandwich Structure in Composite Panels. *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi Limited, **2023**. <https://doi.org/10.1155/2023/9096874>.
- 11 Almutairi, A.D., Bai, Y. and Ferdous, W. (2023) Flexural Behaviour of GFRP-Softwood Sandwich Panels for Prefabricated Building Construction. *Polymers 2023, Vol. 15, Page 2102*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 2102. <https://doi.org/10.3390/POLYM15092102>.
- 12 Wang, Y., Yang, S., Luo, Q., Li, Q. and Sun, G. (2023) Experimental Characterization of Impact Damage in Foam-Core Sandwich Structures Using Acoustic Emission, Optical Scanning and X-Ray Computed Tomography Techniques. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **265**, 110919. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2023.110919>.
- 13 Zhang, C., Fang, X., Curiel-Sosa, J.L., Bui, T.Q. and Mao, C. (2023) Damage in Hybrid Corrugated Core Sandwich Structures under High Velocity Hail Ice Impact: A Numerical Study. *Defence Technology*, Elsevier, **27**, 217–236. <https://doi.org/10.1016/J.DT.2022.12.014>.
- 14 Osa-uwagboe, N., Silberschmidt, V. V., Aremi, A. and Demirci, E. (2023) Mechanical Behaviour of Fabric-Reinforced Plastic Sandwich Structures: A State-of-the-Art Review. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, SAGE Publications Ltd, **25**, 591–622. [https://doi.org/10.1177/10996362231170405/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_10996362231170405-FIG11.JPEG](https://doi.org/10.1177/10996362231170405/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_10996362231170405-FIG11.JPEG).
- 15 Li, M., Du, S., Li, F. and Jing, X. (2020) Vibration Characteristics of Novel Multilayer Sandwich Beams: Modelling, Analysis and Experimental Validations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Academic Press, **142**, 106799. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2020.106799>.
- 16 Ma, Q., Rejab, M.R.M., Siregar, J.P. and Guan, Z. (2021) A Review of the Recent Trends on Core Structures and Impact Response of Sandwich Panels. *Journal of Composite Materials*, SAGE Publications Ltd, **55**, 2513–2555. [https://doi.org/10.1177/0021998321990734/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_0021998321990734-FIG20.JPEG](https://doi.org/10.1177/0021998321990734/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0021998321990734-FIG20.JPEG).
- 17 Funari, M.F., da Silva, L.C.M., Lonetti, P., Spadea, S. and Lourenço, P.B. (2022) Numerical Simulation of Fracture in Layered and Sandwich Structures: A Systematic Literature Review. *Composites Part C: Open Access*, Elsevier, **9**, 100294. <https://doi.org/10.1016/J.JCOMC.2022.100294>.
- 18 Carrera, E. and Brischetto, S. (2009) A Survey with Numerical Assessment of Classical and Refined Theories for the Analysis of Sandwich Plates. *Applied Mechanics Reviews*, American



- Society of Mechanical Engineers Digital Collection, **62**, 1–17. <https://doi.org/10.1115/1.3013824/446383>.
- 19 Katariya, P. V., Panda, S.K. and Mehar, K. (2021) Theoretical Modelling and Experimental Verification of Modal Responses of Skewed Laminated Sandwich Structure with Epoxy-Filled Softcore. *Engineering Structures*, Elsevier, **228**, 111509. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111509>.
- 20 Karimi, M., Khoshgoftar, M.J., Karimi, M., Mirzaali, M.J. and Javanbakht, Z. (2023) An Analytical Model for the Static Behaviour of Honeycomb Sandwich Plates with Auxetic Cores Using Higher-Order Shear Deformation Theories. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, Springer Science and Business Media B.V., **19**, 951–969. <https://doi.org/10.1007/S10999-023-09667-4/FIGURES/7>.
- 21 Maji, A. and Mahato, P.K. (2022) Development and Applications of Shear Deformation Theories for Laminated Composite Plates: An Overview. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, SAGE Publications Ltd, **35**, 2576–2619. [https://doi.org/10.1177/0892705720930765/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_0892705720930765-FIG1.JPEG](https://doi.org/10.1177/0892705720930765/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0892705720930765-FIG1.JPEG).
- 22 Caliri, M.F., Ferreira, A.J.M. and Tita, V. (2016) A Review on Plate and Shell Theories for Laminated and Sandwich Structures Highlighting the Finite Element Method. *Composite Structures*, Elsevier, **156**, 63–77. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.02.036>.
- 23 Kumar, A., Chakrabarti, A. and Bhargava, P. (2013) Finite Element Analysis of Laminated Composite and Sandwich Shells Using Higher Order Zigzag Theory. *Composite Structures*, Elsevier, **106**, 270–281. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2013.06.021>.
- 24 Liu, J., He, B., Ye, W. and Yang, F. (2021) High Performance Model for Buckling of Functionally Graded Sandwich Beams Using a New Semi-Analytical Method. *Composite Structures*, Elsevier, **262**, 113614. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113614>.
- 25 Librescu, L. and Hause, T. (2000) Recent Developments in the Modeling and Behavior of Advanced Sandwich Constructions: A Survey. *Composite Structures*, Elsevier, **48**, 1–17. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(99\)00068-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00068-9).
- 26 Tang, E., Yin, H., Chen, C., Han, Y. and Feng, M. (2020) Simulation of CFRP/Aluminum Foam Sandwich Structure under High Velocity Impact. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, **9**, 7273–7287. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.04.093>.
- 27 Mei, J., Liu, J., Zhang, M. and Huang, W. (2022) Experimental and Numerical Study on the Ballistic Impact Resistance of the CFRP Sandwich Panel with the X-Frame Cores. *International Journal of Mechanical Sciences*, Pergamon, **232**, 107649. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2022.107649>.
- 28 Tofighi, M.B., Biglari, H. and Shokrieh, M.M. (2022) Sensitivity of the Impact Performance of Nano Reinforced Sandwich Structures to the Material and Geometrical Variations. *Journal of Composite Materials*, SAGE Publications Ltd, **56**, 1811–1828. [https://doi.org/10.1177/00219983221083735/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_00219983221083735-FIG15.JPEG](https://doi.org/10.1177/00219983221083735/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_00219983221083735-FIG15.JPEG).
- 29 Yan, J., Liu, Y., Yan, Z., Bai, F., Shi, Z., Si, P. and Huang, F. (2022) Ballistic Characteristics of 3D-Printed Auxetic Honeycomb Sandwich Panel Using CFRP Face Sheet. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **164**, 104186. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2022.104186>.
- 30 Akil Hazizan, M. and Cantwell, W.J. (2003) The Low Velocity Impact Response of an Aluminium Honeycomb Sandwich Structure. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **34**, 679–687. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00089-1).
- 31 Yu, J.L., Wang, E., Li, J. and Zheng, Z. (2008) Static and Low-Velocity Impact Behavior of Sandwich Beams with Closed-Cell Aluminum-Foam Core in Three-Point Bending. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **35**, 885–894. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2008.01.006>.
- 32 Qin, Q.H. and Wang, T.J. (2011) Low-Velocity Heavy-Mass Impact Response of Slender Metal Foam Core Sandwich Beam. *Composite Structures*, Elsevier, **93**, 1526–1537. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2010.11.018>.
- 33 Qin, Q. and Wang, T.J. (2013) Low-Velocity Impact Response of Fully Clamped Metal Foam Core Sandwich Beam Incorporating Local Denting Effect. *Composite Structures*, Elsevier, **96**, 346–356. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.09.024>.
- 34 Wang, M., Qin, Q. and Wang, T.J. (2015) Low-Velocity Impact and Minimum Mass Design of





- Physically Asymmetric Sandwich Beams with Metal Foam Core. *Acta Mechanica*, Springer-Verlag Wien, **226**, 1839–1859. <https://doi.org/10.1007/S00707-014-1291-1/METRICS>.
- 35 Zhang, J., Qin, Q., Xiang, C., Wang, Z. and Wang, T.J. (2016) A Theoretical Study of Low-Velocity Impact of Geometrically Asymmetric Sandwich Beams. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **96**, 35–49. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2016.05.011>.
- 36 Li, Q.M., Ma, G.W. and Ye, Z.Q. (2006) An Elastic–Plastic Model on the Dynamic Response of Composite Sandwich Beams Subjected to Mass Impact. *Composite Structures*, Elsevier, **72**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2004.10.015>.
- 37 Zhang, J., Qin, Q., Chen, S., Yang, Y., Ye, Y., Xiang, C. and Wang, T.J. (2018) Low-Velocity Impact of Multilayer Sandwich Beams with Metal Foam Cores: Analytical, Experimental, and Numerical Investigations. <https://doi.org/10.1177/1099636218759827>, SAGE Publications Sage UK: London, England, **22**, 626–657. <https://doi.org/10.1177/1099636218759827>.
- 38 Crupi, V., Epasto, G. and Guglielmino, E. (2012) Collapse Modes in Aluminium Honeycomb Sandwich Panels under Bending and Impact Loading. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **43**, 6–15. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2011.12.002>.
- 39 Qin, Q., Zheng, X., Zhang, J., Yuan, C. and Wang, T.J. (2018) Dynamic Response of Square Sandwich Plates with a Metal Foam Core Subjected to Low-Velocity Impact. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **111**, 222–235. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2017.09.011>.
- 40 Foo, C.C., Chai, G.B. and Seah, L.K. (2008) A Model to Predict Low-Velocity Impact Response and Damage in Sandwich Composites. *Composites Science and Technology*, Elsevier, **68**, 1348–1356. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2007.12.007>.
- 41 Zhang, D., Fei, Q. and Zhang, P. (2017) Drop-Weight Impact Behavior of Honeycomb Sandwich Panels under a Spherical Impactor. *Composite Structures*, Elsevier, **168**, 633–645. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.02.053>.
- 42 Meram, A. and Çetin, M.E. (2020) Experimental Investigation on the Effects of Core/Facing Interface Performance on the Low-Velocity Impact Behavior of Honeycomb Sandwich Panels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Springer, **29**, 7408–7419. <https://doi.org/10.1007/S11665-020-05181-2/FIGURES/15>.
- 43 Ashab, A.S.M., Ruan, D., Lu, G. and Wong, Y.C. (2016) Quasi-Static and Dynamic Experiments of Aluminum Honeycombs under Combined Compression-Shear Loading. *Materials & Design*, Elsevier, **97**, 183–194. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.02.074>.
- 44 Fleck, N.A. and Deshpande, V.S. (2004) The Resistance of Clamped Sandwich Beams to Shock Loading. *Journal of Applied Mechanics*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, **71**, 386–401. <https://doi.org/10.1115/1.1629109>.
- 45 Wei, G. and Wu, L. (2023) Nonlinear Transient Response of Elastoplastic Sandwich Beam in Underwater Blast and the Fluid-Structure Interaction. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **172**, 104399. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2022.104399>.
- 46 Yang, L.H., Qu, J., Yu, G.C., Yang, J.S. and Wu, L.Z. (2019) The Effect of Strain-Rate Sensitivity on Dynamic Response of Impulsively Loaded Sandwich Beam. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Taylor & Francis, **26**, 1743–1749. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1447177>.
- 47 Qiu, X., Deshpande, V.S. and Fleck, N.A. (2005) Impulsive Loading of Clamped Monolithic and Sandwich Beams over a Central Patch. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Pergamon, **53**, 1015–1046. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2004.12.004>.
- 48 Ray, K. and Kar, R.C. (1996) Parametric Instability of a Dual-Cored Sandwich Beam. *Computers & Structures*, Pergamon, **61**, 665–671. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(96\)00035-1](https://doi.org/10.1016/0045-7949(96)00035-1).
- 49 Lam, K.Y. and Chun, L. (1994) Dynamics Response of a Simply Supported Sandwich Beam Subjected to Impulsive Loading. *Composite Structures*, Elsevier, **27**, 331–337. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(94\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0263-8223(94)90092-2).
- 50 Qin, Q.H. and Wang, T.J. (2009) A Theoretical Analysis of the Dynamic Response of Metallic Sandwich Beam under Impulsive Loading. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Elsevier Masson, **28**, 1014–1025. <https://doi.org/10.1016/J.EUROMECHSOL.2009.04.002>.
- 51 Qin, Q.H., Wang, T.J. and Zhao, S.Z. (2009) Large Deflections of Metallic Sandwich and Monolithic Beams under Locally Impulsive Loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, Pergamon, **51**, 752–773. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2009.08.008>.
- 52 Qin, Q., Yuan, C., Zhang, J. and Wang, T.J. (2014) A Simplified Analytical Model for Metal



- Sandwich Beam with Soft Core under Impulsive Loading over a Central Patch. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **74**, 67–82. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2014.06.008>.
- 53 Yuan, C., Qin, Q. and Wang, T.J. (2015) Simplified Analysis of Large Deflection Response of a Metal Sandwich Beam Subjected to Impulsive Loading. *Acta Mechanica*, Springer-Verlag Wien, **226**, 3639–3651. <https://doi.org/10.1007/S00707-015-1405-4/METRICS>.
- 54 Phan, C.N., Kardomateas, G.A. and Frostig, Y. (2013) Blast Response of a Sandwich Beam/Wide Plate Based on the Extended High-Order Sandwich Panel Theory and Comparison with Elasticity. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, **80**. <https://doi.org/10.1115/1.4023619/370387>.
- 55 Yuan, Z. and Kardomateas, G.A. (2021) Dynamic Stability of Sandwich Beams/Wide Plates Subjected to Axial Impulsive Loads. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), **88**. <https://doi.org/10.1115/1.4049223/1091829>.
- 56 Kardomateas, G.A., Frostig, Y. and Phan, C.N. (2013) Dynamic Elasticity Solution for the Transient Blast Response of Sandwich Beams/Wide Plates. <https://doi.org/10.2514/1.J051885>, American Institute of Aeronautics and Astronautics, **51**, 485–491. <https://doi.org/10.2514/1.J051885>.
- 57 Tilbrook, M.T., Deshpande, V.S. and Fleck, N.A. (2006) The Impulsive Response of Sandwich Beams: Analytical and Numerical Investigation of Regimes of Behaviour. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Pergamon, **54**, 2242–2280. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2006.07.001>.
- 58 Zhang, P., Li, X., Wang, Z., Zhao, L. and Yan, X. (2018) Dynamic Blast Loading Response of Sandwich Beam with Origami-Inspired Core. *Results in Physics*, Elsevier, **10**, 946–955. <https://doi.org/10.1016/J.RINP.2018.07.043>.
- 59 Qin, Q., Yuan, C., Zhang, J. and Wang, T.J. (2014) Large Deflection Response of Rectangular Metal Sandwich Plates Subjected to Blast Loading. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Elsevier Masson, **47**, 14–22. <https://doi.org/10.1016/J.EUROMECHSOL.2014.02.016>.
- 60 Zhu, F., Wang, Z., Lu, G. and Zhao, L. (2009) Analytical Investigation and Optimal Design of Sandwich Panels Subjected to Shock Loading. *Materials & Design*, Elsevier, **30**, 91–100. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2008.04.027>.
- 61 Qiu, X., Deshpande, V.S. and Fleck, N.A. (2004) Dynamic Response of a Clamped Circular Sandwich Plate Subject to Shock Loading. *Journal of Applied Mechanics*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, **71**, 637–645. <https://doi.org/10.1115/1.1778416>.
- 62 Zhu, F., Wang, Z., Lu, G. and Nurick, G. (2010) Some Theoretical Considerations on the Dynamic Response of Sandwich Structures under Impulsive Loading. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **37**, 625–637. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2009.11.003>.
- 63 Zhu, F., Wang, Z., Lu, G. and Ruan, D. (2009) The Impulsive Response of Aluminium Foam Core Sandwich Structures. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, Inderscience Publishers, **1**, 133–153. <https://doi.org/10.1504/IJMATEI.2009.029361>.
- 64 Zhang, J., Qin, Q. and Wang, T.J. (2013) Compressive Strengths and Dynamic Response of Corrugated Metal Sandwich Plates with Unfilled and Foam-Filled Sinusoidal Plate Cores. *Acta Mechanica*, Springer, **224**, 759–775. <https://doi.org/10.1007/S00707-012-0770-5/METRICS>.
- 65 Zhang, J., Zhou, R., Wang, M., Qin, Q., Ye, Y. and Wang, T.J. (2018) Dynamic Response of Double-Layer Rectangular Sandwich Plates with Metal Foam Cores Subjected to Blast Loading. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **122**, 265–275. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2018.08.016>.
- 66 Wang, M., Qin, Q. and Wang, T.J. (2017) On Physically Asymmetric Sandwich Plates with Metal Foam Core Subjected to Blast Loading: Dynamic Response and Optimal Design. *Acta Mechanica*, Springer-Verlag Wien, **228**, 3265–3283. <https://doi.org/10.1007/S00707-017-1870-Z/METRICS>.
- 67 Wang, T., Qin, Q., Wang, M., Yu, W., Wang, J., Zhang, J. and Wang, T.J. (2017) Blast Response of Geometrically Asymmetric Metal Honeycomb Sandwich Plate: Experimental and Theoretical Investigations. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **105**, 24–38. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2016.10.009>.
- 68 Nguyen, D.D. and Pham, C.H. (2016) Nonlinear Dynamic Response and Vibration of Sandwich Composite Plates with Negative Poisson's Ratio in Auxetic Honeycombs. <https://doi.org/10.1177/1099636216674729>, SAGE Publications Sage UK: London, England, **20**, 692–717. <https://doi.org/10.1177/1099636216674729>.
- 69 Cong, P.H., Quyet, P.K. and Duc, N.D. (2021) Effects of Lattice Stiffeners and Blast Load on Nonlinear Dynamic Response and Vibration of Auxetic Honeycomb Plates.



- <https://doi.org/10.1177/0954406221992797>, SAGE PublicationsSage UK: London, England, **235**, 7192–7211. <https://doi.org/10.1177/0954406221992797>.
- 70 Cui, X., Zhao, L., Wang, Z., Zhao, H. and Fang, D. (2012) A Lattice Deformation Based Model of Metallic Lattice Sandwich Plates Subjected to Impulsive Loading. *International Journal of Solids and Structures*, Pergamon, **49**, 2854–2862. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2012.04.025>.
- 71 Wei, Z., Dharmasena, K.P., Wadley, H.N.G. and Evans, A.G. (2007) Analysis and Interpretation of a Test for Characterizing the Response of Sandwich Panels to Water Blast. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **34**, 1602–1618. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2006.09.091>.
- 72 Zhang, J.X., Qin, Q.H. and Wang, T.J. (2011) Resistance of Metallic Foam-filled Trapezoidal Plate Core Sandwich Plate to Blast Loading. *Materials Research Innovations*, Taylor & Francis, **15**. <https://doi.org/10.1179/143307511X12858956847994>.
- 73 Schenk, M., Guest, S.D. and McShane, G.J. (2014) Novel Stacked Folded Cores for Blast-Resistant Sandwich Beams. *International Journal of Solids and Structures*, Pergamon, **51**, 4196–4214. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2014.07.027>.
- 74 Birman, V. and Kardomateas, G.A. (2018) Review of Current Trends in Research and Applications of Sandwich Structures. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **142**, 221–240. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.01.027>.
- 75 Zhang, W., Yu, X., Li, M., Lang, D., Zhang, X. and Xie, Z. (2018) Silicon Promotes Growth and Root Yield of Glycyrrhiza Uralensis under Salt and Drought Stresses through Enhancing Osmotic Adjustment and Regulating Antioxidant Metabolism. *Crop Protection*, Elsevier, **107**, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2018.01.005>.
- 76 Zhang, J., Ye, Y. and Qin, Q. (2019) On Dynamic Response of Rectangular Sandwich Plates with Fibre-Metal Laminate Face-Sheets under Blast Loading. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **144**, 106288. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2019.106288>.
- 77 Kazanci, Z. (2011) Dynamic Response of Composite Sandwich Plates Subjected to Time-Dependent Pressure Pulses. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Pergamon, **46**, 807–817. <https://doi.org/10.1016/J.IJNONLINMEC.2011.03.011>.
- 78 Quan, T.Q., Ha, D.T.T. and Duc, N.D. (2022) Analytical Solutions for Nonlinear Vibration of Porous Functionally Graded Sandwich Plate Subjected to Blast Loading. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **170**, 108606. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2021.108606>.
- 79 Tekalur, S.A., Bogdanovich, A.E. and Shukla, A. (2009) Shock Loading Response of Sandwich Panels with 3-D Woven E-Glass Composite Skins and Stitched Foam Core. *Composites Science and Technology*, Elsevier, **69**, 736–753. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2008.03.017>.
- 80 Hoo Fatt, M.S. and Sirivolu, D. (2017) Marine Composite Sandwich Plates under Air and Water Blasts. *Marine Structures*, Elsevier, **56**, 163–185. <https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2017.08.004>.
- 81 Jing, L., Wang, Z. and Zhao, L. (2014) An Approximate Theoretical Analysis for Clamped Cylindrical Sandwich Shells with Metallic Foam Cores Subjected to Impulsive Loading. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **60**, 150–157. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.12.047>.
- 82 Li, R., Kardomateas, G.A. and Simitse, G.J. (2008) Nonlinear Response of a Shallow Sandwich Shell with Compressible Core to Blast Loading. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, **75**, 0610231–06102310. <https://doi.org/10.1115/1.2937154/476349>.
- 83 Fatt, M.S.H., Gao, Y. and Sirivolu, D. (2013) Foam-Core, Curved Composite Sandwich Panels under Blast. <http://dx.doi.org/10.1177/1099636213481469>, SAGE PublicationsSage UK: London, England, **15**, 261–291. <https://doi.org/10.1177/1099636213481469>.
- 84 Duc, N.D., Seung-Eock, K., Tuan, N.D., Tran, P. and Khoa, N.D. (2017) New Approach to Study Nonlinear Dynamic Response and Vibration of Sandwich Composite Cylindrical Panels with Auxetic Honeycomb Core Layer. *Aerospace Science and Technology*, Elsevier Masson, **70**, 396–404. <https://doi.org/10.1016/J.AST.2017.08.023>.
- 85 Duc, N.D., Seung-Eock, K., Cong, P.H., Anh, N.T. and Khoa, N.D. (2017) Dynamic Response and Vibration of Composite Double Curved Shallow Shells with Negative Poisson's Ratio in Auxetic Honeycombs Core Layer on Elastic Foundations Subjected to Blast and Damping Loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, Pergamon, **133**, 504–512. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2017.09.009>.



- 86 Cong, P.H., Khanh, N.D., Khoa, N.D. and Duc, N.D. (2018) New Approach to Investigate Nonlinear Dynamic Response of Sandwich Auxetic Double Curves Shallow Shells Using TSDT. *Composite Structures*, Elsevier, **185**, 455–465. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.11.047>.
- 87 Van Long, N., Tinh, T.I., Bich, D.H. and Tu, T.M. (2022) Nonlinear Dynamic Responses of Sandwich-FGM Doubly Curved Shallow Shells Subjected to Underwater Explosions Using First-Order Shear Deformation Theory. *Ocean Engineering*, Pergamon, **260**, 111886. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.111886>.
- 88 Jiang, W.Z., Liu, Y., Gu, Y. and Lu, G.X. (2014) An Analytical Model of a Clamped Sandwich Beam under Low-Impulse Mass Impact. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Individual owner, **11**, 1651–1678. <https://doi.org/10.1590/S1679-78252014000900009>.
- 89 Cui, T., Zhang, J., Li, K., Peng, J., Chen, H., Qin, Q. and Poh, L.H. (2022) Ballistic Limit of Sandwich Plates With a Metal Foam Core. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, **89**. <https://doi.org/10.1115/1.4052835/1122884>.
- 90 Chen, P., Niu, W., Yan, X. and Lu, G. (2016) Theoretical Model for Dynamic Response of Aluminum Foam Sandwich Targets by Truncated Cone-Nosed Projectiles. <https://doi.org/10.1177/1099636216664288>, SAGE Publications Sage UK: London, England, **20**, 249–267. <https://doi.org/10.1177/1099636216664288>.
- 91 Lin, C. and Fatt, M.S.H. (2006) Perforation of Composite Plates and Sandwich Panels under Quasi-Static and Projectile Loading. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998306060173>, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, **40**, 1801–1840. <https://doi.org/10.1177/0021998306060173>.
- 92 Schäfer, F.K., Ryan, S., Lambert, M. and Putzar, R. (2008) Ballistic Limit Equation for Equipment Placed behind Satellite Structure Walls. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **35**, 1784–1791. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2008.07.074>.
- 93 Hoo Fatt, M.S. and Park, K.S. (2000) Perforation of Honeycomb Sandwich Plates by Projectiles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, **31**, 889–899. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00021-X).
- 94 Ryan, S., Schaefer, F., Destefanis, R. and Lambert, M. (2008) A Ballistic Limit Equation for Hypervelocity Impacts on Composite Honeycomb Sandwich Panel Satellite Structures. *Advances in Space Research*, Pergamon, **41**, 1152–1166. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2007.02.032>.
- 95 Reddy, T.Y., Wen, H.M., Reid, S.R. and Soden, P.D. (1998) Penetration and Perforation of Composite Sandwich Panels by Hemispherical and Conical Projectiles. *Journal of Pressure Vessel Technology*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, **120**, 186–194. <https://doi.org/10.1115/1.2842239>.
- 96 Cui, X.D., Zeng, T. and Fang, D.N. (2006) Study on Ballistic Energy Absorption of Laminated and Sandwich Composites. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, **306–308**, 739–744. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.306-308.739>.
- 97 Skvortsov, V., Kepler, J. and Bozhevolnaya, E. (2003) Energy Partition for Ballistic Penetration of Sandwich Panels. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **28**, 697–716. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00153-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00153-7).
- 98 Velmurugan, R., Ganesh Babu, M. and Gupta, N.K. (2006) Projectile Impact on Sandwich Panels. *International Journal of Crashworthiness*, WoodHead Publishing, **11**, 153–164. <https://doi.org/10.1533/IJCR.2005.0385>.
- 99 Hoo Fatt, M.S. and Sirivolu, D. (2010) A Wave Propagation Model for the High Velocity Impact Response of a Composite Sandwich Panel. *International Journal of Impact Engineering*, Pergamon, **37**, 117–130. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2009.09.002>.
- 100 Zelelew, T.M., Koricho, E.G. and Ali, A.N. (2022) Modeling and Numerical Simulation of Ballistic Impact on Sandwich Composite Materials. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **412 LNICST**, 339–349. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93712-6\\_23/FIGURES/6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93712-6_23/FIGURES/6).