


Научная статья  
УДК 624.074.421  
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180648>

## СИНТЕЗ СКЛАДЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С АСИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Валентин Илдарович Халиулин<sup>1</sup> , Павел Алексеевич Петров<sup>2</sup>, Алена Александровна Малышева<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>1</sup> [pla.kai@mail.ru](mailto:pla.kai@mail.ru) 

<sup>2</sup> [l3petrof@mail.ru](mailto:l3petrof@mail.ru)

<sup>3</sup> [AAKHUDOVA@kai.ru](mailto:AAKHUDOVA@kai.ru)

**Аннотация.** Представлена методика синтеза нового класса складчатых структур. Их характерным признаком является наклон граней в одну сторону на конечном этапе трансформирования. В заключительной фазе их грани укладываются на плоскую или цилиндрическую поверхность. Определены закономерности формирования их рельефа. Они основаны на преобразовании базовых канонических структур путем придания их элементарным модулям асимметричной формы. Областью применения асимметричных структур могут быть звуко- и энергопоглощающие сэндвич-панели.

**Ключевые слова:** наполнитель многослойных панелей, складчатые конструкции, синтез складчатых структур, структуры с асимметричным типовым модулем, примеры складчатых архитектурных решений, звукопоглощающие сэндвич-панели, энергопоглощающие складчатые конструкции, технология изготовления складчатых наполнителей из композитов

**Финансирование:** статья подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научно-го центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2022-1023 от 17.05.2022).

**Для цитирования:** Халиулин В.И., Петров П.А., Малышева А.А. Синтез складчатых конструкций с асимметричной структурой // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 56–66. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180648>

Original article

## SYNTHESIS OF FOLDED STRUCTURES WITH AN ASYMMETRIC CONFIGURATION

Valentin I. Khaliulin<sup>1</sup> , Pavel A. Petrov<sup>2</sup>, Alena A. Malysheva<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>1</sup> [pla.kai@mail.ru](mailto:pla.kai@mail.ru) 

<sup>2</sup> [l3petrof@mail.ru](mailto:l3petrof@mail.ru)

<sup>3</sup> [AAKHUDOVA@kai.ru](mailto:AAKHUDOVA@kai.ru)

### Abstract

The article presents a technique for the new class of folded structures synthesis. Characteristic attribute of these structures is facets inclination to one side at the final stage of transformation. Their facets are being piled at the final stage on either flat or cylindrical surface. The authors defined their relief shaping regularities. In general, they are based on basic canonic shapes transformation by giving asymmetric shape to their elementary modules.

The application area of the designs based on the asymmetric structures may be sound- and energy-absorbing sandwich-panels of the flying vehicles.

Due to the facets inclination to one side, the resonant effect of sound absorption can be supplemented by the sound energy dissipative losses at the presence of the acoustic permeability of the filler material.

The asymmetric filler property to fold up to the state of horizontal scaly pack without destruction will allow in the long view designing sandwich-panels with controlled energy-absorption parameters.

The article presents the results of the studies of the possibility to synthesize row-type folded structures of both azimuthal and reversing type. Relief surfaces with quadriradiate module and on type of the hexradiate module were considered herewith.

The authors demonstrate that conventional methods of “global” and “local” modification of row-type structures are fully applicable to the asymmetric ones as well. Cellular fillers with the cells inclination to the skin may be obtained with modification techniques based on asymmetric structures. A technique for obtaining asymmetric structures was tested in the polar system of coordinates. As a result, facet surfaces with radial arrangement of structural elements were synthesized as well. The suchlike structures may be applied as turbine impellers or filter elements.

A wide range of materials may be employed to produce asymmetric folded structures, including thermoset or thermoplastic composites, thin sheet materials and synthetic paper.

The article proposes a technological scheme for the asymmetric type fillers manufacturing from composites. It is based on the prepreg sheet synchronous folding process by the shape-generating transformable mandrel.

Characteristic feature of the thin sheet folding process is the material constant thickness retaining and the absence of its structure distortion, such as reinforcement angles in composites.

Samples of glass fiber folded structures with the Z–A-corrugation and steel folded structures with Z–A–G-corrugation are presented. Preliminary laser marking of the material ensures high accuracy of the relief part.

**Keywords:** multi-layered panels filler, folded structures, folded structures synthesis, structures with asymmetric generic module, examples of folded architectural solutions, sound-absorbing sandwich panels, energy-absorbing folded structures, technology for folded fillers from composites manufacturing

**Funding:** the article was prepared as part of the Program on creation and development of the world-class Scientific Centre “Supersonic” for 2020–2025, with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-1023, dated 05/17/2022).

**For citation:** Khaliulin V.I., Petrov P.A., Malysheva A.A. On Synthesis of Folded Structures with an Asymmetric Configuration. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 56–66. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180648>

---

## Введение

Применение в летательных аппаратах сэндвич-панелей определяется, в первую очередь, их высокой удельной несущей способностью. В то же время на такие конструкции часто возлагаются другие функции: звукопоглощение, теплоизоляция, энергопоглощение, снижение радиолокационной заметности и т.д., поэтому поиск новых типов легких заполнителей является актуальной темой. Определенным потенциалом в данном отношении обладают заполнители на основе складчатых структур.

Складывание листового материала в сложные трехмерные структуры с периодически повторяющимися типовыми фрагментами предопределяет новую технологию в производстве заполнителей для сэндвич-панелей. Геометрические формы создаются трансформированием плоских листовых материалов путем изгиба их по линиям разметки на листе. Формирование глубоко рельефных конструкций другими способами обработки материалов (вытяжка, штамповка, ковка и т. п.) без операций сборки сложно реализуемо.

Существенным достоинством складчатых структур является бесконечное многообразие их архитектурных решений. В связи с этим появляется возможность создания заполнителей сэндвич-панелей, «заточенных» на определенный функционал. Например, можно синтезировать архитектуру, обеспечивающую высокую весовую эффективность при работе на сжатие, в другом варианте – обеспечить высокую сдвиговую прочность и жесткость. Многовариантность пересечения граней и образование камер сложной формы предопределяют эффективное звуко- и энергопоглощение сэндвич-панелями на их основе.

Результаты поиска новых решений в области складчатых структур приведены в ряде работ зарубежных [1–10] и отечественных [11–18] авторов.

В статье [19] впервые была предпринята попытка систематизировать эти структуры и создать классификацию, а также представить основополагающие принципы их синтеза. Следует отметить, что все эти исследования проводились для структур, состоящих из типовых элементарных модулей с зеркальной

симметрией. Наиболее изученными и систематизированными являются рядовые четырех- и шестилучевые складчатые структуры. Их классификация и описание свойств приведены в работе [19].

Характерной особенностью складчатых структур является то, что их периодически повторяющиеся типовые фрагменты – элементарные модули (ЭМ) зеркально симметричны. Положение плоскости симметрии определяется пилообразными линиями.

Плоскости симметрии элементарных модулей на всех этапах трансформирования структуры остаются перпендикулярными к плоскости заготовки перед началом ее формообразования. Как следствие симметрии, на конечном этапе все материнские рядовые структуры принимают вид плотно сжатого пакета, при этом грани располагаются в плоскостях, перпендикулярных плоскости заготовки.

Можно сказать, что возможности поиска новых архитектурных решений в области симметричных структур фактически исчерпаны. В связи с этим возникла идея синтеза складчатых конструкций с асимметричными типовыми фрагментами.

По предположению авторов асимметричное строение может значительно повысить некоторые функциональные характеристики складчатых структур, например при использовании их в звуко- и энергопоглощающих панелях.

В области построения складчатых структур с новой архитектурой это перспективное направление не изучено.

Целью настоящей работы является создание методики синтеза различных рядовых структур с асимметричным строением элементарного модуля, исследование геометрических свойств структур нового класса, а также изучение закономерностей их трансформирования.

В статье будем пользоваться сокращенными обозначениями складчатых структур:

Z-гофр – четырехлучевая азимутальная каноническая;

Z-A-гофр – четырехлучевая асимметричная азимутальная;

V-гофр – реверсивная четырехлучевая каноническая;

Z-A-G – четырехлучевая азимутальная глобально модифицированная;

Z-A-L – четырехлучевая азимутальная асимметричная локально модифицированная.

Присутствие в обозначении буквы А указывает на класс асимметричных структур, а букв G и L – на вид глобальной или локальной модификации.

Для лучшего понимания логики построения асимметричных структур и их отличительных признаков, перед их описанием приводятся примеры

прототипов с симметричными элементарными модулями.

Назовем исходное положение структуры разверткой, структуру на конечном этапе трансформирования – складкой.

### Синтез четырехлучевых асимметричных структур

Опыт показывает, что наиболее простой прием получения асимметричной складчатой структуры (АСС) – введение изломов по пилообразным линиям на каноническом прототипе. Рассмотрим эту процедуру на примере канонической структуры Z-гофр (рис. 1,а).

Как видно из рис. 1,а, канонический Z-гофр имеет одинаковые грани в виде параллелограммов. Пилообразные линии 1 на развертке являются прямыми, а зигзагообразные линии 2 – эквидистантными. Цифры в кружочках обозначают характерные этапы трансформирования: ① – развертка; ② – трансформирование; ③ – окончательно сжатый блок (складка).

При трансформировании пилообразные линии всегда находятся в вертикальных плоскостях. На конечном этапе трансформирования складчатая структура преобразуется в плотно сжатый пакет (складку) с вертикальным расположением граней.

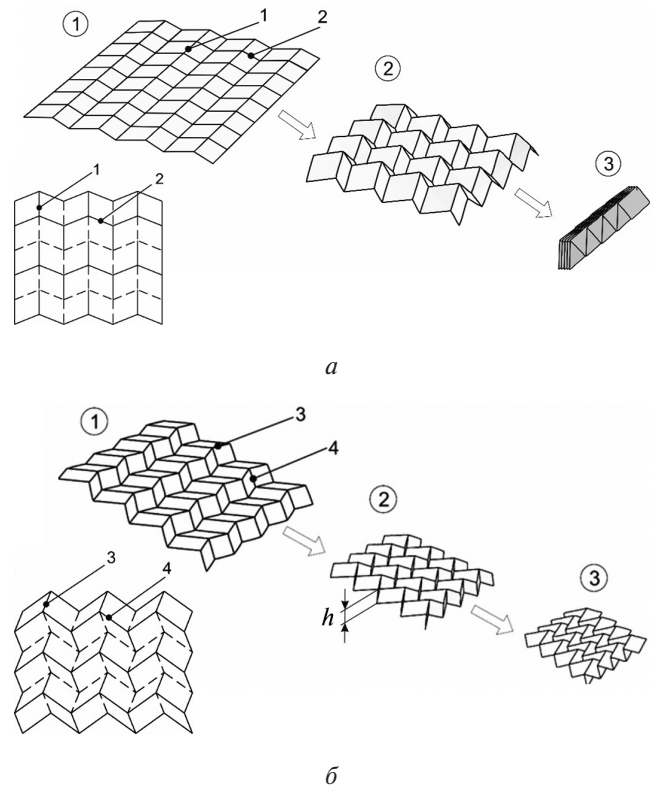


Рис. 1. Формирование рельефа четырехлучевых структур: а – канонического Z-гофра; б – асимметричного Z-A-гофра

Для того чтобы получить асимметричную структуру (рис. 1,б), проекцию прямой линии 1 на развертке (рис. 1,а) надо преобразовать в ломаную линию 3 (рис. 1,б). При этом зигзагообразные линии 2 сохраняют свою геометрию и переходят в состояние 4. В результате в асимметричной структуре все четыре грани в ЭМ имеют разные размеры.

Трансформирование такой структуры будет отличаться от трансформирования прототипа (рис. 1,б). На начальном этапе высота рельефа  $h$  будет увеличиваться, а с какого-то момента уменьшаться. В конечном итоге образуется плотно собранный пакет из горизонтальных граней, расположенных в одной плоскости, где  $h = 0$ .

По аналогии можно создать реверсивную складчатую структуру типа V-гофр. На рис. 2,а показана каноническая структура [20]. На развертке пилообразные линии являются прямыми. Полностью сжатый пакет (складка) образуется вертикально расположенными гранями. Как и в предыдущем случае, асимметричная структура создается путем введения на развертке изломов в узлах пилообразных линий (рис. 2,б). Складка такой структуры – плоская с гранями, расположенными в горизонтальной плоскости.

**Модифицирование асимметричных рядовых структур**

В работе [12] предложены приемы глобального и локального модифицирования.

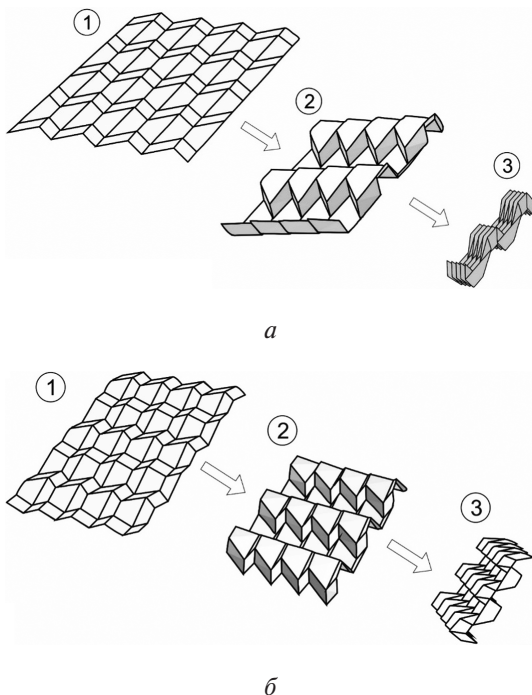


Рис. 2. Реверсивные складчатые структуры типа V-гофр: а – канонический V-гофр; б – асимметричный (V-A-гофр)

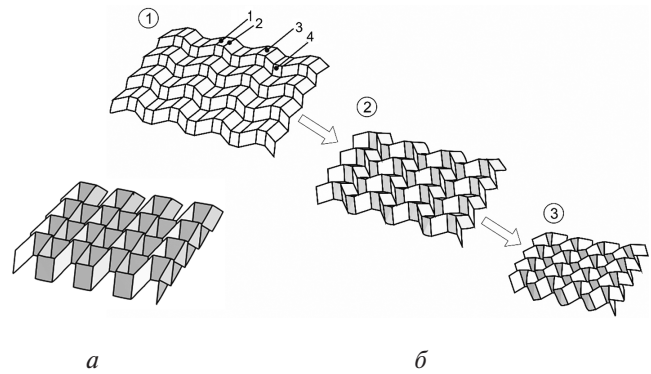


Рис. 3. Глобальная модификация структур типа Z-гофр: а – каноническая структура; б – асимметричная модифицированная на базе Z-гофра (Z-A-G-гофр)

**Глобальное модифицирование** является эффективным методом преобразования рельефа складчатых конструкций для достижения необходимых функциональных характеристик. Данный прием синтеза новых структур заключается в разведении пилообразных линий на две параллельные линии. Для канонического Z-гофра это приводит к формированию между параллелограммными гранями равновеликих прямоугольников. В результате гофрированная структура преобразуется в ячеистую (рис. 3,а).

Такая процедура может быть применена и к асимметричному Z-гофру. На разметке пилообразные линии с изломами также раздваиваются на эквидистантные линии 1 и 2. Между гранями вписываются два типа параллелограммов разной величины 3 и 4 (рис. 3,б). После трансформирования, в конечном сжатом состоянии формируется ячеистая конструкция, у которой ячейки имеют наклон в одну сторону.

Пользуясь такой же методикой, можно синтезировать структуру типа V-гофр (рис. 4). Она также будет ячеистой с наклоном граней в одну сторону. Как и в прототипе, в верхней и нижней плоскостях эта структура будет иметь грани. Грани в огибающих поверхностях полезны тем, что увеличивают площадь соединения заполнителя с обшивкой.

**Локальное модифицирование** [21] осуществляется следующим преобразованием разметки Z-A-гофра (рис. 5). Выделяются нечетные и четные зигзагообразные линии 1 и 2 соответственно; на четных линиях узловая точка раздвигается с образованием отрезка 3; затем концы отрезка соединяются прямыми линиями с узловыми точками четных зигзагообразных линий (рис. 5,б). На рис. 5 показана схема модифицирования путем размещения треугольников на разметке асимметричного Z-гофра. Складка такой структуры представляет собой конструкцию с ячейками клиновидной формы. Огибающие по-

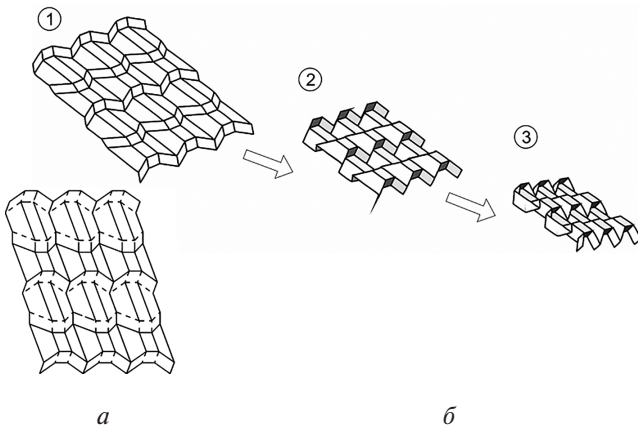


Рис. 4. Модифицированные V-гофры: *a* – разметка модифицированного асимметричного V-гофра; *б* – трансформирование модифицированного асимметричного V-гофра

верхности блока имеют криволинейную форму (рис. 5, *в*).

Концепция построения асимметричных структур может быть реализована для создания оригинального заполнителя в виде двухъярусной конструкции. Каждый ярус представляет собой складчатую структуру какого-либо типа, например из семейства Z-гофров. При этом ярусы изготовлены из цельной листовой заготовки и не имеют разрезов и стыков. На рис. 6, *a* схематично показано сечение такой конструкции, которая представляет собой как бы наложение друг на друга двух слоев Z-A-гофров (рис. 6, *б*).

На разметке цифрами 1 и 2 показаны зоны заготовки, которые образуют первый и второй слой.

Синтез двойной асимметричной структуры продемонстрирован на рис. 6. Базовой архитектурой является асимметричный Z-гофр. При трансформировании заготовки с подобной разметкой, свертка оказывается состоящей как бы из двух ярусов, эквивалентных двум Z-гофрам. На

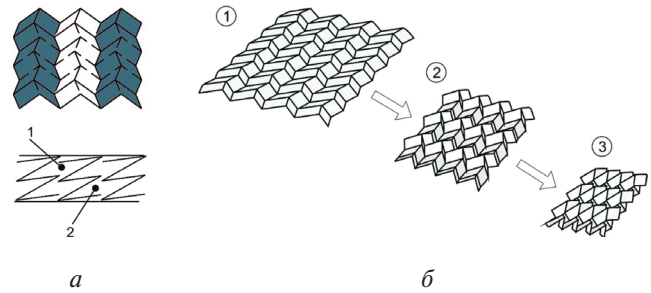


Рис. 6. Сдвоенная структура: *a* – схема слоев в сечении; *б* – этапы трансформирования

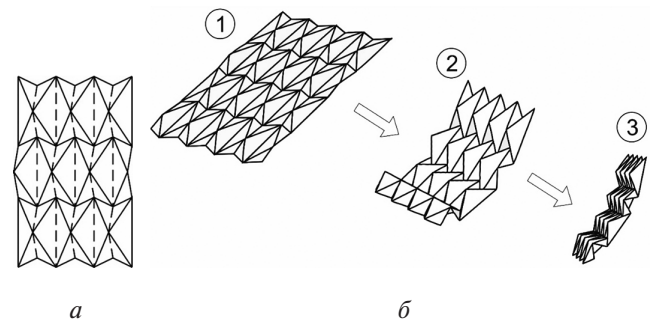


Рис. 7. Асимметричная шестилучевая структура: *a* – разметка, *б* – этапы трансформирования

конечном этапе трансформирования все ее грани укладываются на плоскую поверхность.

### Асимметричные шестилучевые структуры

Компьютерным моделированием и складыванием бумаги было установлено, что канонические шестилучевые структуры [11] также могут принимать асимметричные формы.

С целью экономии места рассмотрим только один из шести вариантов складчатых шестилучевых структур.

На рис. 7, *a* (слева) представлена разметка канонической шестилучевой структуры, затем преоб-

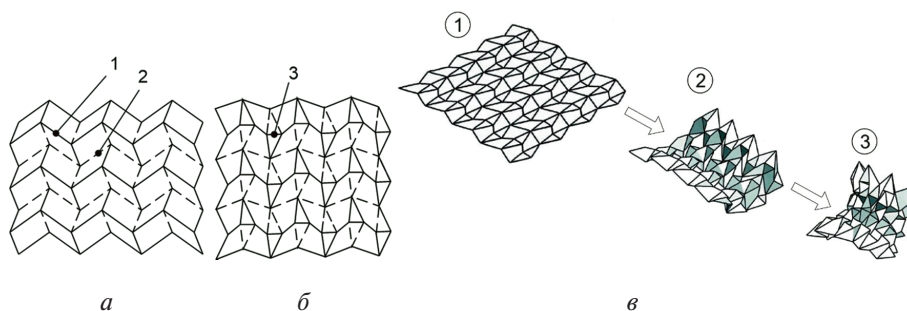


Рис. 5. Локальное модифицирование: *a, б* – разметки асимметричных структур Z-A-гофра и его локальной модификации; *в* – свертка локально модифицированной структуры

разованная разметка асимметричной структуры и далее — ее трансформирование до окончательного этапа.

Как показали исследования, поведение шестилучевых структур при трансформировании аналогично поведению четырехлучевых. Полностью сжатый пакет образуется плотно прилегающими гранями и укладывается на цилиндрическую поверхность по аналогии с канонической структурой.

**Асимметричные структуры в полярной системе координат**

Опытным путем установлено, что асимметричные структуры могут существовать и в полярной системе координат. На рис. 8,а показаны развертка и рельефная конструкция структуры типа Z-гофр, выполненной в полярной системе координат. Этот рельеф взят в качестве прототипа для асимметричной структуры, показанной на рис. 8,б. Для ее построения, как и ранее, необходимо ввести ломаные пилообразные линии — в данном случае лучи.

У полярной асимметричной структуры наблюдаются интересные отличия от канонического прототипа: асимметричная структура в процессе трансформирования имеет наклон граней в одну сторону, на конечном этапе все грани располагаются в горизонтальной плоскости. Эта характеристика позволяет получить конструкцию в виде замкнутого кольца (рис. 8,б). В отличие от нее, каноническая полярная структура может существовать только в виде сектора, так как в конце трансформирования

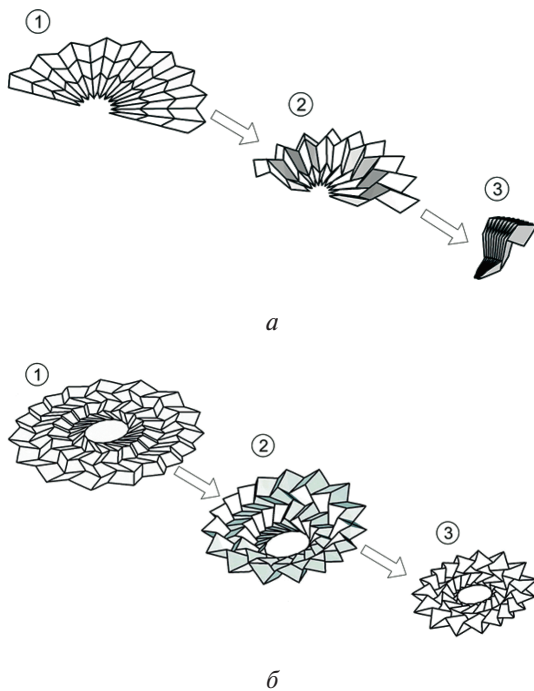


Рис.8. Структуры типа Z-гофр в полярной системе координат: а – каноническая; б – асимметричная

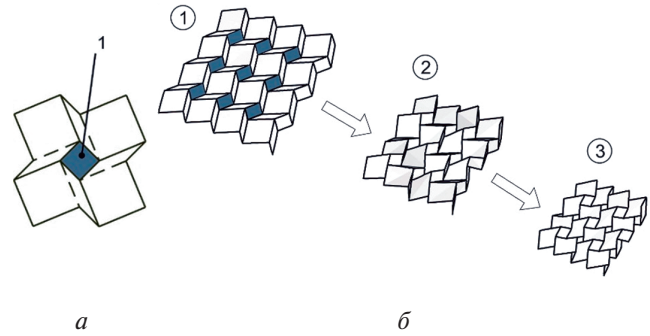


Рис. 9. Полосные квадратоструктуры: а – элементарный модуль; б – асимметричная структура

она образует плотно сжатый пакет с вертикально расположенными гранями (рис. 8,б).

**Полосные асимметричные структуры**

В данной работе была предпринята попытка получения полосных структур с асимметричным строением. Полосные структуры [13], в отличие от рядовых, имеют степень осевой симметрии элементарного модуля  $S = 3, 4, 6$ . В соответствии с этим группы структур получили названия: трио-, quadro- и гексаструктуры. В данной работе исследовалась одна из quadroструктур [13]. Ее исходный канонический вариант показан на рис. 9,а. Цифрой 1 обозначена грань, находящаяся в центре quadroструктуры элементарного модуля quadroструктуры.

Каноническая структура по определению имеет одинаковые геометрические параметры в двух ортогональных направлениях. Как видно из рисунка, асимметричная структура получается преобразованием на разметке прямых линий в ломаные.

Асимметричная структура сохраняет характеристики осевой симметрии соответствующие ее каноническому прототипу. Квадратные грани на всех этапах трансформирования располагаются на огибающих поверхностях. На конечном этапе структура принимает плоскую форму.

На рис. 10 представлены фотографии некоторых асимметричных структур, выполненных из картона высокой плотности.

**Области применения**

Потенциал применения асимметричных складчатых структур определяется, в первую очередь, их фасеточной формой со сложным рельефом и малым отношением массы к занимаемому объему ( $кг/м^3$ ). Среди перспективных направлений применения можно назвать: звукопоглощение, уменьшение эффективной поверхности рассеивания радиосигнала, энергопоглощение и повышение ударостойкости сэндвич-панелей.

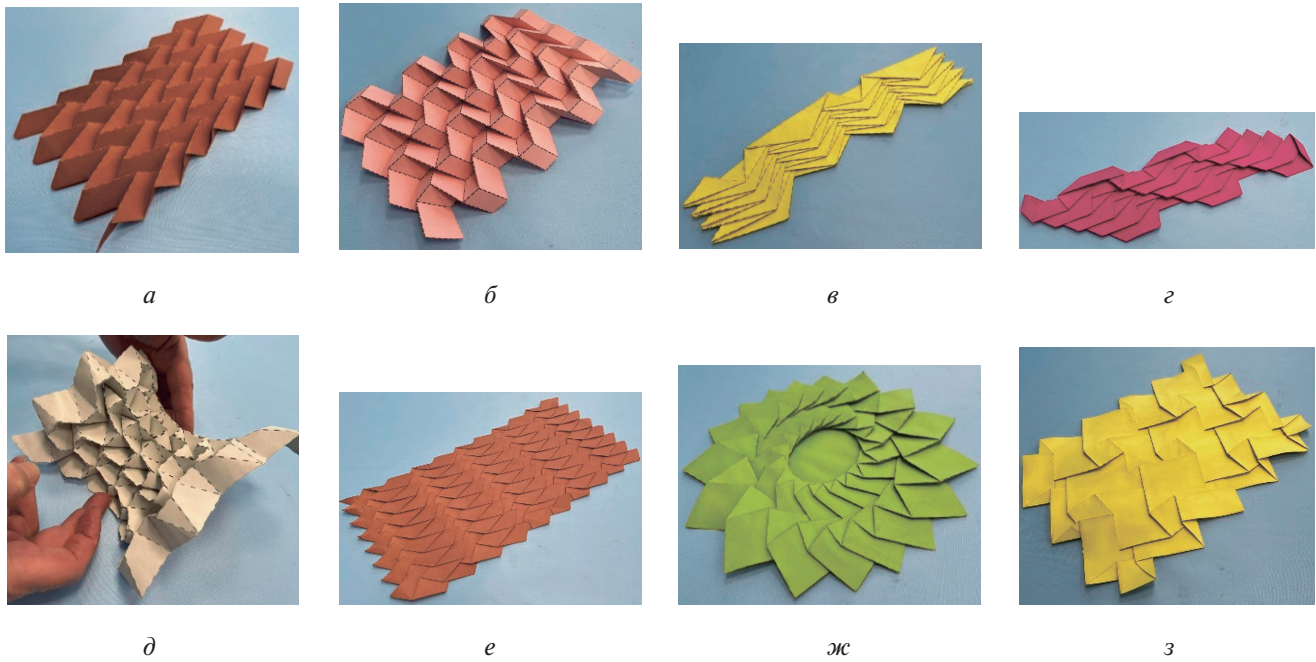


Рис. 10. Макеты асимметричных конструкций: а – Z–А–гофр; б – Z–А–G–гофр; в – S–А–гофр; z – V–А–гофр; д – Z–А–L–гофр, е – Z2–А–гофр, ж – Z–P–Z–гофр, z – KV–А–структура

Складчатые наполнители в каноническом исполнении исследовались отечественными и зарубежными специалистами на предмет звукопоглощения, энергопоглощения и ударостойкости [22–25].

Известна работа, в которой для увеличения ударостойкости в интегральные панели из полимерных композиционных материалов добавляли слой из полиэтиленпластика и сотового наполнителя [26, 27]. Как путем расчета, так и экспериментально были определены высокие функциональные свойства складчатых наполнителей, включая прочность на сжатие и особенно на сдвиг [28, 29]. При этом исследовались панели с каноническим наполнителем в виде Z-гофра. Можно прогнозировать более эффективное поглощение энергии удара асимметричными структурами. Здесь могут быть уместны следующие соображения: в панели с каноническим Z-гофром (рис. 11,а) энергия поглощается только на начальном этапе за счет разрушения граней.

В наполнителях с асимметричной структурой к этому эффекту добавляется упругая работа запол-

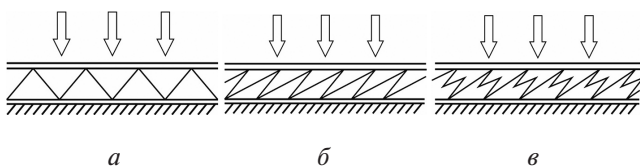


Рис.11. Схема энергопоглощающих панелей с разной структурой наполнителя: А–Z-гофр: а – Z-гофр; б – Z–А–гофр; в – двухъярусный Z–А–гофр

нителя как пружины, особенно если рассматривать панель с двухслойной структурой (рис. 11, в). Следует отметить также, что асимметричный наполнитель имеет свойство трансформироваться до плотно сжатого горизонтального пакета. Факт разрушения его граней не очевиден. Возможно, в значительной степени поглощение энергии будет определяться напряжениями в зоне соединения наполнителя с обшивкой. Физику этого процесса еще следует установить. Интересно, что при полном сжатии панели в вертикальном направлении и разрушении верхней обшивки, асимметричный наполнитель при определенных условиях может сохранить целостность, приобретая форму плоской складки.

### Технологические схемы изготовления

Технология изготовления конструкций с асимметричной структурой рельефа будет зависеть от исходного состояния материала заготовки. Например, для изготовления конструкции из полимерного композита необходимо использовать заготовку в виде препрега. Препрег характеризуется практически отсутствием изгибной жесткости, но не поддается вытяжке, т. е. плохо драпируется. Для получения необходимой геометрии и механических свойств необходимо использовать формообразующую оснастку – носитель формы.

При исходной технологичности препрега, для изготовления асимметричных структур наиболее целесообразно использовать прием синхронного формообразования [30]. Для его реализации можно применять оснастку в виде трансформируемых ма-

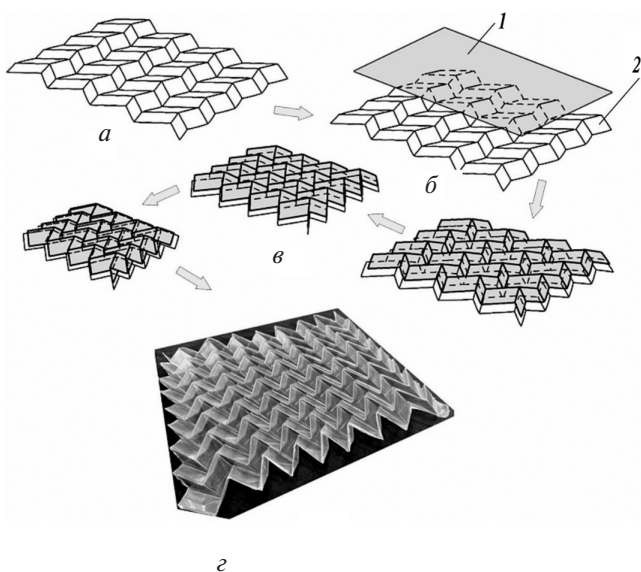


Рис. 12. Процесс изготовления асимметричной складчатой структуры синхронным методом складывания: *а* – трансформируемая матрица; *б* – укладка препрега; *в* – этапы складывания; *г* – деталь из стеклопластика

триц (ТМ) [20], они в модифицированном варианте показаны на рис. 12,а.

Матрица представляет собой многозвенный механизм из пластин, соединенных между собой шарнирами. Грани по размерам совпадают с гранями асимметричной структуры. ТМ имеет три рабочих состояния: плоское (перед укладкой препрега), рельефное на этапе трансформирования, рельефное на конечной стадии.

Процесс изготовления включает этапы: установку препрега 1 на трансформируемую матрицу 2 (рис. 12,б), выведение технологического пакета в рельефное состояние путем его трансформирования (рис. 12,в) и съем отвержденной детали с ТМ. На рис. 12,г показана готовая деталь.

Складчатая конструкция может быть изготовлена из тонких твердолистовых материалов – бумаги, картона, металлов.

При формообразовании из твердолистовых материалов целесообразно перед формообразованием ослабить материал по линиям сгиба для формирования четко обозначенного рельефа. Сделать это можно, например, с помощью просечки пунктирно расположенных отверстий, используя лазер.

На рис. 13 показаны детали со структурой модифицированного Z–A–G-гофра, изготовленные из ленты нержавеющей стали 9Х18Н10Т толщиной 0,15 мм. На детали слева (рис. 13) видны следы лазерной разметки.

## Выводы

Предложены новый класс складчатых конструкций с асимметричным строением элементарного модуля и методика синтеза их структуры. Характерным геометрическим признаком таких структур является наклон граней в одну сторону на заключительном этапе трансформирования. В конечной фазе трансформирования асимметричные структуры принимают плоскую форму складки, а при модифицировании – ячеистую геометрию с наклоном ячеек в одну сторону.

Предложенный вариант синтеза асимметричных структур предусматривает целенаправленное введение на разметке ломаных пилообразных линий. Показано, что с помощью таких приемов можно синтезировать структуры: рядовые азимутальные четырех- и шестилучевые, включая их глобальные и локальные модификации; реверсивные четырех- и шестилучевые; кольцевые структуры в полярной системе координат, полюсные структуры с четвертой степенью осевой симметрии, двухслойные четырехлучевые структуры.

Ряд полученных асимметричных структур обладает оригинальными, уникальными конструктивными возможностями. Например, в отличие от канонического Z-гофра можно создать двух- или трехъярусный наполнитель, состоящий из двух или трех слоев Z–A-гофра. В полярной системе координат появляется возможность создания кольцевой замкнутой детали с лучевым расположением структурных элементов. Подобные структуры в каноническом варианте существовать не могут.

Компьютерное моделирование и изготовление макетов из листового материала подтвердили работоспособность предлагаемой методики. Асимметричные складчатые конструкции могут эффективно применяться в энерго- и звукопогло-

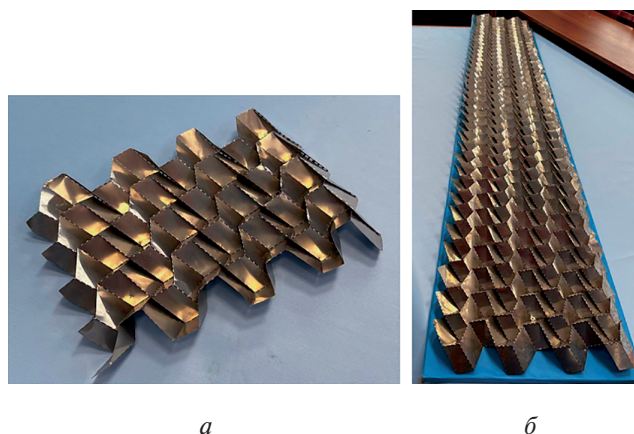


Рис. 13. Z–A–G-гофр из нержавеющей стали с просечкой по линиям сгиба



щающих конструкциях/изделиях. Многоярусность асимметричного заполнителя сэндвич-панели позволяет заранее программировать ее энергопоглощающее функционирование. Кольцевые асимметричные детали могут быть использованы как элементы турбины или фильтров.

Предложена технология изготовления рельефных конструкций на основе асимметричных структур. Рассмотрена технологическая схема с использованием трансформируемых матриц, которые позволяют реализовать процесс синхронного складывания.

В качестве материалов можно использовать композиты с терморезактивной или термопластичной матрицей; твердолиственные материалы, включая металлы и синтетические бумаги. Применение лазерной разметки в виде ослабления по линиям сгиба позволяет добиться высокой точности геометрических параметров складчатого изделия. С целью проверки работоспособности технологии изготовлены рельефные детали гофрового и ячеистого типа из стеклопластика и стали.

#### Список источников

1. *Miura K.* Method of packaging and deployment of large membranes in space. Technical Report 618, Institute of Space and Astronautical Science (Tokyo, Japan), 1985.
2. *Zeng H.H., Xu Q.H.* Geometry design and study of folded core structure // *Journal of Neijiang Normal University*. 2009. Vol. 30. No. 3: 84. (In Chinese).
3. *Zhou X., Zang S., Wang H., You Z.* Geometric design and mechanical properties of cylindrical foldcore sandwich structures // *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 89, pp. 116-130. DOI: 10.1016/j.tws.2014.12.017
4. *Belcastro S.-M., Hill T.C.* Modelling the folding of paper into three dimensions using affine transformations // *Linear Algebra and its Applications*. 2002. Vol. 348. Nos. 1-3, pp. 273-282. DOI: 10.1016/S0024-3795(01)00608-5
5. *Wu W., You Z.* Modelling rigid origami with quaternions and dual quaternions // *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2010. Vol. 466. No. 2119, pp. 2155-2174. DOI: 10.1098/rspa.2009.0625
6. *Ma J., Hou D., Chen Y., You Z.* Quasi-static axial crushing of thin-walled tubes with a kite-shape rigid origami pattern: numerical simulation // *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 100, pp. 38-47. DOI: 10.1016/j.tws.2015.11.023
7. *Tachi T.* Geometric considerations for the design of rigid origami structures // *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium (08-12 November 2010; Shanghai, China)*.
8. *Gattas J.M., You Z.* Geometric assembly of rigid-foldable morphing sandwich structures // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 94, pp. 149-159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.019

9. *Tachi T.* Freeform variations of origami // *Journal for Geometry and Graphics*. 2010. Vol. 14. No. 2, pp. 203-215.
10. *Tachi T.* Designing freeform origami tessellations by generalizing Resch's patterns // *Journal of Mechanical Design*. 2013. Vol. 135. No. 11: 111006. DOI: 10.1115/DETC2013-12326
11. *Wang Z., Zhou H., Khaliulin V.I., Shabalov A.V.* Six-ray folded configurations as the geometric basis of thin-walled elements in engineering structures // *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 130, pp. 435-448. DOI: 10.1016/j.tws.2018.05.022
12. *Халиулин В.И.* О методе синтеза структуры складчатых заполнителей многослойных панелей // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2005. № 1. С. 7-12.
13. *Khaliulin V., Wang Z., Gershtein E.* Development of Composite Cellular Cores for Sandwich Panels Based on Folded Polar Quadra-Structures // *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*. 2016. Vol. 33. No. 5, pp. 519-528.
14. *Шабалин Л.П.* Метод расчета и оптимизация конструкции трехслойной панели с заполнителем в виде периодических складчатых структур: Дисс. ... канд. техн. наук. — Казань, 2013. — 119 с.
15. *Алексеев К.А., Закиров И.М.* Складчатые структуры. Геометрическое моделирование и автоматизированное проектирование. — Казань: Фэн, 2010. — 210 с.
16. *Паймушин В.Н., Закиров И.И., Карников Ю.А.* Теоретико-экспериментальный метод определения механических характеристик заполнителя складчатой структуры в виде Z-гофра (сдвиг заполнителя в плоскостях поперечных сечений) // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2013. № 3. С. 19-26.
17. *Zakirov I., Nikitin A., Mudra Chr. et al.* Folded structures: performance, technology and production // *27th International SAMPE Europe Conference of the Society for the Advancement of Materials and Process Engineering (27-29 March 2006; Paris)*, pp. 234-239.
18. *Закиров И.М., Алексеев К.А.* Проектирование складчатой конструкции клиновидной формы // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 5. С. 10-16.
19. *Халиулин В.И.* О классификации регулярных рядовых складчатых структур // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2003. № 2. С. 7-12.
20. *Халиулин В.И., Раздайбедин А.А., Меньяшкин Д.Г.* Модель трансформирования заготовки в заполнитель сэндвич-панели со структурой V-гофр // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2006. № 1. С. 52-56.
21. *Раздайбедин А.А., Халиулин В.И.* Определение технологических параметров формообразования складчатого заполнителя с огибающей криволинейной поверхностью // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2015. № 1. С. 69-75.
22. *Heimbs S.* Foldcore Sandwich Structures and Their Impact Behavior: An Overview // In *Abrate S., Castanié B., Rajapakse Y.D.S.* Dynamic Failure of Composite and

- Sandwich Structures. - Springer Netherlands, 2013, pp. 491–544. DOI: 10.1007/978-94-007-5329-7\_11
23. Heimbs S., Kilchert S., Fischer S. et al. Sandwich structures with folded core: mechanical modeling and impact simulations // 30th SAMPE Europe International Jubilee Conference (SEICO-09; Paris, France), pp. 324–331.
  24. Халиулин В.И., Меняшкин Д.Г., Эндрес Г. Исследование акустических свойств сэндвич-панелей со складчатым наполнителем // Авиакосмические технологии и оборудование: Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции (05–16 августа 2006; Казань). – Казань: Изд-во КГТУ, 2006. С. 44–45.-
  25. Беззаметнов О.Н., Митряйкин В.И., Халиулин В.И. Испытания низкоскоростным ударом различных композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 216–229. DOI: 10.34759/vst-2019-4-216-229
  26. Беззаметнов О.Н., Митряйкин В.И., Халиулин В.И., Марковцев В.А., Шаныгин А.Н. Оценка влияния ударных повреждений на прочность интегральных панелей из полимерных композиционных материалов при сжатии // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 78–91. DOI: 10.34759/vst-2021-4-78-91
  27. Беззаметнов О.Н., Митряйкин В.И., Халиулин В.И., Кротова Е.В. Исследование стойкости к ударным воздействиям многослойных композиционных конструкций с сотовым наполнителем // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 111–125. DOI: 10.34759/vst-2020-3-111-125
  28. Fischer S. Realistic Fe simulation of foldcore sandwich structures // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2015. Vol. 10. No. 14. DOI: 10.1186/s40712-015-0041-z
  29. Fischer S., Heimbs S., Kilchert S. et al. Sandwich structures with folded core: manufacturing and mechanical behavior // 30th SAMPE Europe International Jubilee Conference (SEICO-09; Paris, France).
  30. Халиулин В.И., Инкин В.А. Расчет технологических параметров при формообразовании Z-гофра из композиционных материалов методом складывания // Известия вузов. Авиационная техника. 2012. № 4. С. 66–70.

## References

1. Miura K. *Method of packaging and deployment of large membranes in space*. Technical Report 618, Institute of Space and Astronautical Science (Tokyo, Japan), 1985.
2. Zeng H.H., Xu Q.H. Geometry design and study of folded core structure. *Journal of Neijiang Normal University*, 2009, vol. 30, no. 3: 84. (In Chinese).
3. Zhou X., Zang S., Wang H., You Z. Geometric design and mechanical properties of cylindrical foldcore sandwich structures. *Thin-Walled Structures*, 2015, vol. 89, pp. 116–130. DOI: 10.1016/j.tws.2014.12.017
4. Belcastro S.-M., Hill T.C. Modelling the folding of paper into three dimensions using affine transformations. *Linear Algebra and its Applications*, 2002, vol. 348, nos. 1-3, pp. 273–282. DOI: 10.1016/S0024-3795(01)00608-5
5. Wu W., You Z. Modelling rigid origami with quaternions and dual quaternions. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, vol. 466, no. 2119, pp. 2155–2174. DOI: 10.1098/rspa.2009.0625
6. Ma J., Hou D., Chen Y., You Z. Quasi-static axial crushing of thin-walled tubes with a kite-shape rigid origami pattern: numerical simulation. *Thin-Walled Structures*, 2016, vol. 100, pp. 38–47. DOI: 10.1016/j.tws.2015.11.023
7. Tachi T. Geometric considerations for the design of rigid origami structures. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium (08–12 November 2010; Shanghai, China)*.
8. Gattas J.M., You Z. Geometric assembly of rigid-foldable morphing sandwich structures. *Engineering Structures*, 2015, vol. 94, pp. 149–159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.019
9. Tachi T. Freeform variations of origami. *Journal for Geometry and Graphics*, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 203–215.
10. Tachi T. Designing freeform origami tessellations by generalizing Resch’s patterns. *Journal of Mechanical Design*, 2013, vol. 135, no. 11: 111006. DOI: 10.1115/DETC2013-12326
11. Wang Z., Zhou H., Khaliulin V.I., Shabalov A.V. Six-ray folded configurations as the geometric basis of thin-walled elements in engineering structures. *Thin-Walled Structures*, 2018, vol. 130, pp. 435–448. DOI: 10.1016/j.tws.2018.05.022
12. Khaliulin V.I. *Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika*, 2005, no. 1, pp. 7–12.
13. Khaliulin V., Wang Z., Gershtein E. Development of Composite Cellular Cores for Sandwich Panels Based on Folded Polar Quadra-Structures. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2016, vol. 33, no. 5, pp. 519–528.
14. Shabalin L.P. *Metod rascheta i optimizatsiya konstruksii trekhslonoi paneli s zapolnitelem v vide periodicheskikh skladchatykh struktur* (Calculation method and optimization of the design of a three-layer panel with a filler in the form of periodic folded structures). PhD thesis. Kazan, KTU im. A.N. Tupoleva, 2013, 119 p.
15. Alekseev K.A., Zakirov I.M. *Skladchatye struktury. Geometricheskoe modelirovanie i avtomatizirovannoe proektirovanie* (Folded structures. Mathematical modeling and computer-aided design), Kazan, Fən, 2010, 210 p.
16. Paimushin V.N., Zakirov I.I., Karpikov Yu.A. *Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 19–26.
17. Zakirov I., Nikitin A., Mudra Chr. et al. Folded structures: performance, technology and production. *27th International SAMPE Europe Conference of the Society for the Advancement of Materials and Process Engineering (27–29 March 2006; Paris)*, pp. 234–239.

18. Zakirov I.M., Alekseev K.A. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, pp. 10-16.
19. Khaliulin V.I. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2003, no. 2, pp. 7-12.
20. Khaliulin V.I., Razdaibedin A.A., Menyashkin D.G. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2006, no. 1, pp. 52-56.
21. Razdaibedin A.A., Khaliulin V.I. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 69-75.
22. Heimbs S. Foldcore Sandwich Structures and Their Impact Behavior: An Overview. In *Abrate S., Castanié B., Rajapakse Y.D.S. Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures*. Springer Netherlands, 2013, pp. 491–544. DOI: 10.1007/978-94-007-5329-7\_11
23. Heimbs S., Kilchert S., Fischer S. et al. Sandwich structures with folded core: mechanical modeling and impact simulations. *30th SAMPE Europe International Jubilee Conference (SEICO-09; Paris, France)*, pp. 324-331.
24. Khaliulin V.I., Menyashkin D.G., Endres G. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviakosmicheskie tekhnologii i oborudovanie" (05-16 August 2006; Kazan)*. Kazan, KGTU, 2006, pp. 44-45.
25. Bezzametnov O.N., Mitryaikin V.I., Khaliulin V.I. Low-speed impact testing of various composites. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 216-229. DOI: 10.34759/vst-2019-4-216-229.
26. Bezzametnov O.N., Mitryaikin V.I., Khaliulin V.I., Markovtsev V.A., Shanygin A.N. Impact damages effect assessment on compressive strength of integral panels from polymer composite materials. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 78-91. DOI: 10.34759/vst-2021-4-78-91.
27. Bezzametnov O.N., Mitryaikin V.I., Khaliulin V.I., Krotova E.V. Developing technique for impact action resistance determining of the aircraft parts from composites with honeycomb filler. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 111-125. DOI: 10.34759/vst-2020-3-111-125
28. Fischer S. Realistic FEM simulation of foldcore sandwich structures. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2015, vol. 10, no. 14. DOI: 10.1186/s40712-015-0041-z
29. Fischer S., Heimbs S., Kilchert S. et al. Sandwich structures with folded core: manufacturing and mechanical behavior. *30th SAMPE Europe International Jubilee Conference (SEICO-09; Paris, France)*.
30. Khaliulin V.I., Inkin V.A. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 66-70.

Статья поступила в редакцию 24.03.2024; одобрена после рецензирования 10.05.2024; принята к публикации 12.05.2024.  
The article was submitted on 24.03.2024; approved after reviewing on 10.05.2024; accepted for publication on 12.05.2024.