

ПРОЦЕСС ОППОЗИТНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФНЫХ ПЛАСТИН СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ

© 2019

- В. И. Халиулин** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов;
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева;
pla.kai@mail.ru
- Р. Ш. Гимадиев** доктор технических наук, профессор кафедры инженерной кибернетики;
Казанский государственный энергетический университет;
gimadiev@mail.ru
- В. А. Марковцев** доктор технических наук, генеральный директор;
Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства;
info@ulniat.ru
- Н. В. Левшонков** доцент кафедры конструкций и проектирования летательных аппаратов;
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева;
nvlevshonkov@kai.ru

Рассматривается технологическая схема, позволяющая разделить формообразование складчатых конструкций на несколько этапов. Формирование рельефа достигается выворачиванием отдельных участков трапециевидного гофра до придания им зеркально-отражённой формы. Процесс характеризуется узкими зонами изгибных деформаций вдоль линий разметки структуры и депланацией граней без вытяжки. Приводятся схемы формообразующего узла и соотношения для расчёта геометрических и технологических параметров.

Складчатые структуры; процессы формообразования; технологическая схема; циклическое двойное гофрирование.

Цитирование: Халиулин В.И., Гимадиев Р.Ш., Марковцев В.А., Левшонков Н.В. Процесс оппозитного формообразования рельефных пластин складчатой структуры // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 4. С. 169-182. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-169-182

Введение

Строгий подход к формированию рельефных поверхностей складчатой структуры [1] предполагает изгиб (складывание) по всем линиям воображаемой разметки на заготовке одновременно. При этом на всех этапах процесса грани сохраняют плоскую форму [2].

Для подавляющего большинства складчатых структур (СС) их трансформирование из плоского листа в объёмную конструкцию имеет сложную кинематику. Соответственно, зоны деформирования вдоль отрезков разметки постоянно меняют своё положение в пространстве, каждая – по своему закону [2 – 5]. В связи с этим создание оборудования, обеспечивающего подвод следящих усилий одновременно к каждой зоне, представляет собой сложную техническую задачу [6].

К настоящему времени для твёрдолистных материалов схема одновременного складывания применяется для наиболее простой СС – зетгофр [7]. Его архитектура образована одинаковыми гранями. Для более сложных структур остаётся актуальной проблема разделения процесса формообразования на несколько этапов. Имеется в виду, что на каждом этапе будет осуществляться складывание по отдельным группам рёбер до образования собственно рельефной детали с требуемой архитектурой. Такой подход

позволяет достичь более высокого качества рельефа и упростить технологическое оборудование.

В работе показано, что если допустить в определённых пределах деформацию граней (потерю плоской формы без растяжения), то для некоторых рядовых структур можно реализовать технологическую схему поэтапного формирования рельефа.

Процесс формообразования

Рассмотрим процесс на примере складчатой конструкции, имеющей по классификации [8] рядовую четырёхлучевую азимутальную модифицированную структуру. Сокращённо обозначим её М-гофр (рис. 1, а). Данная архитектура является модификацией структуры «Миура-ори» [6] зигзагообразного гофра и формируется из последнего путём раздвоения пилообразных линий, то есть размещением между гранями Z-гофра прямоугольных элементов [9].

Таким образом, М-гофр состоит из плоских граней в виде параллелограммов 1 и прямоугольников 5, соединённых между собой по всем сторонам с образованием зигзагообразных линий выступов 2, впадин 3 и пилообразных линий 4. Рельефная поверхность задаётся конструктивными параметрами: H – высота; $2S$ – шаг зигзагообразных линий; $2L$ – шаг пилообразных линий; V – амплитуда зигзагообразных линий; B – расстояние между пилообразными линиями. Объёмная конструкция получается в результате изгибания листовой заготовки по разметке, изображённой на рис. 1, б.

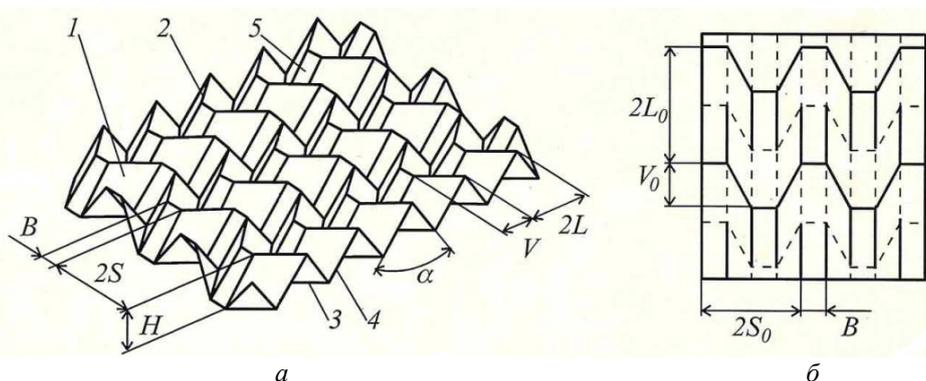


Рис. 1. Рядовая модифицированная азимутальная структура: а – структура; б – развёртка

Выпуклые углы образуются в результате изгиба по сплошным линиям, а вогнутые – по пунктирным линиям. Разметка задаётся технологическими параметрами: $2S_0$ – шаг зигзагообразных линий на разметке; $2L_0$ – шаг пилообразных линий на разметке; V_0 – амплитуда зигзагообразных линий на разметке.

Связь между технологическими (разметка) и конструктивными параметрами М-гофра определяется соотношениями:

$$S_0 = \frac{L(S - B)}{\sqrt{H^2 + L^2}} + B; \quad L_0 = \sqrt{H^2 + L^2}; \quad V_0 = \frac{VL}{\sqrt{H^2 + L^2}}.$$

Для изготовления М-гофра предлагается технологическая схема, предусматривающая разделение процесса формообразования на два этапа (рис. 2).

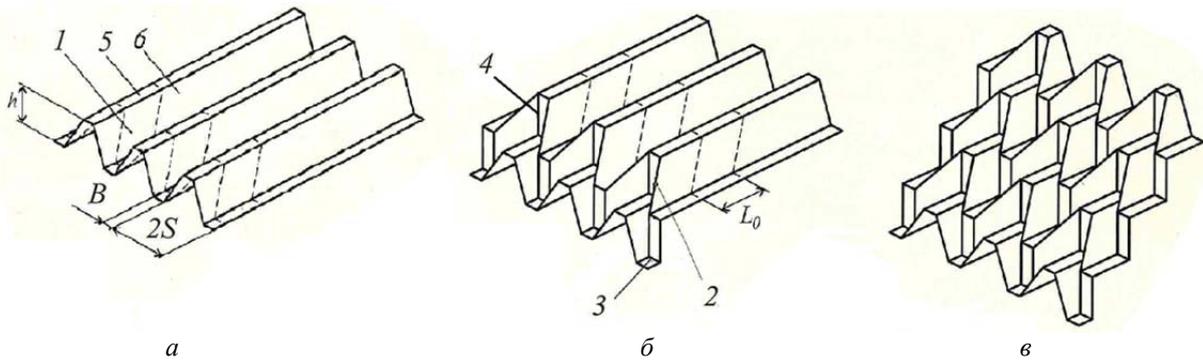


Рис. 2. Последовательность операций при изготовлении М-гофра:
 а – исходный линейный гофр; б – этап оппозитного формования; в – готовая деталь

На первом этапе любым из известных методов изготавливается обычный трапециевидный гофр с линейной образующей (рис. 2, а). Его сечение должно совпадать по форме с сечением готовой конструкции в плоскости, перпендикулярной пилообразным линиям.

На втором этапе производится формоизменение гофра в поперечном направлении (рис. 2, б). По линиям, обозначенным на линейном гофре пунктиром (рис. 2, а), осуществляется изгиб до образования зигзагообразных линий выступов 2 и впадин 3 соответственно (рис. 2, б). Многократное повторение такой операции с шагом L_0 по длине линейного гофра позволяет получить деталь, имеющую структуру М-гофра (рис. 2, в).

Схема формирования рельефа на втором этапе показана на рис. 3. Участок линейного гофра длиной L_0 зажимается в сечениях а – а и б – б между деталями оборудования, рабочие поверхности которых соответствуют форме исходного гофра. После этого один из зажатых концов гофра 7 перемещается в вертикальной плоскости, параллельной направлению подачи заготовки таким образом, что элементы участка длиной L_0 в виде прямоугольников 5 поворачиваются относительно горизонтальной линии на угол, дополняющий угол при вершине пилообразных линий α до 180° (рис. 3).

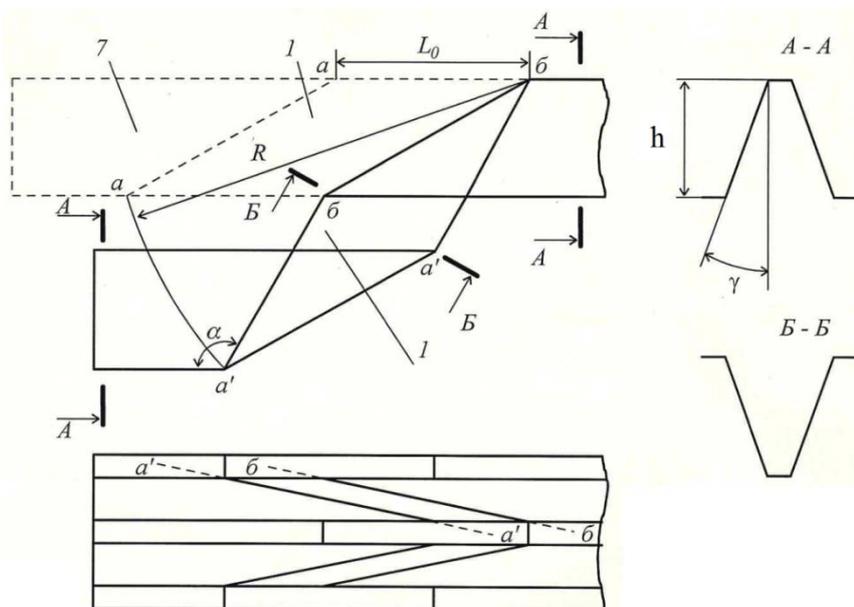


Рис. 3. Схема оппозитного формования рельефа

При этом образуются зигзагообразные линии выступов 2 и впадин 3 М-гофра, а элементы участка длиной L_0 в виде параллелограммов 1 поворачиваются в пространстве таким образом, что поперечное сечение $B - B$ отформованного участка представляет собой зеркальное отражение поперечного сечения $A - A$ исходного линейного гофра. Таким образом, происходит «выворачивание наизнанку» фрагмента, заключённого между сечениями $a - a$ и $b - b$, а углы вдоль пилообразных линий из выпуклых переходят в вогнутые. Учитывая специфику и нетрадиционность формирования рельефа предлагаемым методом, назовём эту схему оппозитным формованием. По классификации, предложенной в [10], данный процесс можно отнести к группе технологических схем циклического двойного гофрирования.

Реализуется указанная операция с помощью устройства, формообразующая часть которого схематично изображена на рис. 4. Оно содержит фиксирующий узел, состоящий из нижнего 1 и верхнего 2 фиксирующих элементов и формующего узла, состоящего соответственно из нижнего 3 и верхнего 4 формующих элементов.

Фиксирующие поверхности «а» и формующие рабочие поверхности «б» элементов 1 – 4 имеют профиль, совпадающий в нормальном сечении с линейным гофром, полученным на первом этапе. При этом фиксирующие рабочие поверхности элементов 1 и 4 выполнены со смещением относительно формующих рабочих поверхностей этих же элементов в направлении, перпендикулярном направлению подачи заготовки. Величина смещения равна половине шага линейного гофра (S). В то же время, фиксирующие и формующие рабочие поверхности элементов 2 и 3 не имеют такого смещения, а поперечное сечение их фиксирующих поверхностей является зеркальным отражением поперечного сечения формующих поверхностей этих же элементов. Угол наклона плоскости выступов формующих поверхностей определяется углом при вершине пилообразных линий М-гофра.

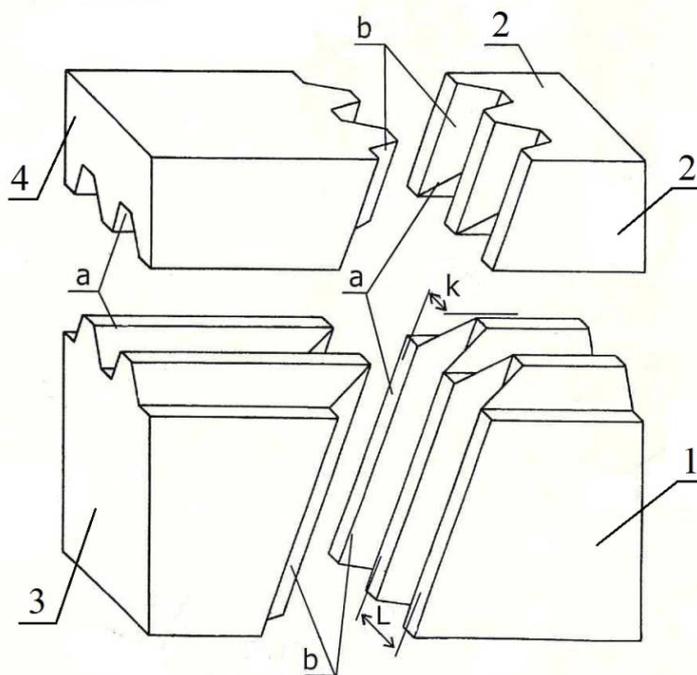


Рис. 4. Рабочие элементы оснастки для оппозитного формования

На рис. 5, а изображена схема расположения фиксирующего и формующего узлов друг относительно друга в момент зажима заготовки (вид сбоку).

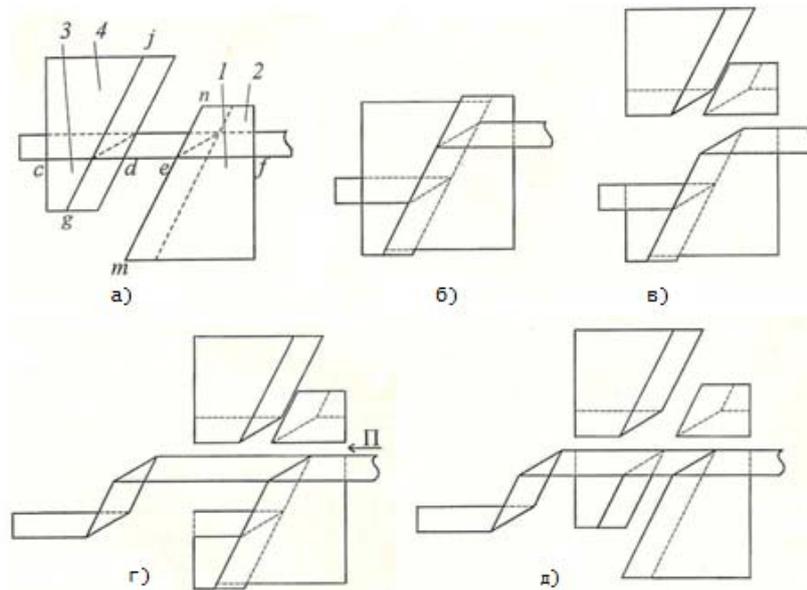


Рис. 5. Последовательность работы устройства:
 а – зажим заготовки; б – рабочий ход; в, г – расфиксация и подача заготовки;
 д – исходное положение перед зажатием заготовки

На этом этапе плоскость впадин рельефа фиксирующей поверхности нижнего формирующего элемента cd и плоскость впадин рельефа фиксирующей поверхности нижнего фиксирующего элемента ef совпадают, а плоскость впадин формирующих элементов gj и плоскость выступов фиксирующих элементов mn параллельны.

Во время рабочего хода, когда формирующий узел перемещается из крайнего верхнего положения до полного смыкания формирующего и фиксирующего узлов, плоскости gj и mn всегда остаются параллельными, так как движение формирующего узла относительно фиксирующего – плоскопараллельное. В момент полного смыкания узлов плоскости gj и mn совпадают (рис. 5, б).

Последовательность переходов показана на рис. 5. Вначале заготовка в виде линейного гофра зажимается между фиксирующими и формирующими узлами (рис. 5, а). Затем формирующий узел перемещается в крайнее нижнее положение (рис. 5, б), при этом образуются зигзагообразные линии выступов и впадин. На следующем этапе верхние и нижние части узлов размыкаются (рис. 5, в) и заготовка подаётся на нужный шаг L_0 по стрелке Π (рис. 5, г). Затем заготовка снова зажимается и цикл повторяется.

Определение технологических параметров процесса формообразования

Все траектории плоскопараллельного перемещения формирующего узла относительно фиксирующего узла (рис. 3) должны лежать внутри кругового сектора с минимальным радиусом R , определяемым по формуле:

$$R = \sqrt{\left(\frac{h}{\cos \gamma}\right)^2 + \left(L_0 + \frac{h}{\cos \gamma \cos \theta}\right)^2}, \quad (1)$$

где h – высота линейного гофра; γ – угол наклона боковой стенки линейного гофра; θ – угол наклона бокового ребра зигзагообразных линий; L_0 – шаг подачи заготовки,

центральный угол сектора равен углу, дополняющему угол при вершине пилообразных линий α до 180° (рис. 3).

Формула (1) получена из условия сохранения целостности материала параллелограммного элемента l (рис. 3). При «выворачивании» фрагмента линейного гофра большая диагональ параллелограммного элемента $aabb$, во избежание разрыва, не должна подвергаться растяжению. Для выполнения этого условия радиус кругового сектора, внутри которого и должны лежать все возможные траектории движения формирующего узла устройства, должен быть равен длине этой диагонали.

На базе структуры типа М-гофр путём варьирования пропорциями разметки можно получить детали различного конструктивного исполнения. Например, гофрированная структура, изображённая на рис. 1, *a* при «дожатии» в направлении зигзагообразных линий переходит в ячеистую (рис. 6, *a*) с образованием структурных фрагментов замкнутого ячеистого типа. При этом если на разметке выполняется условие: $2L_0(2S_0 - B) = V_0(2S_0 - B) + V_0^2$, то в результате складывания получается структура, у которой шаг по пилообразным линиям равняется амплитуде, т. е. $2L = V$ и перемычки (отрезки зигзагообразных линий шириной B) располагаются на одной линии « $n-n$ » (рис. 6, *a*). При несоблюдении этого условия ячейки, расположенные в смежных рядах, смещаются друг относительно друга на величину Δ (рис. 6, *б*).

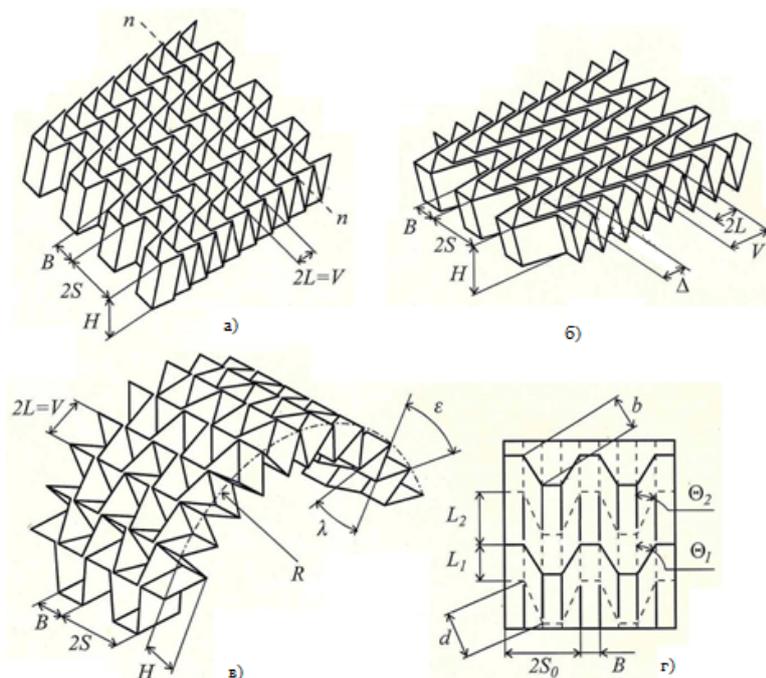


Рис. 6. Конструктивные варианты М-гофра:

a – ячеистая структура; *б* – структура со сдвигом поперечных рёбер;
в – цилиндрический М-гофр; *г* – разметка цилиндрической структуры

Структуре типа М-гофр можно придать на этапе её формирования одинарную кривизну (рис. 6, *в*). Для этого её разметка должна включать вместо параллелограммных элементов трапецевидные (рис. 6, *г*).

Технологические параметры разметки для цилиндрической конфигурации, показанные на рис. 6, *г* ($L_1, L_2, 2S_0, B, \theta_1, \theta_2$), зависят от заданных конструктивных параметров: наружного радиуса кривизны R , высоты блока H , шага по зигзагообразным линиям $2S$, шага по пилообразным линиям $2L$.

Связь между конструктивными и искомыми технологическими параметрами определяется замкнутой системой трансцендентных уравнений, аналитическое решение которой затруднено:

$$\begin{aligned} L &= R \cos\left(\frac{\lambda - \varepsilon + \pi}{2}\right), & L^2 &= L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \varepsilon, \\ \cos \varepsilon &= 1 - 2 \frac{b^2}{b^2 - (S - B)^2} \cos^2 \theta_1, & \cos \lambda &= 1 - 2 \frac{d^2}{d^2 - (S - B)^2} \cos^2 \theta_2, \\ b \sin \theta_1 &= d \sin \theta_2 = S_0 - B, & L_1 - b \cos \theta_1 &= L_2 - d \cos \theta_2. \end{aligned}$$

Если прибегнуть к упрощению постановки задачи путём задания величины одного из неизвестных технологических параметров, например L_2 , то можно получить аналитическое решение. Алгоритм нахождения технологических параметров в этом случае можно представить в следующем виде:

1) задаётся величина L_2 – наибольшее расстояние между соседними зигзагообразными линиями выступов и впадин на развёртке;

2) определяется наименьшее расстояние между соседними зигзагообразными линиями выступов и впадин $L_1 = \sqrt{4L^2 - L_2^2 + 2H^2}$, после чего находится ε – угол при

впадинах пилообразной линии гофра: $\varepsilon = \arccos\left[-\frac{L^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right]$ и λ – угол при верши-

нах пилообразной линии гофра: $\lambda = 2 \arccos\left[\frac{L}{R}\right] + \varepsilon - \pi$;

3) определяется длина наклонного ребра зигзагообразных линий выступов $d = \sqrt{V^2 + (S - B)^2}$ и θ_2 – угол при вершинах пилообразных линий на развёртке:

$$\theta_2 = \arccos\left[\sqrt{\frac{[d^2 - (S - B)^2](1 - \cos \lambda)}{2d^2}}\right];$$

4) шаг S_0 зигзагообразных линий на развёртке гофра находится по формуле $S_0 = d \sin \theta_2 + B$, после чего можно найти длину наклонного ребра зигзагообразных линий впадин гофра:

$$b = \sqrt{(L_1 - L_2 + d \cos \theta_2)^2 + (S_0 - B)^2};$$

5) определяется θ_1 – угол при впадинах пилообразных линий на развёртке:

$$\theta_1 = \arccos\left[\sqrt{\frac{[b^2 - (S - B)^2](1 - \cos \varepsilon)}{2b^2}}\right].$$

Практическое применение

Свойство модифицированных складчатых структур принимать криволинейную конфигурацию с заданной кривизной имеет важное практическое значение, например, при создании многослойных панелей цилиндрической формы [11 – 15].

Если варьировать расстоянием B между пилообразными линиями, то можно получить конструкцию с переменной плотностью ячеек по объёму блока заполнителя (рис. 7, а). При переменном шаге между зигзагообразными линиями формируется блок переменной высоты « H » [16] (рис. 7, б).

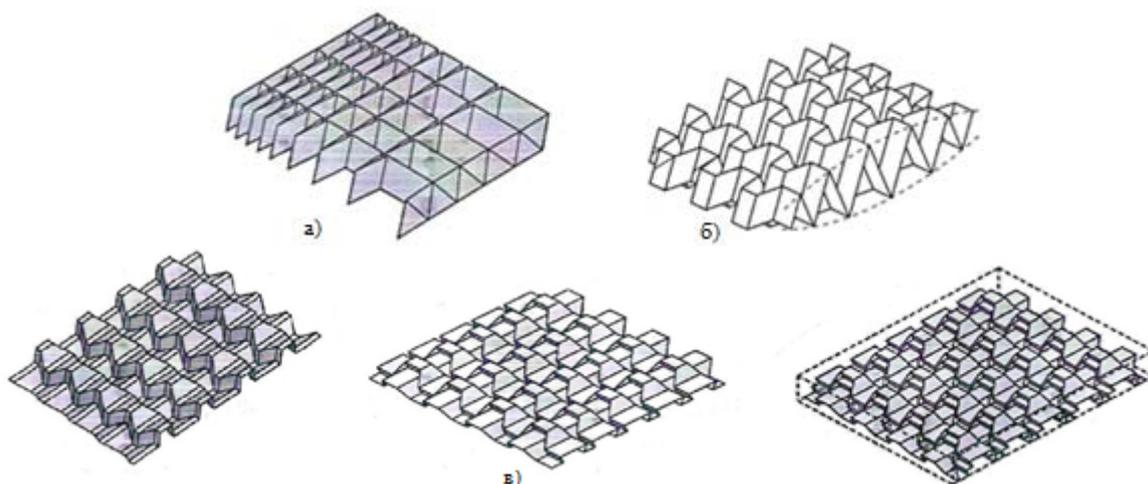


Рис. 7. Варианты архитектурных форм заполнителей:
 а – М-гофр с переменной плотностью по объёму; б – блок М-гофра переменной высоты;
 в – варианты блоков с реверсивной архитектурой

Как частный случай можно сформировать клиновидную конструкцию. Развитие рассматриваемой технологической схемы принципиально позволяет изготавливать блоки с реверсивной складчатой структурой в различных вариантах [8; 17].

В силу своих конструктивных особенностей варианты М-гофра могут найти применение в качестве лёгкого заполнителя в многослойных панелях транспортных средств и в строительных конструкциях. [6; 18; 19].

Широкие возможности вариации архитектурой складчатых заполнителей и густотой рельефа позволяют оптимизировать сэндвич-панели по удельным механическим характеристикам [20 – 24], ударостойкости [25; 26], звукопоглощению [27], звукоизоляции [28; 29], теплопроводности [30].

Предложенная схема защищена авторскими правами [31] и опробована с помощью экспериментального оборудования. На рис. 8 показана деталь ячеистой структуры (после «дожатия») из листовой стали 12Х18Н10Т толщиной 0,15 мм.

Оппозитное формообразование подходит для изготовления деталей со складчатой структурой из композиционных материалов с текстильным армированием.

На рис. 9 показаны варианты образцов заполнителя из стеклопластика. На первом этапе изготавливается линейный гофр с трапецевидным сечением из полукотверждённого препрега. На втором формируется М-гофр методом оппозитного формообразования с окончательной фиксацией рельефа путём отверждения с нагревом.

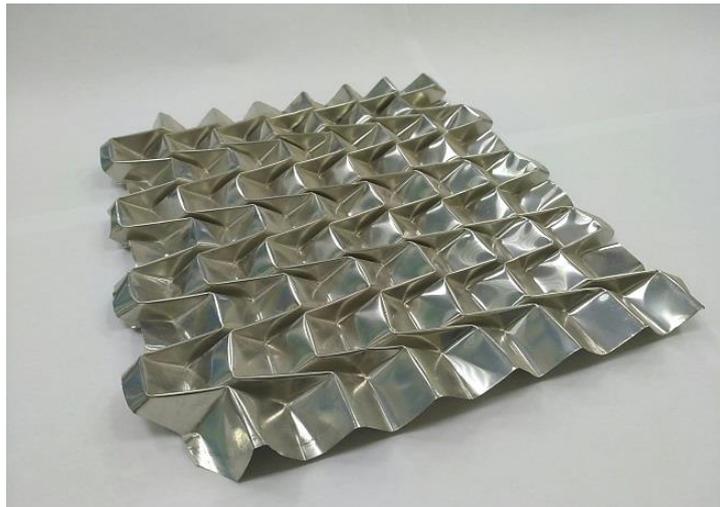


Рис. 8. М-гофр из металла

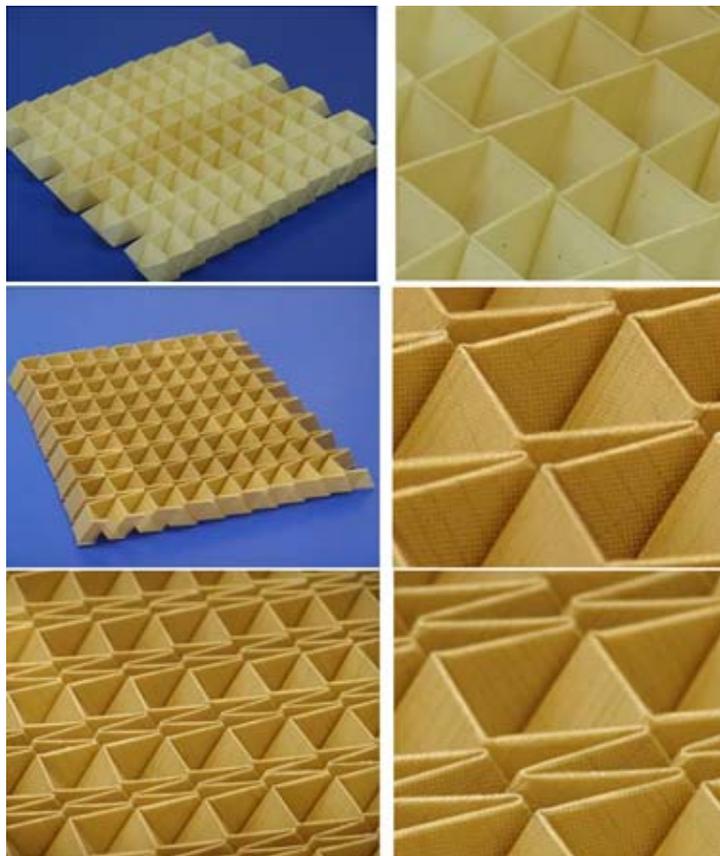


Рис. 9. Образцы М-гофра из стеклопластика

Заключение

Разработанная технологическая схема позволяет изготавливать складчатые конструкции типа М-гофр с различной плотностью рельефа и относительным сдвигом ячеек, а также с цилиндрическими огибающими поверхностями. Получены соотношения, устанавливающие связь между конструктивными параметрами изделия и технологическими

параметрами разметки на заготовке. Предложены алгоритмы их решения, а также соотношение для расчёта ограничений перемещения исполнительных элементов технологического оборудования.

Синтезирована широкая номенклатура архитектурных форм складчатых заполнителей с переменной плотностью по объёму, с переменной высотой, с плоскими гранями в огибающих поверхностях блоков структуры. Все варианты могут быть изготовлены рассматриваемым методом.

Возможность изготовления складчатых конструкций по предлагаемой схеме из металла и текстильно-армированных композитов подтверждены технологическим экспериментом.

Реализация технологической схемы позволяет создать устройство небольших габаритов в отличие от схемы складывания заготовки по всем линиям разметки одновременно [2], при которой площадь рабочей зоны оборудования должна быть не меньше заготовки. Исключена необходимость использования биговки. Схема позволяет использовать в качестве заготовки непрерывную ленту.

Поскольку формообразование осуществляется на жёсткой оснастке, то следует ожидать и большую точность детали, чем при изготовлении её с помощью трансформируемого формообразующего узла, меняющего свою форму в процессе формования [2].

Библиографический список

1. Халиулин В.И. Геометрическое моделирование при синтезе структур складчатых заполнителей многослойных панелей // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 1995. № 1. С. 31-40.
2. Tachi T. Geometric considerations for the design of rigid origami structures // Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium. 2010.
3. Wu W., You Z. Modelling rigid origami with quaternions and dual quaternions // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2010. V. 466, Iss. 2119. P. 2155-2174. DOI: 10.1098/rspa.2009.0625
4. Gattas J.M., You Z. Geometric assembly of rigid-foldable morphing sandwich structures // Engineering Structures. 2015. V. 94. P. 149-159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.019
5. Fuchi K., Diaz A.R. Origami design by topology optimization // Journal of Mechanical Design. 2013. V. 135, Iss. 11. DOI: 10.1115/1.4025384
6. Evans T.A., Lang R.J., Magleby S.P., Howell L.L. Rigidly foldable origami gadgets and tessellations // Royal Society Open Science. 2015. V. 2, Iss. 9. DOI: 10.1098/rsos.150067
7. Халиулин В.И., Двоглазов И.В. Устройство для гофрирования листового материала: патент РФ № 2118217; опубл. 27.08.98.
8. Халиулин В.И. О классификации регулярных рядовых складчатых структур // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2003. № 2. С. 7-12.
9. Халиулин В.И. О методе синтеза структуры складчатых заполнителей многослойных панелей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2005. № 1. С. 7-12.
10. Халиулин В.И., Батраков В.В. Технологические схемы формообразования зигзагообразного гофра // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2005. № 2. С. 68-73.

11. Zhou X., Zang S., Wang H., You Z. Geometric design and mechanical properties of cylindrical foldcore sandwich structures // *Thin-Walled Structures*. 2015. V. 89. P. 116-130. DOI: 10.1016/j.tws.2014.12.017
12. Liu B., Sun Y., Zhu Y. Fabrication and compressive behavior of carbon-fiber-reinforced cylindrical foldcore sandwich structure // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. V. 118. P. 9-19. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.12.011
13. Hu Y., Liang H., Duan H. Design of cylindrical and axisymmetric origami structures based on generalized Miura-ori cell // *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2019. V. 11, Iss. 5. DOI: 10.1115/1.4043800
14. Tachi T. Freeform variations of origami // *Journal for Geometry and Graphics*. 2010. V. 14, Iss. 2. P. 203-215.
15. Tachi T. Designing freeform origami tessellations by generalizing Resch's patterns // *Journal of Mechanical Design*. 2013. V. 135, Iss. 11. DOI: 10.1115/1.4025389
16. Халиулин В.И., Хилов П.А. Особенности технологии изготовления клиновидных складчатых заполнителей из композитов // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2012. № 2. С. 13-18.
17. Халиулин В.И. Технологические схемы изготовления многослойных конструкций. Казань: КГТУ, 1999. 168 с.
18. Miura K. Method of packaging and deployment of large membranes in space. Tech. Report no. 618. The Institute of Space and Astronautical Science, 1985. 9 p.
19. McKay D.M., Morgan S.J. Structural systems for panels, boards, shelves, and laminates. Patent GB 2123874 A, E04C2/32, 1984.
20. Muhs F., Klett Y., Middendorf P. Influence of geometry and base material on the compressive properties of foldcores // *Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials (June, 26-30, 2016, Munich, Germany)*. 2016.
21. Du Y., Song C., Xiong J., Wu L. Fabrication and mechanical behaviors of carbon fiber reinforced composite foldcore based on curved-crease origami // *Composites Science and Technology*. 2019. V. 174. P. 94-105. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.02.019
22. Портной В.А., Портной А.В. Алгоритм МКЭ-анализа прочности и устойчивости трёхслойных панелей со складчатыми заполнителями // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2009. № 3. С. 5-8.
23. Паймушин В.Н., Закиров И.И., Карпиков Ю.А. Теоретико-экспериментальный метод механических характеристик заполнителя складчатой структуры в виде z-гофра. Теоретические основы и сжатие заполнителя в поперечном направлении // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2012. № 3. С. 10-17.
24. Паймушин В.Н., Закиров И.М., Карпиков Ю.А. Теоретико-экспериментальный метод определения механических характеристик заполнителя складчатой структуры в виде z-гофра (сдвиг заполнителя в плоскостях поперечных сечений) // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2013. № 3. С. 19-26.
25. Heimbs S. Foldcore sandwich structures and their impact behaviour: An overview // *Solid Mechanics and its Applications*. 2013. V. 192. P. 491-544. DOI: 10.1007/978-94-007-5329-7_11
26. Мовчан Г.В. Исследование складчатых конструкций на ударную нагрузку // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2007. № 4. С. 64-65.
27. Молод М.В., Максименков В.И., Федосеев В.И. Формообразующие технологии для изготовления кожухов шумоглушения турбореактивного двигателя // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2018. Т. 17, № 3. С. 167-174. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-167-174

28. Досикова Ю.И., Хабибуллина Д.Д. Звукоизоляционные характеристики панелей с наполнителем складчатой структуры типа z-гофр // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 61-64.

29. Досикова Ю.И. Исследование звукоизоляционных характеристик трёхслойных панелей с наполнителем z-гофр // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2013. № 2. С. 68-71.

30. Киаука М.Ю., Пономарев И.М., Сафин И.Ш. Аналитические зависимости для определения теплопроводности многослойных панелей со складчатым наполнителем // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2012. № 3. С. 56-60.

31. Халиулин В.И., Скрипкин Е.А. Способ изготовления зигзагообразного гофра (варианты): патент РФ № 2100119; опубл. 27.12.97; бюл. № 36.

PROCESS OF FORMING MIRROR-SHAPED RELIEF PLATES OF FOLDED STRUCTURE

© 2019

V. I. Khaliulin Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Aircraft Production;
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
pla.kai@mail.ru

R. Sh. Gimadiev Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Engineering Cybernetics;
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation;
gimadiev@mail.ru

V. A. Markovtsev Doctor of Science (Engineering), General Director;
Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Management, Ulyanovsk, Russian Federation;
info@ulniat.ru

N.V. Levshonkov Associate Professor of the Department of Aircraft Construction and Design;
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
nvlevshonkov@kai.ru

We present a process flow sheet that allows dividing the process of shaping of folded structures into several stages. The formation of the relief is achieved by inverting individual sections of the trapezoidal corrugation to give them a mirror-reflected shape. The process is characterized by narrow zones of bending deformations along the lines of the structure marking and by warping of faces without drawing. The field shaper layout and the relationships for calculating geometric and process parameters are presented.

Folded structures; shaping processes; process flow sheet; cyclic double corrugation.

Citation: Khaliulin V.I., Gimadiev R.Sh., Markovtsev V.A., Levshonkov N.V. Process of forming mirror-shaped relief plates of folded structure. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 4. P. 169-182. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-169-182

References

1. Khaliulin V.I. Geometrical simulation and synthesis of FC structures of sandwich panels. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. A.N. Tupoleva*. 1995. No. 1. P. 31-40. (In Russ.)

2. Tachi T. Geometric considerations for the design of rigid origami structures. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. 2010.
3. Wu W., You Z. Modelling rigid origami with quaternions and dual quaternions. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2010. V. 466, Iss. 2119. P. 2155-2174. DOI: 10.1098/rspa.2009.0625
4. Gattas J.M., You Z. Geometric assembly of rigid-foldable morphing sandwich structures. *Engineering Structures*. 2015. V. 94. P. 149-159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.019
5. Fuchi K., Diaz A.R. Origami design by topology optimization. *Journal of Mechanical Design*. 2013. V. 135, Iss. 11. DOI: 10.1115/1.4025384
6. Evans T.A., Lang R.J., Magleby S.P., Howell L.L. Rigidly foldable origami gadgets and tessellations. *Royal Society Open Science*. 2015. V. 2, Iss. 9. DOI: 10.1098/rsos.150067
7. Khaliulin V.I., Dvoeglazov I.V. *Ustroystvo dlya gofirovaniya listovogo materiala* [Apparatus for corrugating sheet material]. Patent RF, no. 2118217, 1998. (Publ. 27.08.1998)
8. Khaliulin V.I. Classification of regular row-arranged folded structures. *Russian Aeronautics*. 2003. V. 46, Iss. 2. P. 8-17.
9. Khaliulin V.I. A technique for synthesizing the structures of folded cores of sandwich panels. *Russian Aeronautics*. 2005. V. 48, Iss. 1. P. 8-16.
10. Khaliulin V.I., Batrakov V.V. Technological schemes of zigzag crimp shaping. *Russian Aeronautics*. 2005. V. 48, Iss. 2. P. 106-114.
11. Zhou X., Zang S., Wang H., You Z. Geometric design and mechanical properties of cylindrical foldcore sandwich structures. *Thin-Walled Structures*. 2015. V. 89. P. 116-130. DOI: 10.1016/j.tws.2014.12.017
12. Liu B., Sun Y., Zhu Y. Fabrication and compressive behavior of carbon-fiber-reinforced cylindrical foldcore sandwich structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. V. 118. P. 9-19. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.12.011
13. Hu Y., Liang H., Duan H. Design of cylindrical and axisymmetric origami structures based on generalized Miura-ori cell. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2019. V. 11, Iss. 5. DOI: 10.1115/1.4043800
14. Tachi T. Freeform variations of origami. *Journal for Geometry and Graphics*. 2010. V. 14, Iss. 2. P. 203-215.
15. Tachi T. Designing freeform origami tessellations by generalizing Resch's patterns. *Journal of Mechanical Design*. 2013. V. 135, Iss. 11. DOI: 10.1115/1.4025389
16. Khaliulin V.I., Khilov P.A. Peculiarities of production technology for wedge-shaped folded cores from composites. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2012. No. 2. P. 13-18. (In Russ.)
17. Khaliulin V.I. *Tekhnologicheskie skhemy izgotovleniya mnogosloynnykh konstruktsiy* [Process flow diagrams for the manufacture of multilayer structures]. Kazan: Kazan State Technical University Publ., 1999. 168 p.
18. Miura K. Method of packaging and deployment of large membranes in space. Tech. Report no. 618. The Institute of Space and Astronautical Science, 1985. 9 p.
19. McKay D.M., Morgan S.J. Structural systems for panels, boards, shelves, and laminates. Patent GB 2123874 A, E04C2/32, 1984.
20. Muhs F., Klett Y., Middendorf P. Influence of geometry and base material on the compressive properties of foldcores. *Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials (June, 26-30, 2016, Munich, Germany)*. 2016.
21. Du Y., Song C., Xiong J., Wu L. Fabrication and mechanical behaviors of carbon fiber reinforced composite foldcore based on curved-crease origami. *Composites Science and Technology*. 2019. V. 174. P. 94-105. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.02.019

22. Portnoy V.A., Portnoy A.V. Algorithm for analyzing strength and stability of sandwich panels with folded cores by finite-element method. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2009. No. 3. P. 5-8. (In Russ.)

23. Paimushin V.N., Zakirov I.I., Karpikov Y.A. Theoretical and experimental technique of determining the mechanical characteristics of folded structure core in the form of Z-crimp. Theoretical foundations and core compression in transverse direction. *Russian Aeronautics*. 2012. V. 55, Iss. 3. P. 233-244. DOI: 10.3103/S1068799812030038

24. Paimushin V.N., Zakirov I.M., Karpikov Y.A. Theoretical and experimental technique of determining the mechanical characteristics of folded structure filler in the form of Z-crimp (shear of a filler in cross-sectional planes). *Russian Aeronautics*. 2013. V. 56, Iss. 3. P. 234-246. DOI: 10.3103/S1068799813030057

25. Heimbs S. Foldcore sandwich structures and their impact behaviour: An overview. *Solid Mechanics and its Applications*. 2013. V. 192. P. 491-544. DOI: 10.1007/978-94-007-5329-7_11

26. Movchan G.V. Analysis of folded structures for impact resistance. *Russian Aeronautics*. 2007. V. 50, Iss. 4. P. 439-441. DOI: 10.3103/S1068799807040162

27. Molod M.V., Maksimenkov V.I., Fedoseev V.I. Shaping technologies for manufacturing noise insulation casings of turbojet engines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 3. P. 167-174. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-167-174. (In Russ.)

28. Dosikova Yu.I., Khabibullina D.D. Sound insulating characteristics of panels with z-corrugation type fold structure filler. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2013. No. 4. P. 61-64. (In Russ.)

29. Dosikova Yu.I. Studies of soundproofing characteristics of sandwich panels with cores of Z-crimp type. *Russian Aeronautics*. 2013. V. 56, Iss. 2. P. 194-198. DOI: 10.3103/S1068799813020141

30. Kiauka M.Y., Ponomarev I.M., Safin I.S. Analytical dependences for determination of thermal conduction in sandwich panels with folded cores. *Russian Aeronautics*. 2012. V. 55, Iss. 3. P. 298-304. DOI: 10.3103/S1068799812030129

31. Khaliulin V.I., Skripkin E.A. *Sposob izgotovleniya zigzagoobraznogo gofra (varianty)* [Method for making zigzag corrugation (variants)]. Patent RF, no. 2100120, 1997. (Publ. 27.12.1997, bull. no. 36)