



УДК 629.7.02.608

*Гирченко А.Г.*

Институт химии поверхности имени А.А. Чуйко НАН Украины. Украина, г. Киев

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВАФЕЛЬНЫХ (ИЗОГРИДНЫХ) СТРУКТУР ИЗ КОМПОЗИТНЫХ АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Предложена новая силовая схема вафельной (изогридной) структуры из армированных композитных материалов, обеспечивающая прочное соединение силовых элементов. Рассмотрена возможность создания на ее основе более прочных и жестких конструкций по сравнению с распространенными однослойными (сплошными) и трехслойными (сендвичевыми) стенками.*

*Исследованы прочностные возможности и виды разрушения ее силовых элементов. Даны рекомендации по армированию. Приведены примеры использования.*

*Ключевые слова:* вафельные; изогридные; композитные материалы.

Важнейшим направлением механики композитных материалов является разработка и исследование новых эффективных вариантов их применения в конструкциях современной техники.

Технологические возможности изготовления конструкций типа панелей и оболочек из композитов позволяют применить их во всех известных конструкционных формах, используемых для металлов и других однородных материалов. В настоящее время известно, что они широко применяются в изделиях с однослойной сплошной стенкой, трехслойной (сендвичевой) и с подкреплениями в виде стрингеров и шпангоутов.

Высокие удельные характеристики прочности и жесткости этих материалов, а также возможность осуществлять армирование с учетом напряженного состояния изделий позволяют получать выигрыш в массе конструкций, по сравнению с аналогичными металлическими прототипами.

Наиболее эффективной для подкрепления тонких стенок является вафельная форма, состоящая из тон-

кой обшивки, подкрепленной тонкими часто расположенными пересекающимися ребрами [4]. Они превосходят в этом отношении трехслойные стенки [6].

Эти качества вафельных структур стимулировали стремление к их внедрению, что сопровождалось поисками приемлемого способа их изготовления, который обеспечил бы надежное соединение тонких пересекающихся ребер с обшивкой.

Трудность решения этой задачи является причиной незначительного распространения вафельных конструкций. Применительно к металлическим изделиям, эта задача была решена путем использования технологии изготовления вафельного полотна «из одного куска» путем выемки «лишнего» материала из листовой заготовки при помощи фрезерования для образования вафельного рисунка и последующего химического травления для обеспечения заданного размера и массы стенки.

Для этого была создана производственная база, оснащенная специальными многошпиндельными станками с программным управлением, которые

способны выбрать с поверхности листа «лишний» металл из нескольких тысяч ячеек. Эта технология, несмотря на сложность и трудоемкость, обеспечивала изготовление из алюминиевых сплавов панельных и оболочных конструкций для авиационной и космической техники в 80-х гг. [1]

Для однородных материалов, вафельную форму можно получить штамповкой и формованием, когда ребра и обшивка образуются одновременно. При этом, желательный размер ячейки, высота и толщина ребер, которые определяются расчетом, не всегда удается получить, что приводит к ухудшению массового совершенства вафельной стенки, нивелируя ее преимущества.

Отчасти по этим же причинам композитные материалы, в силовых вафельных структурах не использовались, несмотря на их способность улучшить характеристики конструкций за счет своих высоких удельных механических характеристик, а также возможностей целенаправленного армирования с учетом напряженного состояния изделия и целесообразного размещения материала в пределах вафельной стенки.

Сходное вафельному по форме строение образуется при изготовлении оболочек из композитных материалов путем их непрерывной намотки на оправку [5]. Ребра выполняются в виде сетки в виде намотанных с шагом пересекающихся прядей арматуры, а обшивка — сплошной их намоткой.

Но, если в металлических вариантах элементы подкрепляющего набора прочно соединены с обшивкой за счет выполнения заодно с нею («с одного куска»), то в «мотанной» оболочке прочное соединение обеспечивается за счет толщины ребер, обеспечивающей их контакт с обшивкой. Это условие, а также такой метод изготовления, не позволяет рационально размещать армирующие элементы по высоте сечения с целью достижения максимальной жесткости стенки.

Известно также новое строение вафельной конструкции из композитных материалов [7], показанной на рис. 1. В нем обшивка 1 соединена с соединительным элементом 2, в прорезанных или отформованных каналах которого размещены силовые элементы 3. Благодаря этому обеспечивается их прочное клеевое соединение с обшивкой по всей площади соединительного элемента, которая мало зависит от толщины ребер. Силовые элементы 3 создают вафельное подкрепление, определяемое формой и направлением каналов соединительного слоя.

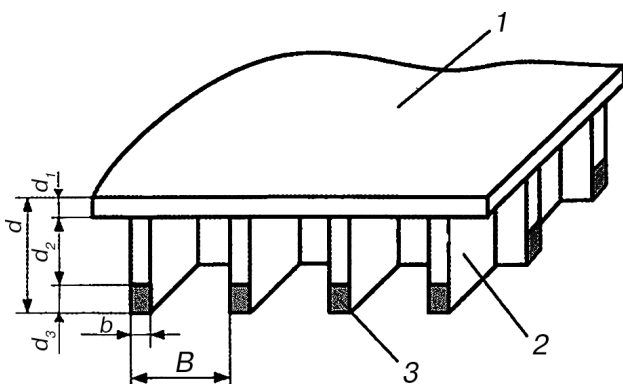


Рис. 1. Вафельная конструкция

Это дает возможность получать пустотелые, тонкие и высокие ребра, которые размещаются на необходимом расстоянии от обшивки в каналах соединительного слоя. Подкрепляющий набор может быть разновысоким. Это обеспечит устойчивость в «большом», а также местную устойчивость в пределах участка, находящегося между высокими ребрами, за счет более мелких ребер.

Силовую схему такой стенки можно представить в виде двух поясов (см. рис. 1): обшивки толщиной  $d_1$  и пояса толщиной  $d_3$ . Последний создается приведением к единице ширины массы материала подкрепляющего набора 3, размещенного в каналах соединительного слоя. Эта толщина может регулироваться в широких пределах и быть меньше толщины  $d_1$  обшивки. Такое строение создает широкие возможности целесообразного размещения в сечении стенки материала силового набора.

Оценка вариантов такого размещения по величине отношения  $J/G$  момента инерции  $J$  к массе единицы поверхности  $G$  [1] показал рост этого отношения при уменьшении величины параметра  $k = d_3/d_1$  (при  $k = 1$  имеем трехслойную стенку с симметричными слоями). Отношение  $J/G$  увеличивается в большей степени при увеличении строительной высоты.

В предлагаемом строении стенки это осуществляется за счет малозатратного выполнения высоких и тонких пустотелых ребер с размещением силового набора в их вершинах. В трехслойных вариантах на сотовых структурах это уменьшение параметра  $k$  за счет уменьшения толщины обшивки, что ограничивается возможностью потери ею внутриячейной устойчивости, а также особенностями используемой арматуры. А использование в среднем слое пенопласта влечет увеличение массы поверхности.

Панель и оболочки, выполненные с использованием такого строения, показана на рис. 2. Работоспособность предложенной вафельной структуры, использованной в изделиях, проверена при испытании образцов на изгиб (рис. 3). Силовые элементы ее располагались в сжатой зоне, как показано на рис. 3. Их разрушение зависело от расположения и формы связи с соединительным элементом.

Ребра составляют единое целое из армированных стержней, расположенных в пустотелых стенках каналов, с которыми они склеены. В местах их разрушения, как видно из рис. 3, а, нет следов расслоения.

Ребра составляют единое целое из армированных стержней, расположенных в пустотелых стенках каналов, с которыми они склеены. В местах их разрушения, как видно из рис. 3, а, нет следов расслоения.

Ребра составляют единое целое из армированных стержней, расположенных в пустотелых стенках каналов, с которыми они склеены. В местах их разрушения, как видно из рис. 3, а, нет следов расслоения.

Ребра составляют единое целое из армированных стержней, расположенных в пустотелых стенках каналов, с которыми они склеены. В местах их разрушения, как видно из рис. 3, а, нет следов расслоения.

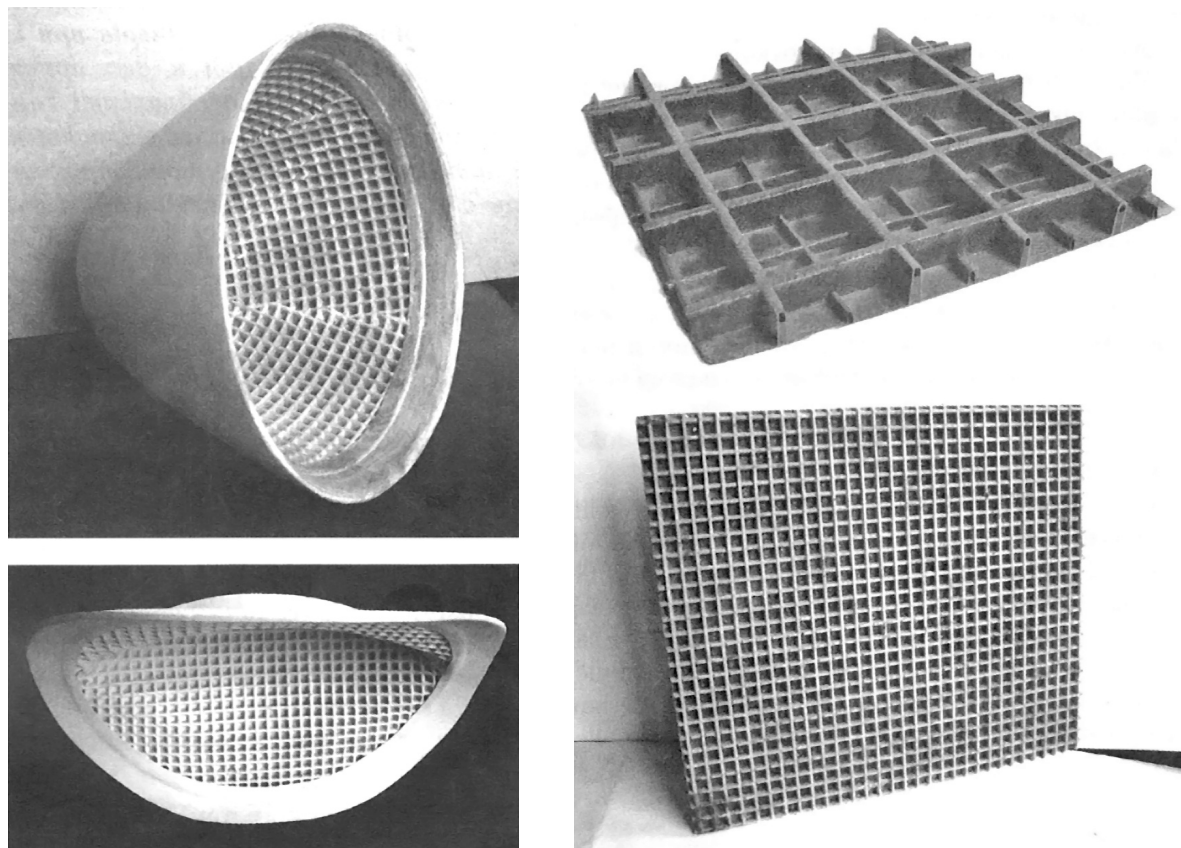


Рис. 2. Панель и оболочки

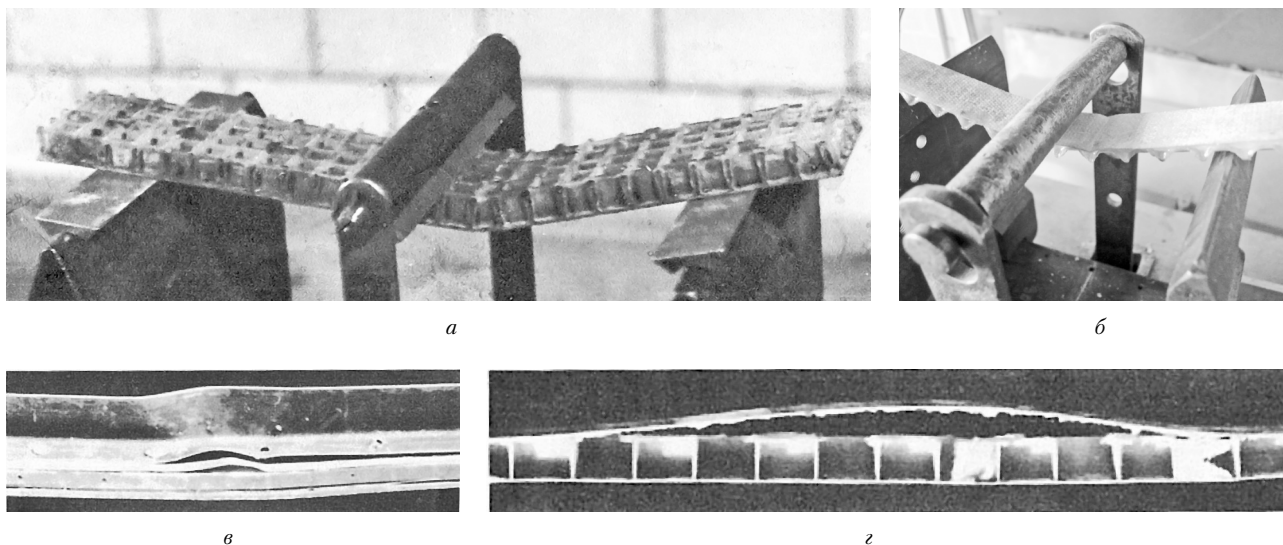


Рис. 3. Силовые элементы

ния, что свидетельствует о полноте использования составляющего материала.

Обшивка вафельного пакета приклеена к соединительному слою по развитой поверхности, близкой к сплошной (за исключением поверхности каналов ребер). Потеря ее несущей способности происходит с характерными для клееных слоистых структур отслоениями (рис. 3, б). Эти отслоения характерны

для тонкой пластинки, склеенной со сплошной поверхностью соединительного слоя.

Для сравнения приведены также виды разрушения в трехслойном и слоистом сплошном пакете (рис. 3, в, г). В трехслойном пакете приклеенная к торцам сот обшивка разрушается путем отшелкивания ее от поверхности торцов сот с образованием большой волны отклеенного слоя.

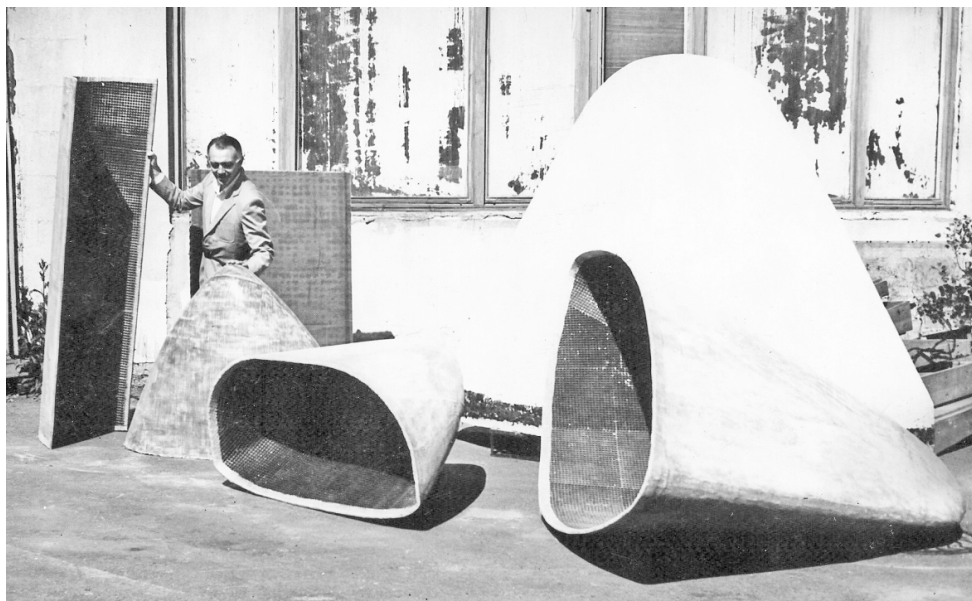


Рис. 4. Опытные изделия

Прочность соединения обшивки по торцам сот была оценена по величине удельной работы при отрыве, определенной по методу вращающегося барабана [3]. Она составила при отрыве от сотового заполнителя (0,2–0,4) кг/см в зависимости от толщины клеевой прослойки и глубины на погружения в нее торцов сот. Удельная работа разрушения при отрыве в вафельной конструкции составило, в зависимости от марки клея, (0,2–0,57) кг/см.

Вероятность отслоения обшивки можно снизить за счет увеличения прочности ребер, что достигается при полном заполнении полости канала соединительного элемента армирующим волокном. В этом случае, обшивка, в основном, будет выполнять функцию декоративной поверхности, т.к. основную нагрузку возьмут на себя ребра.

Такая вафельная структура из композитных материалов была разработана в Институте механики НАН Украины в 80–90 гг, т.е. практически одновременно с внедрением как в Союзе, так и за рубежом, металлических оболочек вафельного типа [7].

Для ряда ведущих авиационных предприятий союза были изготовлены крупногабаритные опытные изделия описанного строения, показанные на рис. 4., которые соответствовали заданным прочностным и радиотехническим требованиям.

В открытых ячейках вафельных конструкций, в отличие от сот, не накапливается сконденсированная влага; пустотелые незамкнутые ребра обеспечивают легкий промежуток между несущими поясами. Благодаря этим свойствам, вафельная структура может быть применена для изготовления в радиопрозрачных обтекателях антенн СВЧ летательных аппаратов, при условии согласования размеров ее слоев для обеспечения требуемого уровня радиопрозрачности обтекателей [2].

Рассмотрим массовые и размерные характеристики вафельных конструкций из углепластика, показанных на рис. 1 (см. таблицу 1).

При высоте набора  $d$ , определяемой из условия обеспечения необходимой величины момента инерции, при толщине обшивки из углепластика  $d_1$ , равной 0,3 мм, можно получить массу  $1 \text{ м}^2$  поверхности менее 1 кг. Возможно также его дальнейшее снижения за счет уменьшения толщины обшивки, что определяется технологическими возможностями исходных армирующих материалов.

Такие характеристики конструкции позволяют рекомендовать ее для применения, к примеру, в качестве легких и прочных панелей для космических солнечных батарей.

Таблица 1

Характеристики вафельных конструкций

Толщина слоя $d_3$ , отнесенная к единице сечения, мм	0,1	0,5	0,01
$d_1$ , мм	20,9	27,1	56,0
Расчетная масса слоя $d_3$ , отнесенного к единице поверхности сечения, кг/м <sup>2</sup>	0,16–0,6	0,7	0,014
Плоскость вафельного набора, кг/м <sup>3</sup>	0,16–0,26	0,21–0,31	0,27–0,37



Заполнением ячеек вафельной структуры пенопластом или другими специальными составами, можно обеспечивать термоизоляцию, неотражаемость, или другие свойства стенки.

### Вывод

Результаты проведенного анализа показывают, что применение вафельной структуры из композитных материалов позволяет создавать конструкции со специальными свойствами, которые имеют лучшие массовые характеристики, по сравнению с традиционными трехслойными структурами. Предложенное вафельное строение может использоваться для изготовления изделий практически любой сложной формы и размеров.

### Литература

[1] Гирченко А.Г., Скурский П.П. Вафельные конструкции из композитных материалов. Технологические системы. №4, 2010 – с.80.

- [2] Гирченко А.Г., Скурский П.П. Применение многослойных структур вафельного типа из композитных материалов для создания обтекателей антенн СВЧ. Известия высших учебных заведений радиоэлектроники, Том 54, №4 апрель 2011.
- [3] Кейгл Ч. Клеевые соединения М. 1971.
- [4] Лизин В.Г., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций – М.: Машиностроение, 1985, С.5
- [5] Механика композитных материалов и элементов конструкций. В трех томах. Под общ. Ред. А.Н. Гузя. Т.3 Прикладные исследования, Киев, Нукова думка, 1983, стр. 242, рис. 1, 4, 5.
- [6] "Synthesis of Waffle Plates with Multiple Rib Sizes" L. P. Felton, L. D. Hofmeister. AIAA Journal, 2193, No. 12, 1969.
- [7] А.С. № 1306019, МКИ В 64 С 3/26. Панель крыла летательного аппарата / А. Г. Гирченко. – Заявл. 02.04.85 №3912329/40–23; опубликовано Б. И. № 749024.

**Girchenko A. G.**

Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

## DESIGN AND EVALUATION OF THE WAFFLE-GRID (ISOGRID) STRUCTURES BUILT FROM REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

*A new power scheme for a waffle-grid (isogrid) structure, proposed in this article, is composed of reinforced composite materials, which provide a strong connection of power elements. The author looked into a possibility of creating on its basis of a stronger and more rigid structure, compared to common single-layer (wholesome) and three-layer (sandwich-compound) panels.*

*Investigated are also strength properties and fracture modes of its power elements. The author also offers recommendations on armoring reinforcement of such constructions. An example of use of such construction build is provided in a prototype of aircraft construction.*

*Keywords: waffle-grid structure; isogrid constructions; composite materials.*

### References

- [1] Tkachenko A.G., Skursky P.P. "Waffle-grid design of composite materials". Technological systems. №4, 2010 – p.80.
- [2] Girchenko A.G., Skursky P.P. "The use of waffle-typemultilayer structures of composite materials to buildcowling for microwaveantennas. Tidings of higher educational institutions of Electronics, Vol 54, №4 April 2011.
- [3] Charles V. Cagle, Irving Katz, "Adhesive materials: their properties and usage". Foster Pub. Co., 1971.
- [4] Lizin V.G., Pyatkin V.A. "Design of thin-walled structures – M.": "Mashinostroeniye", 1985, С.5
- [5] "The mechanics of composite materials and structure elements". In threevolumes. Edited by A.N. Guz'. V.3 "Applied Research", Kiev, Naukova Dumka, 1983, p. 242, fig. 1, 4, 5.
- [6] "Synthesis of Waffle Plates with Multiple Rib Sizes" LP Felton, LD Hofmeister. AIAA Journal, 2193, No. 12, 1969.
- [7] A.C. No. 1306019, MCI 64 C in 3/26. Panel of an aircraft wing / A.G. Girchenko. – Stated 02.04.85 №3912329 / 40-23; published BI No.749024.