

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЁТОВ ДЛЯ СИНТЕЗА СКЛАДЧАТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. Р. Хасанов, К. А. Алексеев

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Национальный исследовательский университет КГТУ им. А. Н. Туполева
ООО «Научно-исследовательский центр высоких технологий»
г. Казань

Введение. Многослойные панели используются во многих аспектах производства. Заполнители же этих панелей почти всегда изготавливаются из структурных элементов посредством их разрезания и склеивания (сварки), что увеличивает вес изделия, уменьшает его прочность и ведёт к нерациональному использованию материала. Заполнители же из складчатых структур позволяют избежать указанных негативных факторов и по сути представляют интерес со стороны производства. Благодаря ряду полезных свойств складчатые структуры могут быть использованы в изготовлении следующих классов изделий:

1) Фюзеляжи летательных аппаратов: панели со складчатым наполнителем имеют высокую жёсткость при малом весе, что весьма критично в авиационной технике.

2) Радиаторы термодинамических систем: складчатая структура, не заключённая между двух стенок имеют большую площадь соприкосновения с окружающей средой, что повышает теплоотдачу.

3) Теплоизолирующие материалы: складчатая структура, заключённая между двух стенок может содержать большой объём газа, что говорит о хороших термоизолирующих свойствах материала.

4) Амортизирующие материалы: так, при сминании панели с разрушением её складчатой структуры поглощается огромное количество кинетической энергии.

Последние разработки в области исследования складчатых структур демонстрируют значительную трудоёмкость процесса проектирования многослойных панелей, вызванную большим объемом вычислений при расчете геометрических параметров даже простейших – четырехлучевых структур [1]. Значительное место в этом объеме занимают составление алгоритма и проведение собственно вычислений, процесс имитационного

моделирования синтезируемой структуры, когда для каждого типа наполнителя разрабатывается собственная геометрическая модель, варианты расчетов, направленные на достижение требуемых конструктивных, прочностных или эксплуатационных характеристик.

Настоящая работа направлена на разработку программного средства для синтеза складчатых наполнителей многослойных панелей произвольной формы в части определения конструктивных параметров и визуализации одновершинных n-гранных складчатых структур, сохраняющих в рельефном состоянии плоскостность граней на любом этапе трансформирования. Имея в виду, что любая складчатая конструкция может быть разбита на элементарные объекты, содержащие по одной вершине и определенное количество граней, образующих замкнутый контур вокруг этой вершины, настоящая работа представляется весьма актуальной в части перспектив разработки алгоритмов расчета n-вершинных складчатых структур.

Полных аналогов предлагаемому к разработке программному средству в известной литературе найдено не было. Ближайшие аналоги; отечественные – НИУ КГТУ им. А.Н.Туполева [2], КНИАТ [3]; зарубежные – Рютгертский университет (США) [4], Штутгартский институт авиационных конструкций [5], направлены на разработку индивидуальных имитационных моделей для каждого типа складчатой структуры и решают задачу автоматизированного проектирования элементов многослойных панелей только для складчатого наполнителя определенного типа.

Для разработки предлагаемого программного средства требуется построение унифицированного алгоритма расчета одновершинной n-гранной складчатой структуры, ее визуализация посредством графического интерфейса и разработка пользовательского

инструментария для определения требуемых геометрических и конструктивных параметров структуры.

Структурный и кинематический анализ. Алгоритм расчета одновершинной n-гранной складчатой структуры. В процессе определения области существования складчатых структур был рассмотрен ряд признаков, однозначно характеризующих такие свойства, как разворачиваемость на плоскость, сплошность материала, неизменность внутренней геометрии и т.д. Ввиду достаточной сложности анализа процесса изгибания непосредственно n-гранной складчатой структуры (рисунок **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, а) был предложен метод ее взаимно-однозначного сферического отображения (построение индикатрисы Гаусса) [6]. Результатом такого отображения является плоский замкнутый многоугольник (рисунок **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, б), стороны которого необходимо должны пересекаться (образовывать петли). Кинематический и структурный анализ многогранника, выполненный с использованием элементов теории графов и комбинаторной топологии, позволяет определить следующие важные характеристики складчатой структуры:

- для образования самопересечения многогранник должен содержать самое малое четыре сегмента. Следовательно, плоскогранная складчатая структура может состоять минимум из четырех граней, разделенных четырьмя линиями изгиба;

- определение максимально допустимого количества линий изгиба одного знака по отношению к линиям изгиба другого знака сводится к комбинаторной задаче определения предельного количества пересечений сторон n-сторонника, решением которого являются зависимости вида:

$$\begin{cases} n^- \leq n - 3 \\ n^- + n^+ = n \end{cases}$$

$$n^-, n^+ \neq 0;$$

$$n \geq 4$$

где n^- – число линий одного знака; n^+ – число линий противоположного знака, n – общее число линий изгиба складчатой структуры. Из приведенной формулы следует, например, что количество линий выступов не может быть равно количеству линий впадин и каждая складчатая структура должна содержать как минимум одну линию изгиба с противополо-

жным по отношению к другим линиям знаком.

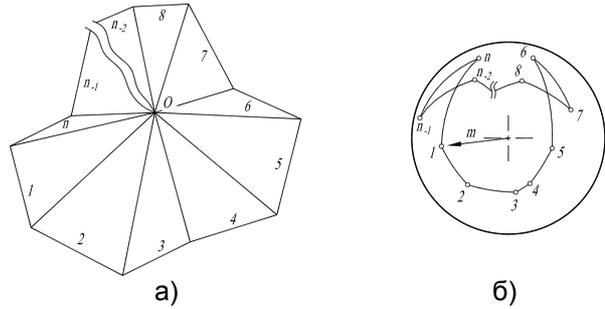


Рисунок 1 – Складчатая n-гранная структуры (а) и ее индикатриса Гаусса (б)

Кинематический анализ многогранника позволяет ввести понятие степени свободы W складчатой структуры, характеризующее количество параметров трансформирования, полностью определяющих ее рельефное состояние, и определить формулу Чебышева для складчатых структур следующим образом:

$$W_{fc} = n - 3. \quad (1)$$

Полученная зависимость говорит о том, что степень свободы складчатой структуры, содержащей одну вершину (одновершинника), на три единицы меньше числа ее граней. Например, для полного определения рельефного состояния четырехгранной складчатой структуры, помимо параметров внутренней геометрии требуется всего один параметр трансформирования, для пятигранной – два и т.д.

Исходными данными для построения математической модели n-гранного одновершинника являются параметры разметки – число n углов между соседними линиями изгиба, набор параметров трансформирования, а также комбинация свойств линий изгиба – какая из них является выступом, а какая впадиной. В рельефном состоянии такая складчатая структура, по сути, представляет собой невыпуклый n-гранный угол, сумма плоских углов при вершине которого равна 2π .

Согласно формуле (1) для полного описания n-гранной складчатой структуры требуется задать $n - 3$ параметров трансформирования. Если в качестве этих параметров выбрать величины двугранных углов, то задача математического описания рельефного состояния одновершинной складчатой структуры сведется к определению трех неизвестных двугранных углов.

Три неизвестных угла в n-гранном одновершиннике могут быть распределены следующими способами:

- каждый искомый двугранный угол является обособленным (углы между заштрихованными гранями 2-3, 5-6, 8-9 на рисунок 1, а) и заключен между двумя известными двугранными углами;

- один искомый угол является обособленным, два других искомых угла являются смежными (рисунок 1, б);

- все три искомых угла являются смежными (рисунок 1, в).

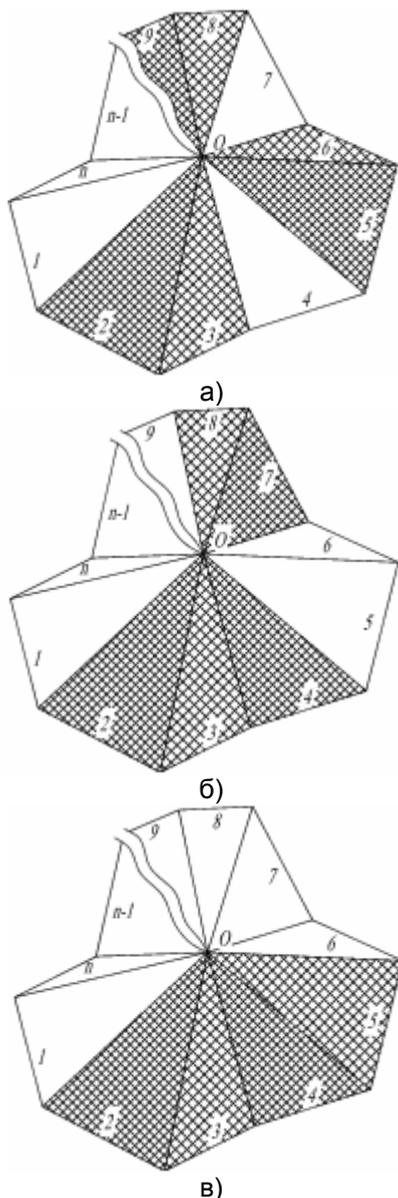


Рисунок 1 – Варианты размещения искомых двугранных углов: а – три обособленных; б – один обособленный и два смежных; в – три смежных

Анализ задачи показывает, что первый случай, обособленность каждого из искомых

двугранных углов, является общим и зависимости для определения каждого из неизвестных углов имеют вид следующей системы:

$$\begin{cases} \ddot{B} = \sum_{i=1}^u \ddot{b}_i + \sum_{j=1}^v \ddot{b}_j + (e \ddot{b} g) \\ \ddot{E} = \sum_{j=1}^v \ddot{e}_j + \sum_{k=1}^w \ddot{e}_k + (b \ddot{e} g) \\ \ddot{G} = \sum_{i=1}^u \ddot{g}_i + \sum_{k=1}^w \ddot{g}_j + (b \ddot{g} e) \end{cases} \quad (2)$$

Здесь первое и второе слагаемое каждого уравнения системы (2) представляет собой сумму двугранных углов при каждом ребре, полный двугранный угол которого неизвестен (три неизвестных ребра). Эта сумма определяется для каждого трехгранного угла, получаемого при обходе относительно неизвестного ребра в обе стороны (по часовой и против часовой стрелки). Третье слагаемое вычисляется на основании следующих зависимостей:

$$\begin{cases} \cos(e \ddot{b} g) = \frac{\cos(e g) - \cos(b e) \cos(b g)}{\sin(b e) \sin(b g)} \\ \cos(b \ddot{e} g) = \frac{\cos(b g) - \cos(b e) \cos(e g)}{\sin(b e) \sin(e g)} \\ \cos(b \ddot{g} e) = \frac{\cos(b e) - \cos(e g) \cos(b g)}{\sin(e g) \sin(b g)} \end{cases} \quad (3)$$

Все неизвестные в правой части уравнений системы (3) определяются по теореме косинусов для всех трехгранных углов, получаемых обходом вокруг каждого из трех неизвестных углов по- и против часовой стрелки.

В процессе написания программного кода выяснилось, что в данном алгоритме достаточно совершить обход только в одну сторону, в то время как недостающие данные вычисляются в конце каждого обхода. Таким образом, сложность алгоритма была понижена вдвое, что будет заметно в случае с большим числом граней и в случае, когда алгоритм будет доработан до решения задачи с многими вершинами.

Разработка интерфейса и инструментария пользователя. Интерфейс пользователя достаточно прост и в то же время удобен. На этапе ввода данных пользователь имеет дело с двумя списками: список плоских углов и список двугранных углов, которые он заполняет с учётом условия задачи. Если все данные были введены корректно, то по нажатию кнопки «Провести расчёт» пользователь

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЁТОВ ДЛЯ СИНТЕЗА СКЛАДЧАТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

получит выходные данные в текстовом режиме (рисунок 2, а) В случае некорректности исходных данных (так, например, сумма плоских углов при одной вершине не может быть отличной от 360°) пользователю будет указано на некорректность ввода и расчёты будут прерваны.

В то же время пользователь имеет возможность визуально изучить полученную складчатую структуру. Для этого он может открыть окно 3D-просмотра, и пользуясь бегунками поворота и смещения, рассмотреть полученную модель со всех ракурсов (рисунок 2, б). В следующих версиях для зумирования/панорамирования исследуемой структуры планируется использовать клавиши мыши.

Для решения задачи визуализации была использована библиотека OpenGL, что обеспечивает достаточное быстрое действие графики на маломощных ЭВМ.

Экономические аспекты и коммерциализация результатов работы. С целью оценки экономической эффективности предлагаемого программного средства были проведены сравнительные вычисления. Расчёты по определению двугранных углов простейшей пятилучевой складчатой структуры, выполненные вручную, потребовали около часа интенсивной работы. Следует учесть, что вычисления выполнялись в среде MS Excel, позволяющего выполнять некоторую элементарную автоматизацию рутинных операций.

Расчет девятилучевой структуры потребовал уже четырех часов кропотливого перебора всех комбинаций трехгранных углов и определения их геометрических параметров. Построение имитационной модели указанных одновершинников увенчалось успехом только для пятилучевой структуры и потребовало около двух часов напряженной работы квалифицированного специалиста. Модель девятилучевой складчатой структуры, требующей шесть независимых параметров трансформирования, вела себя крайне нестабильно и не могла быть использована для проверки найденных углов во всем диапазоне изменения исходных параметров. Имитационное моделирование выполнялось в среде параметрической САПР SolidWorks.

С этой точки зрения автоматизированный расчет и моментальная визуализация синтезируемой структуры в разработанном программном комплексе, где время расчета сопоставимо со временем, затрачиваемым на ввод исходных данных, имеет огромное преимущество перед традиционными видами расчета и моделирования.

К настоящему моменту известно несколько различных схем изготовления складчатого заполнителя, включая синхронные, циклические, ручные. Все они относятся к изготовлению так называемого Z-гофра, имеющего в своей основе регулярную четырехгранную структуру.

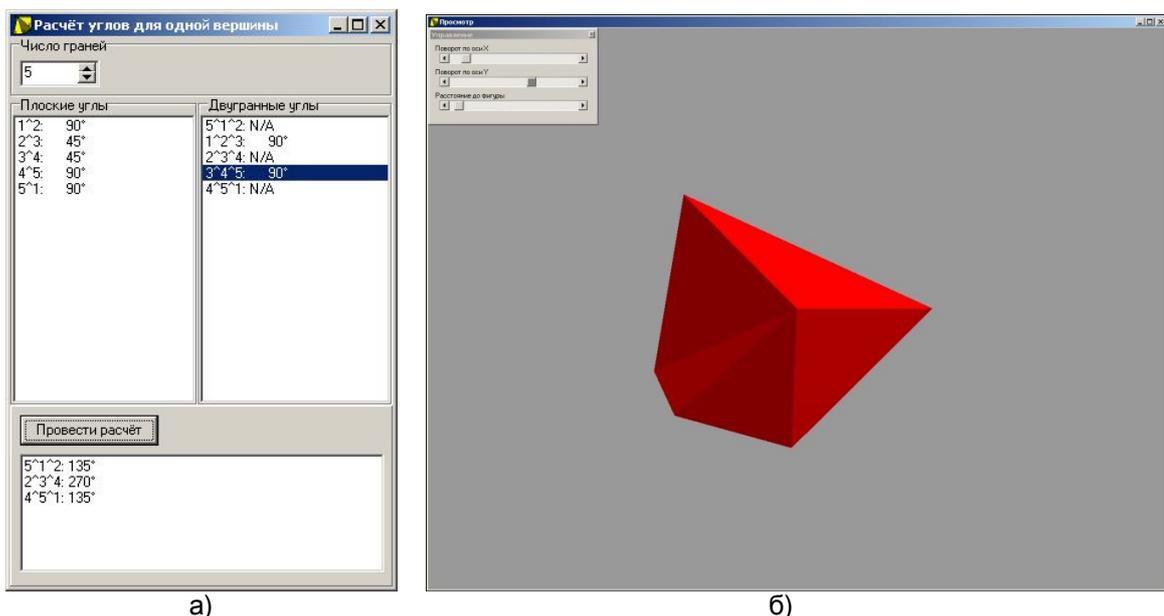


Рисунок 2 – Элементы интерфейса программы: а - окно ввода/вывода данных; б – визуализация расчетной структуры

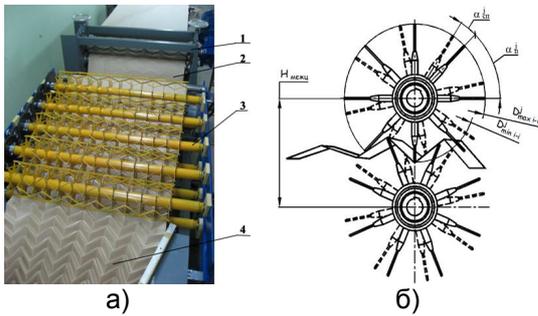


Рисунок 3 – Линия по производству складчатого заполнителя: а – общий вид: 1 – узел биговки-гибки; 2 – бигованная заготовка; 3 – узел складывания; 4 – складчатый заполнитель в рельефном состоянии; б – схема узла складывания

Разрабатываемое программное средство найдет применение во всех указанных схемах и на первом этапе будет использовано при проектировании элементов технологического оборудования, основанного на ротационных методах изготовления [7]. В частности, опытно-экспериментальная линия по производству складчатого заполнителя стеновых панелей в малоэтажном строительстве, разработанная ООО «НИЦВТ» (г. Казань), имеет в своем составе узлы биговки-гибки и складывания (рисунок 3, а), требующие переналадки при изменении типоразмера выпускаемого гофрополотна. Переналадка сопряжена с большим объемом вычислений и пересчетом конструктивных размеров исполнительных механизмов (б). Производительность линии 5 метров в минуту гофрированного полотна шириной 550 мм и высотой 50 мм. Научно-технические решения, использованные в линии, защищены патентом на интеллектуальную собственность [8].

Таким образом, коммерциализацию разрабатываемого программного средства предполагается выполнять путем сокращения времени, необходимого для переналадки

имеющегося оборудования и повышения качества работ за счет исключения вероятных ошибок. Также планируется дальнейшее развитие программного средства за счет разработки алгоритма расчета и средств визуализации многовершинных n-гранных складчатых структур, в том числе, неплоскогранных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zakirov I.M., Alexeev K.A. New Folded Structures for Sandwich Panels // SAMPE 2006 Technical Conference Proceedings: Creating New Opportunities for the World Economy, Long Beach, CA, April 30-May 4, 2006. Society for the Advancement of Material and Process Engineering, CD-ROM — 11 pp. , 2006.
2. Халиулин В.И. Геометрическое моделирование при синтезе структур складчатых заполнителей многослойных панелей. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 1995. С. 31-40.
3. Закиров И.М., Алексеев К.А. Определение параметров четырехлучевой спиралевидной складчатой структуры. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2005. № 4. С. 57-62.
4. Basily B.B., Elsayed E.A. Design and Development of Lightweight Sandwich Structures with Innovative Sheet Folded Core. // Seventh International Conference on Production Engineering and Design for Development, Ain Shams University, Cairo, Egypt. 2006.
5. Drechsler K., Kehrle R. Manufacturing of folded core-structures for technical applications // SAMPE EUROPE International Conference, Paris. , 2004. С. 508–513.
6. Гаусс К. Ф. Общие исследования о кривых поверхностях. В сборнике: Основания геометрии, М., ГИТТЛ, 1956. С.122-161
7. Zakirov I.M., Nikitin A.V., Alexeev K.A., Mudra C. Folded structures: performance, technology and production // SAMPE EUROPE International Conference, Paris. , 2006. С. 234-239.
8. Патент РФ (RU) 2341347 МПК В21D 13/00 Способ изготовления шевронного заполнителя и устройство для его осуществления / И.М. Закиров, А.В. Никитин, Н.И. Акишев, 2006, Б.№35.