

УДК 621.983.001

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБТЯЖКОЙ ОБВОДООБРАЗУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ МИНИМАЛЬНОЙ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ

© 2012 В. А. Михеев¹, Ю. С. Клочков¹, А. А. Кузина¹, А. Ф. Гречникова², Д. В. Савин¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²ОАО «Самарский металлургический завод»

Существующие способы обтяжки не способны обеспечить получение обводообразующих оболочек двойной кривизны минимальной разнотолщинности. Однако применение гибкого аппарата математического моделирования поверхностей самолётов и обшивок позволит выполнить все необходимые расчёты и предложить последовательную схему, совмещающую две операции обтяжки с промежуточной разгрузкой и разгибом полученной на первой обтяжке оболочки требуемой геометрической формы.

Формообразование обтяжкой, последовательная схема, обводообразующая оболочка, минимальная разнотолщинность.

Обшивки летательных аппаратов (ЛА) представляют собой крупногабаритные и тонколистовые детали. К самой обшивке предъявляются повышенные требования по качеству обводообразующей поверхности, связанной с формой оболочки двойной кривизны. Наиболее характерным свойством данного типа деталей является их малая жёсткость. Тонколистовая оболочка под действием собственного веса изменяет свою форму и не может быть носителем размеров для увязки узлов и деталей самолёта. При этом их несущая способность и прочность определены толщиной листовой заготовки. Значительные габаритные размеры обшивок, а также сравнительно малое их число на самолётах определили особые требования к автоматизированным средствам их производства.

Обтяжка относится к формообразующим операциям, связанным с увеличением площади листовой заготовки с последующей локализацией растяжения в опасном сечении детали. В результате листовая заготовка быстро утоняется и разрушается, что и является причиной высокого брака и больших технологических отходов. Причиной локализации растяжения листовой заготовки является, прежде всего, неравномерность деформации из-за сложной формы оболочки и влияния сил трения. Чаще всего локализация растяжения при обтяжке происходит на участке схода листовой заготовки с пуансона перед зажимными

устройствами обтяжного пресса. При этом утонение, возникающее при обтяжке листовой заготовки, не зависит от самой схемы обтяжки, а зависит от условий трения, толщины листовой заготовки и её термообработки. В технических условиях показано, что изменение толщины листовой заготовки при обтяжке ограничивается 20% от номинальной толщины листа, что связывается с её прочностью в изделии. Однако, как показала практика, изменение толщины стенки обводообразующей обшивки от 0 до 20% усложняет сборку и не всегда обеспечивает точность аэродинамического обвода ЛА.

Многие производители авиационной техники традиционно собирают самолёты по схеме «от обвода», с большим объёмом пригонки деталей, в том числе обшивок, «по месту». Известно, что высокая и стабильная точность может быть обеспечена, если сборка самолёта имеет принципиально иную схему - «от каркаса», что даёт существенный выигрыш в трудоёмкости сборки и качестве обводообразующих поверхностей самолёта [1]. Всё выше сказанное предъявляет новые требования к процессам обтяжки и приводит к необходимости разработки нового метода геометрического моделирования поверхностей оболочек различных форм, а также нового способа формообразования равнотолщинной оболочки двойной кривизны. Новый способ реализует совмещение двух операций обтяжки,

разделённых разгрузкой и разгибом, по последовательной схеме.

Именно равнотолщинная оболочка двойной кривизны сможет обеспечить сборку самолёта «от каркаса». В результате будет обеспечена геометрическая взаимозаменяемость, под которой понимают идентичность деталей, входящих в сборочную единицу, по геометрическим размерам и формам. Известно, что детали, входящие в одну сборочную единицу, можно изготавливать независимо друг от друга. Однако этот принцип применяется при изготовлении жёстких деталей, не меняющих размеры и форму под собственным весом, а также детали, не входящие в аэродинамические обводы ЛА.

На сегодняшний момент стык этапов проектирования и получение равнотолщинной обшивки является основным препятствием широкого применения интегрированных информационных технологий на отечественных авиационных предприятиях. Поэтому рациональная организация производства самолётов с учётом достижений в области новых технологий обтяжки относится к числу тех основных факторов, которые могут оказать существенное влияние на себестоимость и трудоёмкость изделий. Именно информационные технологии и обеспечивают решение данной проблемы [2].

Применение информационных технологий позволит в результате расчётов подбирать аналитические контура обводообразующих оболочек и сравнивать их с исходным набором данных. Полученная информация даёт возможность исследовать характер поверхности, степень плавности обводов и получить оптимальные теоретические контуры самого изделия. Другими словами среди бесконечного множества различных линий контуров оболочки имеются некоторые, обладающие особо важными свойствами, и к ним относятся линии главных кривизн. Выбор сети линий главных кривизн упрощает переход к теории оболочек, где отмечается, что линии данной поверхности получаются наиболее простыми, а именно: дугами окружностей, элементами контуров эллипса,

параболы и гиперболы. В результате, оболочка двояковыпуклой формы рассматривается как эллиптическая оболочка двойной кривизны [3]. В статье ограничимся рассмотрением оболочки двояковыпуклой формы значительной двойной кривизны, которая является обшивкой внешней поверхности мотогондолы двигателя самолёта.

В действительности геометрическая модель эллиптических оболочек двойной кривизны описывает соотношения между аэродинамическими свойствами контуров обшивки в системе координат самолёта и характеристиками геометрической формы оболочки. Данные этой модели в виде описания направляющих и образующих поверхности используются для графического отображения объекта проектирования, а также для разработки технологической оснастки и программ их обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

В настоящее время в результате разработок в области прикладной геометрии появились методы, позволяющие описывать на ЭВМ поверхности оболочек более сложных геометрических форм. Однако эти методы должны соответствовать процессам проектирования оснастки и изготовления обводообразующих оболочек в штамповочном производстве, обеспечивать минимальные затраты на подготовку исходных данных и экономно использовать ресурсы памяти ЭВМ. Кроме того, эти методы должны обеспечить простоту алгоритмов расчёта не только координат поверхности, но и дифференциально-геометрических и технологических параметров: нормалей, касательных, эквидистант, эвольвент, кривизн, размеры заготовок, величины деформации и т.д.

Предлагается метод построения математической модели поверхности обводообразующих оболочек, которая может быть оформлена в виде теоретического чертежа с указанием направляющих и образующих поверхности в определенной системе координат.

Для определения геометрических параметров оболочки двойной кривизны необходимо построить её пространственную

3D модель на ЭВМ. Направление обтяжки совместим с одной из ортогональных плоскостей симметрии F_1 , которая определяет продольный формообразующий контур сечения поверхности оболочки, проходящий через точку O . При этом вторая плоскость симметрии F_2 , ортогональная первой, определяет положение центрального поперечного сечения поверхности оболочки, также проходящего через точку O . Точка O в данном случае рассматривается как эллиптическая точка и представляет собой полюс поверхности оболочки двойной кривизны двояковыпуклой формы. На рис. 1 показана поверхность оболочки двойной кривизны двояковыпуклой формы, имеющая отношение длины (L) к ширине (B) выбранной листовой заготовки меньше единицы и двойной угол охвата заготовки обтяжного пуансона в направлении обтяжки $2\alpha_K$, равный 180° .

В результате создаются условия геометрической увязки сопрягаемых поверхностей обводообразующих оболочек и обтяжных пуансонов по принципу симметрии, определяемому плоскостями симметрии F_1 и F_2 . Тогда под математической моделью поверхности оболочек будем понимать совокупность алгоритмов и числовых данных, необходимых и достаточных для однозначного определения дифференциально-геометрических параметров характерных сечений и точек анализируемой поверхности.

Точность образования обводов достигнута за счёт применения ЭВМ, когда в процессе расчёта подбирается аналитическая кривая контура и сравнивается с исходным набором данных. Автоматизация расчётов и преобразование геометрических параметров в цифровую информацию позволяют применить обработку обтяжных пуансонов на станках с ЧПУ.

Однако достигнутая точность обработки обтяжного пуансона не решает проблему целиком, поскольку необходимо обеспечить регламентируемый допуск на изменение толщины при обтяжке листовой заготовки. Всё это предъявляет новые требования к технологии производства обводообразующих оболочек ЛА и приводит

к необходимости разработки новых технических и технологических решений, обеспечивающих изготовление обводообразующих оболочек минимальной разнотолщинности [4,5].

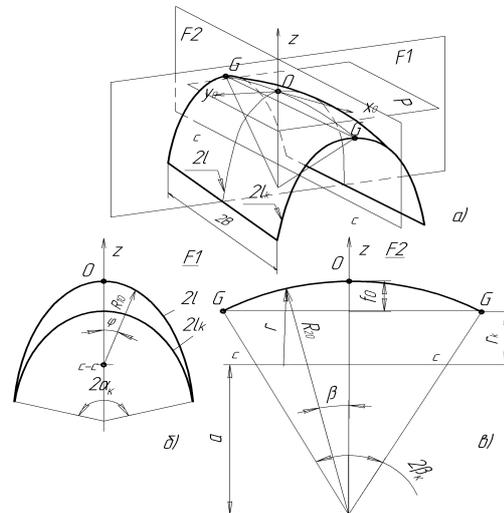


Рис. 1. Оболочка двояковыпуклой формы значительной двойной кривизны (элемент обшивки внешней поверхности мотогондолы двигателя самолёта)

Первоначальным этапом в моделировании последовательной схемы формообразования обтяжкой является подготовка геометрических моделей элементов, участвующих в процессе, листовой заготовки, пуансона, а также детали, которую необходимо получить - оболочки двойной кривизны. Оболочка двойной кривизны имеет довольно сложную геометрическую форму, которую трудно описать стандартными средствами поверхностного моделирования комплекса ANSYS/LS-DYNA.

С этой целью целесообразно использовать специализированную CAD - систему, такую как Компас-3D. Модель детали является прообразом модели пуансона, при этом учитываются размеры участков прямого схода последнего. Учитывая, что одной из особенностей LS-DYNA является необходимость разбиения на конечные элементы и абсолютно твёрдые тела, пуансон представлен в виде поверхности (оболочки), непосредственно контактирующей с заготовкой. При построении модели заготовки учитываются размеры участков зажима - участков листовой заготовки, находящихся в процессе формообразования в зажимах обтяжного

пресса. Важной частью последовательной схемы формообразования обтяжкой является перемещение зажимов обтяжного пресса по необходимой траектории. Все траектории движений аппроксимируются достаточным количеством точек, которые будем называть шагами. Для удобства моделирования процесса на всём его протяжении используется сквозная нумерация шагов, разбивающая весь процесс на 84 шага.

Созданная ранее в модуле поверхностного моделирования системы Компас-3D геометрия импортируется в среду Ansys с помощью формата IGES. Необходимо учесть, что размерность импортируемой модели - миллиметры, в то время как размерность, применяемая в среде Ansys, - метры. Для согласования размерности геометрию необходимо масштабировать исходя из соотношения 1:1000. Построение сетки конечных элементов производится с использованием построенных поверхностей. При разбиении физической модели на конечные элементы использовалось упорядоченное разбиение на четырёхугольные элементы. Продольные и поперечные линии кривизны поверхностей оболочки, пуансона, а также и сама заготовка разбивались на 100 сегментов каждая, что соответствует разбиению на 10000 элементов.

Было проведено большое количество численных экспериментов, в результате которых получена оптимальная кинематическая модель последовательной схемы формообразования обтяжкой. Была проведена серия заключительных численных экспериментов, в которых варьировались различные внешние и внутренние параметры. К внешним параметрам относятся коэффициенты трения различных облицовок обтяжного пуансона и коэффициентами анизотропии свойств листового материала.

Для первичного анализа результатов численных экспериментов значения эффективной деформации и толщины оболочки рассматривались по ходу последовательной схемы в характерных точках и в соответствующих им элементах (рис. 2):

- элемент А с порядковым номером 4991 - характерная точка на краю детали;
- элемент В с порядковым номером 4951 - характерная точка в полюсе оболочки;
- элемент С с порядковым номером 9551 - характерная точка на сходе оболочки.

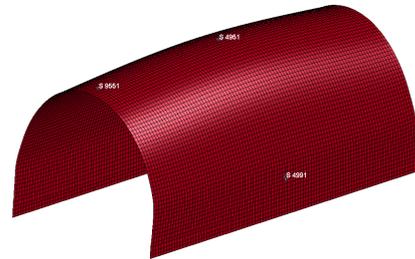


Рис. 2. Расположение элементов в характерных точках

К внутренним параметрам относятся кинематические угловые значения, связанные с углом охвата обтяжного пуансона и с углом разгиба оболочки между операциями обтяжки, создаваемые за счёт перемещения зажимов листовой заготовки. Выбор значений угловых параметров осуществляется с учётом следующего:

- учитывается локализация деформирующих сил в районе полюса обтяжного пуансона на первой операции обтяжки за счёт перераспределения нагрузки со стороны плоских участков пуансона;
- учитываются особенности формообразования центрального участка оболочки на начальной стадии первой операции обтяжки, на которой сохраняется локализация деформирующих сил в районе полюса обтяжного пуансона;
- учитываются особенности оболочки двойной кривизны, связанные с тем, что её поверхности при изгибании остаются неизменными так же, как её гауссова кривизна, хотя главные кривизны меняются обратно пропорционально.

На рис. 3 приведена «симметричная» палитра распределений значений деформаций и толщины по средней поверхности оболочек. Это указывает, прежде всего, на возможность управления процессом формообразования оболочки и её утонением. Что касается количественной оценки получаемых значений деформаций и толщины, то для этого существуют характерные элементы А, В, С.

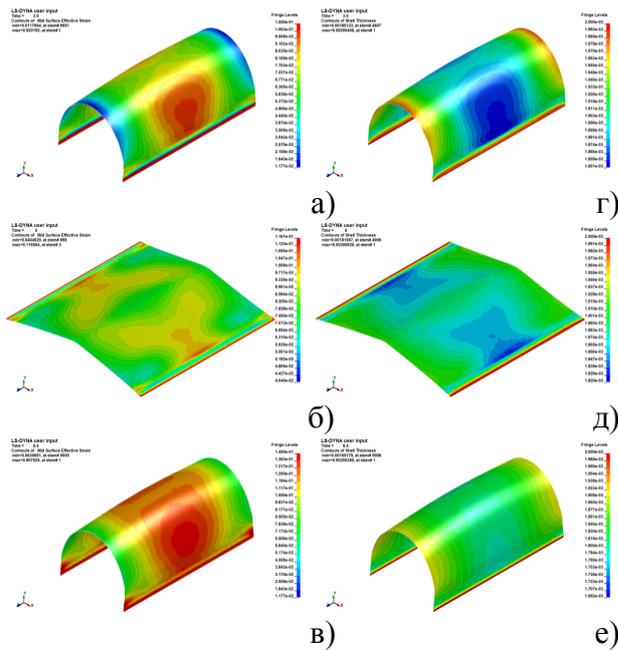


Рис. 3. Распределения данных численного эксперимента на следующих этапах: после первой обтяжки на угол 90° (а, г), после разгиба детали на угол 12° и её растяжения (б, д), в конце операции формовки (в, е); а, б, в - распределение эффективных деформаций по средней поверхности оболочки; г, д, е - распределение толщины оболочки

Полноценную количественную информацию несут графики изменения эффективных деформаций по средней поверхности оболочки и толщины оболочки в её характерных точках в зависимости от временного вектора совмещённых операций по последовательной схеме (рис. 4).

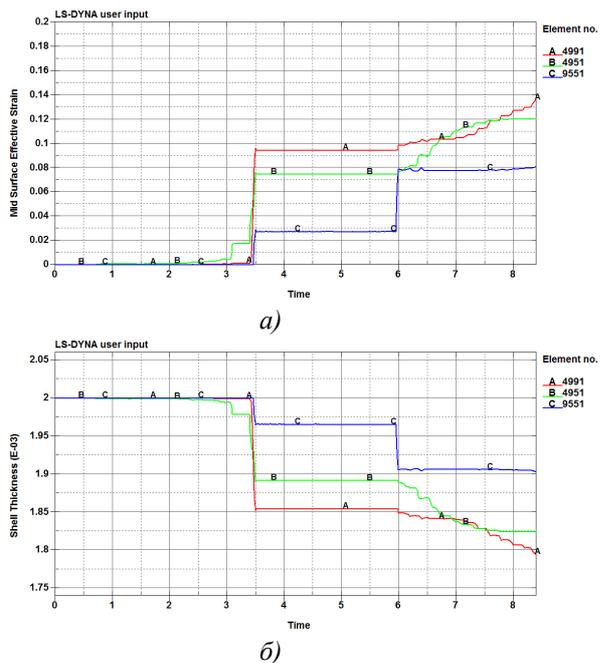


Рис. 4. Графики изменения эффективных деформаций по средней поверхности оболочки (а) и толщины оболочки (б) в её характерных точках

В количественном выражении приведённый численный эксперимент является наилучшим. Это связано с тем, что значения толщин оболочки в конце схеме принимают следующие значения: А - 1,903 мм; В - 1,823 мм; С - 1,795 мм. Соответственно, поперечная разнотолщинность (между точками А и В) составляет 0,080 мм, а продольная разнотолщинность (между В и С) составляет 0,028 мм.

Для анализа всех значений толщин оболочки был выбран программный комплекс Minitab предназначенный для обработки статистических данных. Minitab часто используется в сочетании с применением методики «Шесть сигма». Для построения диаграмм в программном продукте Minitab использовалась процедура анализа воспроизводимости для нормального воспроизведения (Capability Analysis Normal). При построении задавались допуском на толщину детали $T = \pm 0,2$ мм. По оси абсцисс откладываются значения толщин оболочки, а по оси ординат частота их повторения. При построении гистограммы программа автоматически определила количество и высоту столбцов по частоте попадания данных по толщине в этот интервал. Затем на гистограмме были определены верхняя и нижняя предельные значения нормы, а программа автоматически построила кривую распределений данных по частоте. В результате легко понять вид распределения гистограммы (рис. 5).

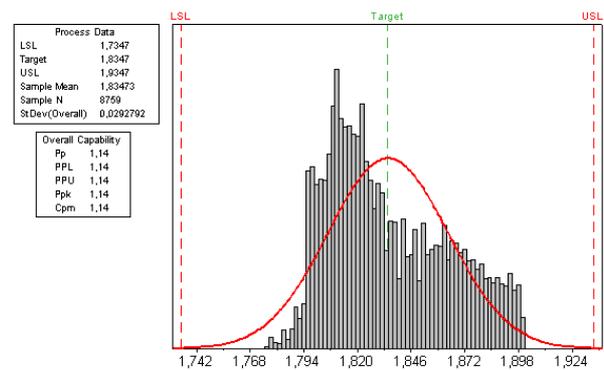


Рис. 5. Диаграмма «Шесть сигма» для приведенного численного эксперимента

В анализ диаграмм "Шесть сигма" входят расчёты следующих статистических параметров: среднее значение толщины по

поверхности оболочки \bar{h} , среднеквадратичное отклонение толщины S и коэффициент годности C_p . Кроме того, для каждого численного эксперимента были определены нижние и верхние границы допуска, так называемые контрольные нормы S_L и S_V . При известном численном значении коэффициента годности был выполнен анализ воспроизводимости процесса формообразования обтяжкой. Для этого были рассмотрены пять интервалов C_p . В частности, в диапазоне $1,00 \leq C_p < 1,33$ выявлено шесть численных экспериментов, из которых только два выполнены без гофрообразования, в том числе и приведённый, который является наилучшим.

Библиографический список

1. Барвинок, В.А., Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов: Учебник для студентов высших технических заведений [Текст] / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, П.А. Бордаков, Б.П. Пешков,

И.Н. Желтов, И.А. Докукина. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.

2. Махитько, В.П. Интегрированная информационно-коммуникационная система проектирования и производства воздушных судов [Текст] / В.П. Махитько. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2009. – 384 с.

3. Филин, А.П. Элементы теории оболочек [Текст] / А.П. Филин. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 384 с.

4. Михеев, В.А. Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании обтяжкой обводообразующих оболочек двойной кривизны [Текст] / В.А. Михеев // МНТК Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – Самара: СГАУ, 2003. – С. 91.

5. Михеев, В.А., Совершенствование процессов формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны [Текст] / В.А. Михеев, А.Ф. Гречникова, А.А. Кузина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. – Т.13, №4 (42). – С. 217 – 224.

MODELLING OF THE SEQUENTIAL POSITIVE SEQUENTIAL SCHEME OF FORMOOBRAZOVANYBYSTRETCH FORMING OF OBVODOOBRAZUYUSHCHY COVERS OF DOUBLE CURVATURE OF THE MINIMUM NONUNIFORM THICKNESS

© 2012 V. A. Miheev¹, Y. S. Klochkov¹, A. A. Kuzina¹, A. F. Grechnikova², D. V. Savin¹

¹Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

²ОАО "Samara Metallurgical Plant"

Existing ways of stretch forming aren't capable to ensure obvodobrazuyushchy covers of double curvature of the minimum nonuniform thickness. However use of the flexible device of mathematical modeling of surfaces of planes and coverings will allow to execute all necessary calculations and to offer the consecutive scheme combining two operations of covering with intermediate unloading and unbending by received on the first covering of a cover of the demanded geometrical form.

Formoobrazovaniye by stretch forming, the sequential scheme, obvodobrazuyushchy cover, the minimum nonuniform thickness.

Информация об авторах

Михеев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), E-mail: vamicheev@rambler.ru. Область