

Математическое моделирование процесса постановки соединительного вкладыша в отверстие трехслойной композитной конструкции

Ю.А. Вашуков¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Представлена математическая модель, определяющая зависимость конструктивных параметров процесса постановки соединительного вкладыша в отверстие трехслойной композитной конструкции на его деформированное состояние по внешнему диаметру. Материал вкладыша принимался как пластическое тело с нелинейным упрочнением. Модель адаптирована для реализации в стандартном конечно-элементном программном продукте ANSYS Mechanical, на котором проведено численное моделирование процесса постановки вкладыша.

1. Введение

Одной из важнейших проблем при проектировании и производстве аэрокосмических трехслойных конструкций является их соединение с другими элементами конструкций. Это связано с тем, что данные конструкции не выдерживают высокие сосредоточенные нагрузки, характерные для механических точечных соединений [1,2,3]. При неправильном выборе конструкций стыковочных элементов собранный агрегат может не выдержать расчетных нагрузок или будет тяжелее агрегата, изготовленного из панелей другого типа, даже если собственно сотовая панель легче панелей другого типа. В современных аэрокосмических конструкциях сосредоточенные нагрузки, прикладываемые к отдельным их участкам, передаются через специальные вкладыши. Для вкладышей при передаче нагрузок необходима их связь с обшивками трехслойных конструкций. Для закрепления вкладыша используются различные способы (Рисунок 1).

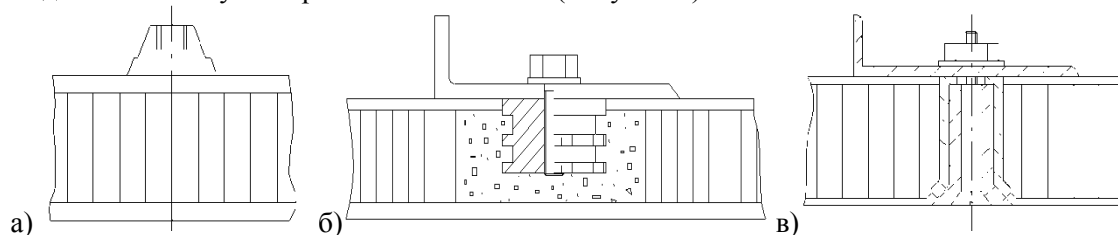


Рисунок 1. Способы закрепления вкладышей в отверстии трехслойной конструкции: а) сваркой; б) клеевым соединением; в) телескопическим соединением.

2. Постановка задачи

С целью повышения производительности процесса образования соединений «вкладыш – трехслойная конструкция» и снижения их массы соединения автором предложена конструкция вкладыша с проточкой (Рисунок 2). В процессе запрессовки данного вкладыша по его внешнему контуру образуется тороидальная поверхность, с помощью которой происходит закрепление крепежного элемента между верхней и нижней обшивками.

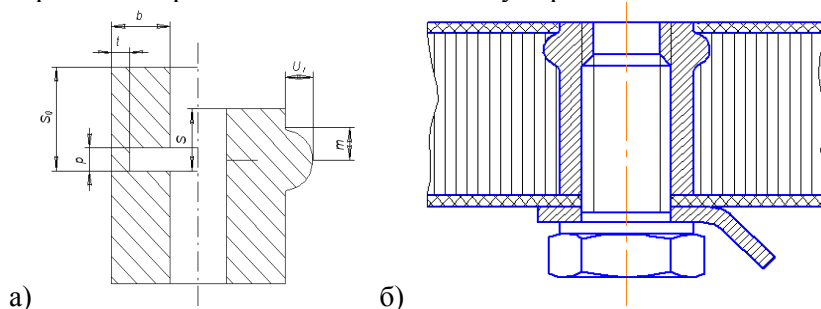


Рисунок 2. Конструкция вкладыша (а) и конструкция соединения «вкладыш-трехслойная конструкция» (б).

Для образования надежного соединения «вкладыш – трехслойная конструкция» необходимо точно знать размеры тороидальной поверхности. Это объясняется тем, что при меньших размерах тороидальная поверхность не будет касаться верхней обшивки и вкладыш не будет закреплен между обшивками. В случае если тороидальная поверхность будет иметь чрезмерно большие размеры, то может произойти, отрыв верхней обшивки от заполнителя. Это значительно снижает несущую способность соединения. Поэтому при постановке вкладыша необходимо знать влияние исходных геометрических параметров вкладыша на размеры тороидальной поверхности, а также работу и усилие осадки.

Проведенные предварительные экспериментальные исследования показали, что на величину и форму раздачи тороидальной поверхности оказывает влияние форма проточки. В связи с этим были проведены исследования по влиянию формы проточки на величину радиальной раздачи тороидальной поверхности. В процессе исследований на внутренней поверхности вкладыша делались полукруглые, в форме трапеции и прямоугольные проточки (Рисунок 3). Исследования проводились с использованием конечно-элементного программного продукта ANSYS.

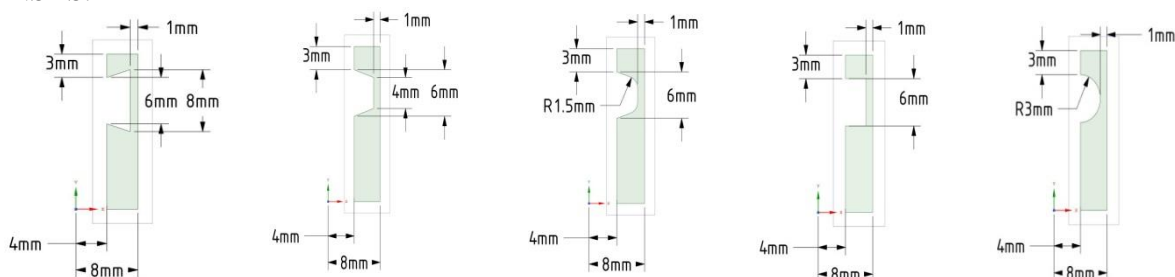


Рисунок 3. Формы проточек на внутренней поверхности вкладыша.

Проведенное конечно-элементное моделирование показало, что наибольшее радиальное перемещение по внешнему контуру вкладыша наблюдалось на вкладыше с прямоугольной проточкой (Рисунок 4).

3. Постановка математической модели

Предварительные экспериментальные исследования показали, что кинематика процесса осадки в значительной степени определяется конструктивными параметрами осаживаемого элемента и технологическими параметрами процесса осевого пластического сжатия. При осадке

крепежного элемента с проточкой по внутренней поверхности на форму тороидальной поверхности также оказывают влияние многочисленные факторы, а именно:

1. отношение ширины проточки к ее высоте t/p (рис.5);
2. отношение ширины проточки к толщине трубчатой заготовки t/b ;
3. степень деформации материала трубчатой заготовки в районе проточки S/S_0 .

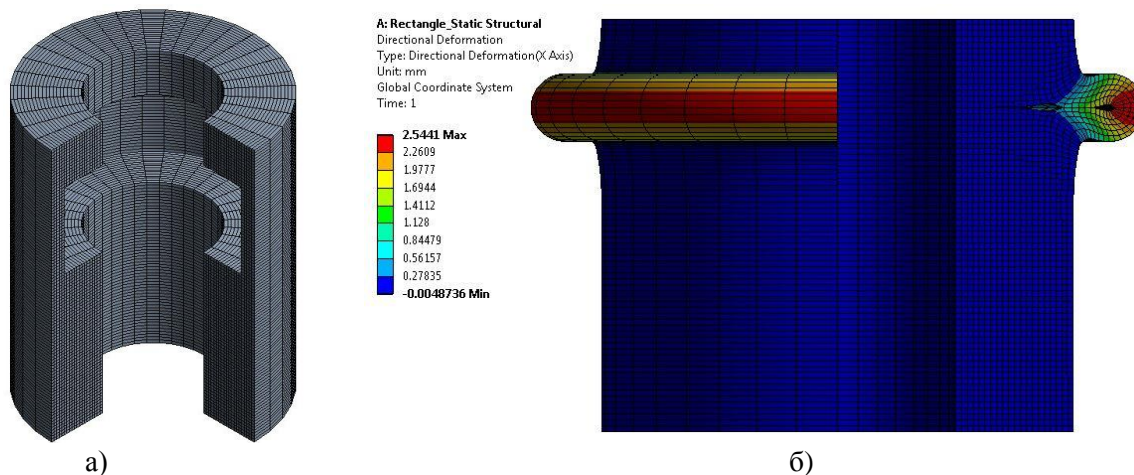


Рисунок 4. Конечно-элементная модель: а-конечно-элементная модель вкладыша с прямоугольной проточкой; б-конечно-элементная модель вкладыша после осевого сжатия.

Значимость влияния каждого фактора на форму тороидальной поверхности определялась по результатам экспериментальных исследований с помощью методики математического планирования эксперимента [4], За параметр оптимизации принималось соотношение $U = Ur/m$ (рис.5), где Ur - величина радиальной раздачи вкладыша по внешнему диаметру, m – половина тороидальной поверхности. От этой величины зависит крутизна тороидальной поверхности и жесткость закрепления вкладыша между обшивками в трехслойной конструкции. Предварительные исследования позволили определить значения технологических факторов при проведении экспериментальных исследований (таблица 1).

Для аппроксимации поверхности отклика была использована методика трехфакторного математического планирования второго порядка [4], при которой уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$y = b_0 = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \tag{1}$$

Таблица 1. Технологические факторы, исследуемые при осадке вкладыша.

факторы	t/p	t/b	S/S_0
Код	X_1	X_2	X_3
Нулевой уровень(0)	0,7	0,7	0,5
Интервал варьирования	0,2	0,2	0,3
Верхний уровень (+1)	0,9	0,9	0,8
Нижний уровень (-1)	0,5	0,5	0,2

На основании выбранного плана и приведенных расчетов на этапе кодирования производился перевод плана матрицы эксперимента в натуральные значения факторов. Реализация эксперимента производилась в соответствие с порядком проведения измерений после их рандомизации, с использованием таблиц случайных чисел [4].

При проверке равноточности измерений проводился анализ результатов эксперимента на предмет наличия отдельных грубых ошибок измерений и оценки дисперсии воспроизводимости экспериментальных данных. Расчеты, проведенные для исследуемого

процесса осадки, позволили установить величину коэффициентов уравнения регрессии и определить уравнение регрессии (математическую модель)

$$y = 0.2549 - 0.0247x_1 - 0.0189x_2 + 0.0283x_3 + 0.0341x_1^2 - 0.0159x_2^2 - 0.0159x_3^2 - 0.0194x_1x_2 + 0.0189x_1x_3 + 0.0466x_2x_3. \tag{2}$$

Для нахождения аналитических соотношений, определяющих деформированное состояние материала вкладыша, использовался принцип минимума полной энергии деформации и метода Ритца. Исходя из результатов предварительных экспериментальных исследований, радиальное перемещение по внешнему диаметру вкладыша представлялось в виде:

$$U_r = \frac{1}{2} aR \left(1 - \frac{y^2}{h^2} \right), \tag{3}$$

где a – варьируемый параметр.

Для нахождения параметра составлялось вариационное уравнение. С учетом граничных условий (рисунок 5) оно имело следующий вид:

$$\delta A_D = \delta A_{BH} + \delta A_{CP} + \delta A_{TPB}, \tag{4}$$

где, δA_{CP} и δA_{TPB} - вариации работ, соответственно внутренних сил, сил среза между областями А, В, С и сил трения по внутренней поверхности.

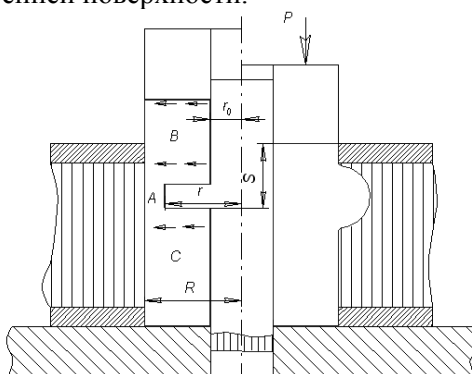


Рисунок 5. Схема деформирования вкладыша.

Используя (3) и выражение для полной энергии системы на основании (4) получим выражение для определения параметра a

$$a = \left[\frac{3\Psi \cdot h^2 \cdot r_0 \cdot \varepsilon_z^{1+h}}{3\sqrt{3} \left(1 - \frac{y^2}{h^2} \right)^{n+1} \cdot (R-r_0)^2 h - (R-r_0)^3 (n+1)} \right]^{\frac{1}{n}} \tag{5}$$

где $n = \varepsilon_z / (1 - \varepsilon_z)$; $\varepsilon_z = (h_0 - h) / h_0$; h_0 - первоначальная высота втулки с сегментами; h – высота втулки после деформации; Ψ - эмпирический коэффициент, учитывающий состояние трущихся поверхностей и форму очага деформации; R и r_0 - соответственно внешний и внутренний радиусы вкладыша.

Зная параметр a , из соотношения (3) можно выразить величину U_r . Из соотношения (5) с учетом экспериментальных данных через величину осевой деформации ε_z можно найти также величину деформирующего хода U вкладыша.

Полученные результаты теоретических исследований сравнивались с экспериментальными данными. На рисунке 6 показаны результаты экспериментальных исследований по определению деформированного состояния вкладыша и их сравнение с расчетными

значениями. Анализ полученных результатов показывает, что максимальное расхождение составляет 3-5 %.

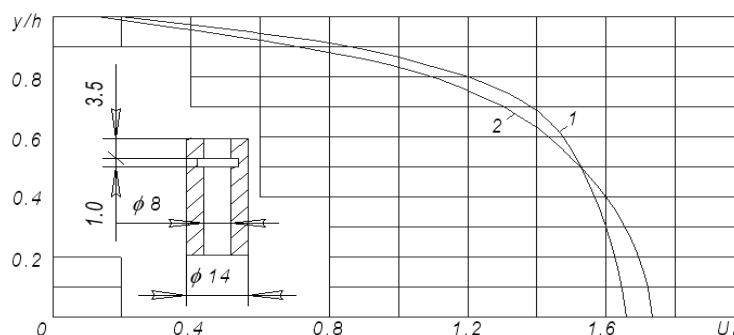


Рисунок 6. Сравнение расчетных и экспериментальных значений перемещений U_r по высоте: 1 – расчетное значение; 2 – экспериментальное значение.

4. Заключение

Разработана математическая модель, позволяющая по конструктивным параметрам осаживаемого элемента определить деформированное состояние его материала по внешнему контуру. Модель адаптирована для реализации в стандартном конечно-элементном программном продукте ANSYS Mechanical. Такая постановка многократно снижает объем численного моделирования, существенно снижает сложность анализа результатов при разработке технологического процесса образования соединения «вкладыш-трехслойная конструкция».

5. Литература

- [1] Ендогур, А.И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. – М.: Машиностроение. 1986. – 199 с.
- [2] Гагауз, П.М. Проектирование и конструирование изделий из композиционных материалов. Теория и практика / П.М. Гагауз, Ф.М. Гагауз, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда // Харьков Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского, 2015.
- [3] Сироткин, О.С. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники / О.С. Сироткин, В.И. Гришин, В.Б. Литвинов. – Москва: Машиностроение, 2006.
- [4] Ершов, В.И. Методология научного эксперимента в производстве аэрокосмической техники / В.И. Ершов, А.П. Петров // Теоретические основы авиа- и ракетостроения. – М.: Дрофа, 2005. – 784 с.
- [5] Вашуков, Ю.А. Моделирование деформированного состояния подкрепляющего элемента при его постановке в отверстие листовой детали из К.М. // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2004. – №2. – С. 62-65.

Mathematical modeling of placing the connecting liner process into the hole of a three-layer composite structure

Y.A. Vashukov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The mathematical model that determines the dependence of the design parameters of the connecting process of setting the liner in the hole three-layer composite structure on its strain state at the outer diameter. The liner material was accepted as a plastic body with nonlinear hardening. The model is adapted for implementation in a standard finite element software product ANSYS Mechanical, which conducted a numerical simulation of the process of setting the liner.