

**БАСКАКОВ**

Владимир Дмитриевич
кандидат технических
наук, доцент

**КУПЕРВАР**

Михаил Вячеславович
студент
кафедры «Технологии
ракетно-космического
машиностроения»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
e-mail: ferrom@mail.ru

Анализ деформаций в цилиндрической обечайке при наложении продольного сварного шва

В.Д. Баскаков, М.В. Купервар

Численными методами расчета проанализированы прогибы в обечайке вследствие усадки сварного шва. Установлены математические зависимости погрешностей формы обечайки от ее геометрических параметров. Установлены интервалы пригодности полученных зависимостей.

Ключевые слова: отклонение от прямолинейности, численный расчет, усадка сварного шва, деформации, факторный эксперимент.

Analysis of deformation in cylindrical cowling when making a longitudinal weld

V.D. Baskakov, M.V. Kupervar

The deflections in the cowling due to shrinkage of the weld have been analyzed by means of the numerical methods. The mathematical dependence between the shell shape error and its geometric parameters is established. The intervals where the results of regression equations are suitable are found.

Keywords: deviation from linearity, numerical calculation, shrinkage of weld, deformations, factorial experiment.

Одной из основных операций при сборке ракет является сварка обечайек продольными швами. При этом возникают нежелательные деформации в оболочке: отклонение образующей от прямолинейности и отклонение от круглости поперечного сечения. Все эти факторы вносят погрешности в конструкцию и ухудшают точность изготовления корпуса ракеты. В частности, вследствие отклонения от круглости на торце, усложняется процесс стыковки различных частей топливных баков ракет.

Традиционный процесс сварки обечайки производится на специальном стапеле. Несваренную цилиндрическую оболочку кладут на опоры, а сверху опирают на балку, прижимая к ней распределенной силой. В результате деформация детали происходит под воздействием нескольких факторов: усадки сварного шва после его остывания, силы тяжести, реакции опор.

Исследование силы и характера влияния различных факторов на свариваемую деталь позволит выявить математическую зависимость различных деформаций от размеров оболочки, материала, параметров сварочного стапеля. Анализ такой зависимости даст возможность минимизировать деформации и выявить оптимальные параметры данной операции.

Важным аспектом построения зависимости является анализ влияния усадки сварного шва на поперечные и продольные деформации. Полином, выражающий зависимость различных перемещений в оболочке от ее относительных размеров при неизменном материале и режимах наложения шва, позволит понять характер перемещений при различных размерах объекта производства.

В данной работе математические зависимости разрабатывались на основе результатов численных расчетов. Все расчеты проводились в программе Ansys Workbench, позволяющей рассчитывать на прочность статические системы с учетом их теплового взаимодействия.

В качестве объекта расчетов использовалась цилиндрическая обечайка постоянного радиуса R . При этом варьируемыми параметрами являлись ее толщина δ и длина L . Чтобы охватить весь спектр размеров типовых ракетных конструкций длина обечайки варьировалась в диапазоне 200...2000 мм, а толщина — 2...10 мм. Для получения математической модели удобнее работать с относительными значениями, поэтому в дальнейшем рассматривается относительная длина \bar{L} — длина, отнесенная к $2R$, и относительная толщина $\bar{\delta}$ — толщина, отнесенная к $2R$. Радиус принят постоянным и равным 0,5 м. В качестве материала обечайки выбран алюминиевый сплав АМгб.

Для оценки влияния только сварного шва на деформации не учитывалось влияние опор и силы тяжести. Еще одним допущением являлось то, что сварной шов накладывался мгновенно, т. е. временем работы сварочного аппарата и его движением вдоль оболочки пренебрегли. Сварной шов рассматривался как отдельный элемент, представляющий собой призму с сечением, рекомендуемым ГОСТ 15878—79. Температура сварного шва составляла 660 °С, а температура оболочки — 22 °С.

Для выбора конечно-элементной сетки были проведены предварительные исследования. По результатам этих исследований был установлен оптимальный размер ячейки при котором точность расчетов не хуже 5 % обеспечивалась наименьшим временем работы вычислительной машины. Обечайка рассматрива-

лась как тонкостенная оболочка: конечно-элементная сетка накладывалась по поверхности; размер ячейки составил 7% радиуса обечайки.

На первом этапе исследования была проведена серия расчетов, в которых длина обечайки варьировалась с шагом 300 мм, а толщина — с шагом 2 мм. В итоге получили 35 вариантов оболочек с различными длинами и толщинами. На рисунке 1 представлена деформированная сварным швом обечайка, толщиной 2 мм и длиной 800 мм. Во всех случаях наблюдалась идентичная картина деформирования. Образующая цилиндра изгибалась, т. е. центральная часть уходила внутрь, а края поднимались. На торце сечение приобретало характерную форму с выраженными точками максимума отклонений от начального профиля.

Основная задача при анализе данных — построение полинома, описывающего зависимость всех исследуемых параметров от двух факторов: толщины δ оболочки и ее длины L .

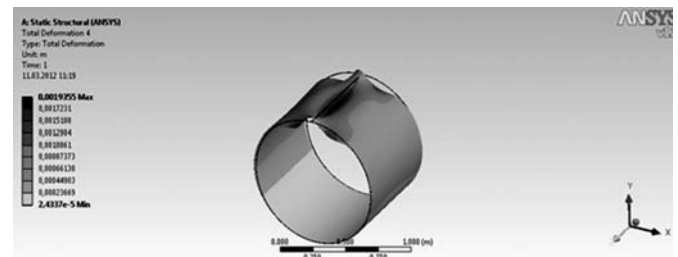


Рис. 1. Перемещения в оболочке при $\delta = 2$ мм, $L = 800$ мм

По результатам расчетов были проанализированы отклонение от круглости на торце оболочки и отклонение от прямолинейности образующей. Показателем отклонения от круглости поперечного сечения в обечайке принята сумма наибольших расстояний от точек профиля после деформаций до первоначального их положения, сместившихся «внутрь» и «наружу» окружности, взятых по модулю. Для измерения отклонения от круглости на торце считали разницу между перемещением в верхней точке сечения и во впадинах по краям оболочки. Это определило наибольший перепад отклонений от начальной окружности на торце. Для измерения отклонения от прямолинейности образующей определяли разницу перемещений

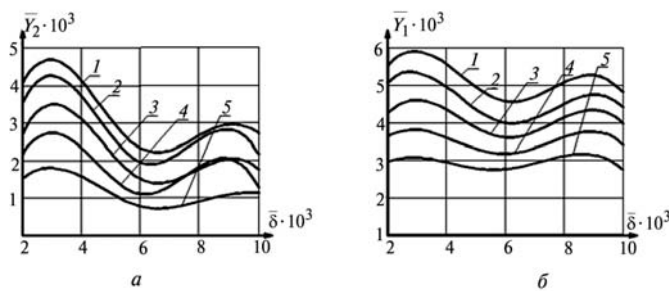


Рис. 2. Зависимость отклонения от круглости на торце (а) и отклонения от прямолинейности (б) от относительной толщины $\bar{\delta}$ оболочки:

1 — $\bar{L}=2$; 2 — $\bar{L}=1,7$; 3 — $\bar{L}=1,4$; 4 — $\bar{L}=1,1$;
5 — $\bar{L}=0,8$

сварного шва на торце и в середине, что давало наибольшее отклонение от прямой линии.

В результате расчетов были построены зависимости исследуемого параметра (отклонение от круглости и отклонение от прямолинейности) от относительной толщины оболочки при различных ее относительных длинах (рис. 2).

Для анализа полученных результатов применим методику полного факторного анализа, в котором реальный эксперимент заменяется численным расчетом [1]. Область определения фактора $\bar{\delta} = 0,002...0,01$; фактора $\bar{L} = 0,2...2$.

Далее задавались интервалы варьирования. В интервалах относительных толщин $0,004—0,008$ при относительных длинах $1,1—1,7$ наблюдается линейность зависимостей перемещений. Поэтому в качестве интервалов варьирования выберем $0,004—0,008$ для относительных толщин и $1,1—1,7$ для относительных длин. Данные интервалы являются средними, что обеспечит достаточную точность для нашего эксперимента. Основными уровнями будут средние значения в интервалах варьирования, т. е. $0,006$ для относительной толщины и $1,4$ для относительной длины.

Для построения полиномов необходимо перейти от реальных значений параметров к кодированным [1]. При этом каждому реальному значению параметра ставилось в соответствие число. Для основного уровня — это 0. Нижняя граница интервала варьирования — -1 , а верхняя — $+1$. Тогда для относительных толщин пересчет выглядит так: $0,004—(-1)$, $0,006—0$, $0,008—1$, а для длин $1,1—(-1)$, $1,4—0$, $1,7—1$.

$$X_p = X_p^{\text{осн.ур}} + X_k (X_p^{\text{max}} - X_p^{\text{осн.ур}}),$$

где X_p — реальное значение фактора; $X_p^{\text{осн.ур}}$ — реальное значение основного уровня фактора; X_k — кодированное значение фактора; X_p^{max} — реальное значение верхней границы интервала варьирования.

Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Номер расчета	Кодированное значение фактора		Относительное значение отклонения	
	относительно толщины X_1	относительно длины X_2	от прямолинейности $\bar{Y}_1 \cdot 10^3$	от круглости $\bar{Y}_2 \cdot 10^3$
1	-1	-1	3,605	3,319
2	+1	-1	3,624	2,840
3	-1	+1	4,948	4,701
4	+1	+1	4,507	3,558

Примечание. X_1 и X_2 — кодированные значения факторов относительной толщины и относительной длины соответственно; \bar{Y}_1 и \bar{Y}_2 — относительные значения отклонений от прямолинейности и от круглости на торце соответственно.

Для определения коэффициентов полинома достаточно четырех экспериментов. Остальные данные будем использовать для анализа гипотезы связи между изменяемыми факторами и исследуемыми величинами.

Общий вид полинома [1]:

$$\bar{Y}_1 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2,$$

где b_i — безразмерные коэффициенты.

Таблица 2

Значения коэффициентов в полиноме

Отклонение	$b_0 \cdot 10^3$	$b_1 \cdot 10^3$	$b_2 \cdot 10^3$
От прямолинейности	4,171	0,1055	0,5565
От круглости	3,855	0,4055	0,5250

Значение коэффициента при каком-либо факторе показывает его влияния на измеряемый параметр. Чтобы определить реальное значение параметра следует имеющимся реальным значениям факторов сопоставить кодированное значение и подставить его в соответствующий полином.

Для того чтобы понять подходит ли полином для предсказания значений параметров при различных изменениях факторов необходимо определить показатель связи между варьируемым фактором и конечным результатом — коэффициент детерминации [2].

Расчеты показали, что для отклонения от прямолинейности образующей коэффициент детерминации равен 0,91, для отклонения от круглости — 0,81.

Была проведена проверка пригодности данных полиномов на более широком интервале размеров: 200...2000 мм для длины и 2...10 мм для толщины. Для этого каждому реальному значению параметра ставилось в соответствие кодированное значение, рассчитанное относительно интервала варьирования [1]. По расчетам коэффициент детерминации для отклонения от прямолинейности равен 0,9, а для отклонения от круглости — 0,5. Следовательно, полином для отклонения от прямолинейности дает достаточную точность определения параметра на всем диапазоне размеров обечаек, а полином для отклонения от круглости пригоден только на интервале варьирования.

По данному анализу можно сделать вывод, что для отклонения от прямолинейности образующей построенный полином в достаточной степени отражает зависимость от толщины и длины в пределах области определения факторов. Для описания отклонения от круглости целесообразно повысить степень полинома.

Анализ полинома \bar{Y}_1 показывает, что конструктивные параметры влияют на погрешность

формы сварной обечайки разнонаправлено, но степень их влияния различна, что не противоречит очевидным представлениям о характере деформирования обечайки при сварке.

Полученные результаты являются предварительными и служат основой для построения методики определения потребной силы закрепления края обечайки при наложении продольного сварного шва.

Выводы

1. Численными расчетами в программе Ansys Workbench установлено, что при выполнении продольного сварного шва у цилиндрической обечайки возникает отклонение от прямолинейности образующей в районе сварного шва, а также отклонение от круглость формы поперечного сечения. Края сварного шва поднимаются, а середина проседает. При этом на торце образуется характерное сечения с выраженными максимумами прогибов к центру и от центра обечайки.

2. На основе результатов численных расчетов, проведенных по методике планирования экспериментов, установлена линейная зависимость прогиба образующей обечайки при сварке от ее относительной длины и толщины стенки. Эти зависимости позволяют решать прямые задачи оценки указанных погрешностей: по заданным значениям конструктивных параметров обечайки.

Литература

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
2. Еришов Э.Б. Распространение коэффициента детерминации на общий случай линейной регрессии, оцениваемой с помощью различных версий метода наименьших квадратов (рус. англ.) // ЦЭМИ РАН Экономика и математические методы. М.: ЦЭМИ РАН, 2002. Вып. 3. Т. 38. С. 107—120.

Статья поступила в редакцию 02.05.2012