

Д.Г. Шерстюк, А.В. Кулик, А.М. Май

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЕЧАЕК  
В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО КАЛИБРОВАНИЯ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА НЕКРУГЛОСТИ**

*Аннотация. Исходя из жестких требований к геометрической точности (крупногабаритных тонкостенных сварных конструкций) обечаек, возникает необходимость введения строгих требований точности в технологический процесс термомеханического реализуя системное моделирование технологического процесса на основе аналитического расчета некруглости, с помощью комбинации существующих методик в государственных и отраслевых стандартах.*

*Локальные искажения формы приводят к нежелательной деформации вафельного фона оболочек и образованию очагов остаточных напряжений.*

*Ключевые слова: термомеханическое калибрование, некруглость, обечайки, аналитический расчет.*

**Постановка проблемы.** Определение ключевых параметров и системное моделирование технологического процесса на основе существующих методик аналитического расчета локальной и общей некруглости (крупногабаритных тонкостенных сварных конструкций) обечаек в процессе термомеханического калибрования.

**Анализ основных исследований и публикаций.** Одними из важнейших характеристик ракетно-космической техники являются их надежность и высокое качество. К таким изделиям с повышенными требованиями точности относятся тонкостенные сварные крупногабаритные конструкции (обечайки) головного аэродинамического обтекателя РН "Циклон-4".

Для обеспечения установленных параметров точности 2-3 мм при диаметре 4000 мм для данных обечаек используется одна из разновидностей термомеханической обработки – термомеханическое калибрование (ТМК) в жестких оправках при температурах максималь-

ной пластичности материала изделия. В нескольких работах по данному направлению рассматриваются возможные способы обеспечения высокой точности тонкостенных сварных крупногабаритных конструкций. Так, в работе [1] исследовано влияние размеров и ориентации вмятин на напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрических обечаек.

Требования [2] к поврежденности нефтегазового оборудования (на примере колонных аппаратов и вертикальных цилиндрических резервуаров) в предэксплуатационный период основаны на анализе который показывает, что поврежденность по их поверхности распределяется неравномерно.

В работе [3] проведен анализ и обобщение известных решений в области исследований НДС тонких цилиндрических оболочек с геометрическими несовершенствами формы и разработана методика верификации результатов расчетов НДС котла цистерны основанная на теоремах о равновесии сечений (теоремах Марбека).

Таким образом, из вышеприведенных жестких требований к геометрической точности крупногабаритных обечаек, возникает необходимость введения строгих требований точности в технологический процесс термомеханического калибрования на основе аналитического расчета некруглости с помощью комбинации методик приведенных в государственных и отраслевых стандартах.

**Цель исследования.** С помощью аналитических формул и первичных условий расчета в существующих стандартах и методических указаниях произвести вычисления показателей напряженно-деформированного состояния обечаек в зависимости от локальной и общей некруглости.

**Изложение основного материала.** Расчет параметров локальной и общей некруглости в данной работе применяются по отношению к коническим обечайкам, геометрические отклонения которых после предварительной операции сварки приведены в таблице 1.

Две рассматриваемые обечайки имеют схожую конструкцию и отличаются друг от друга только величиной диаметра. Общий вид и расположение контрольных сечений большей из двух обечаек приведен на рис. 1. Установленные конструкторской документации диаметры обечайки Конус №1 составляют – 4061 мм, 3527,2 мм (верхний и нижний диаметры конуса) и 3184 мм, 2313 мм для Конуса №2.

Геометрические параметры обечаек Конус №1 и Конус №2  
после проведения сварки полуобечаек [4-5]

Сечения	Конус №1		Конус №2	
	Ø <sub>верх.</sub> , мм	Ø <sub>низ.</sub> , мм	Ø <sub>верх.</sub> , мм	Ø <sub>низ.</sub> , мм
1-7	4080	3505	3200	2310
2-8	4070	3525	3180	2320
3-9	4085	3535	3180	2310
4-10	4070	3525	3170	2315
5-11	4070	3505	3195	2305
6-12	4070	3500	3190	2305

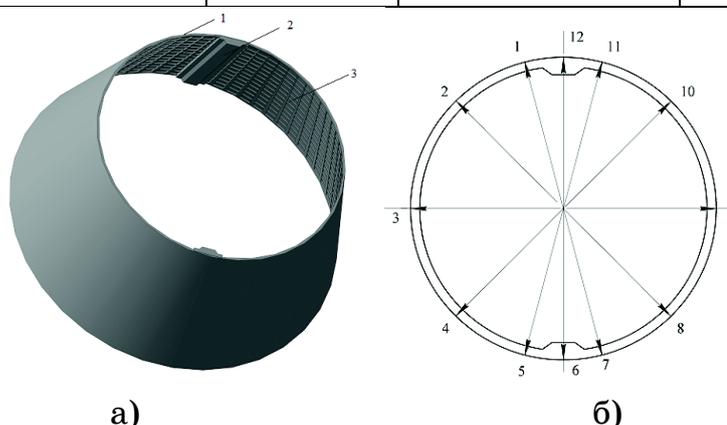


Рисунок 1 – Общий вид конической обечайки с основными конструктивными элементами (1 – торцевой шпангоут, 2 – балка функционального стыка, 3 – вафельный фон)

(а) и расположение контрольных сечений (б)

Условием применения расчетных формул являются соотношения [6]:

$$\frac{S-c}{D} \leq 0,1 \text{ для обечаек при } D \geq 200 \text{ мм;}$$

$$\frac{S-c}{D} \leq 0,3 \text{ для обечаек } D \leq 200 \text{ мм,} \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр обечайки;  $S$  – толщина стенки обечайки;  $c$  – отклонения толщины обечайки, принимается равным 1 мм на 10 мм толщины.

Рассматриваемые в данной работе обечайки, при толщине стенки 22 мм, формулы расчетных методик могут быть применимы при показателе  $\frac{S-c}{D} = 0,006 - 0,005$ .

Обечайки для головного аэродинамического обтекателя РН "Циклон-4" изготавливаются из сплава АМг6, который согласно требованиям [6] имеет допускаемое напряжение  $[\sigma] = 40-50$  МПа.

Максимальное напряжение, в соответствии с требованиями [6] –  $\varphi = 0,75$  составляет  $\sigma_{\max} \leq 110$  МПа.

Наиболее важным параметром, характеризующим взаимосвязь локальной эллиптичности и напряженно-деформированным состоянием, является допускаемое внутреннее давление из условий устойчивости в пределах упругости –  $[p]$ , которое рассчитывается по формуле:

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} \times \lambda_1, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва;  $[\sigma]$  – величина допускаемого напряжения;  $D$  – диаметр обечайки;  $S$  – толщина стенки обечайки;  $c$  – отклонения толщины обечайки, принимается равным 1 мм на 10 мм толщины.

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1 & - \text{при } \frac{\delta}{S} \leq 0,1 \\ \frac{1,105}{\frac{\delta}{S} + \sqrt{\left(\frac{\delta}{S}\right)^2 + 1}} & - \text{при } \frac{\delta}{S} \geq 0,1 \end{cases} \quad (3)$$

где  $\delta$  – величина локальной эллиптичности.

Величина  $\delta/S$  для всех измеренных диаметров составляет диапазон 0,0045-0,005. Таким образом,  $\lambda_1 = 1$ . Результаты расчетов допустимого давления для каждого случая измеренной локальной эллиптичности приведены в таблице 2.

После проведения ТМК, на основании данных в таблице 3 можно сделать вывод, что геометрические отклонения обечайки были частично или полностью устранены, и создали возможность перехода от локальной к общей некруглости. Под общей некруглостью (овальностью) понимается общее отклонение от круговой формы по всему периметру поперечного сечения цилиндрической обечайки.

Допускаемое давление для обечаек Конус №1 и Конус №2  
после проведения сварки полуобечаек

Сече- ния	Конус №1		Конус №2	
	[p] <sub>верх. диам.,</sub> МПа	[p] <sub>нижн. диам.,</sub> МПа	[p] <sub>верх. диам.,</sub> МПа	[p] <sub>нижн. диам.,</sub> МПа
1-7	0,3658	0,4254	0,4658	0,6436
2-8	0,3666	0,423	0,4686	0,641
3-9	0,3654	0,4218	0,4686	0,6436
4-10	0,3666	0,423	0,4702	0,6422
5-11	0,3666	0,4254	0,4665	0,651
6-12	0,3666	0,426	0,4672	0,651

Таблица 3

Геометрические параметры для обечаек Конус №1 и Конус №2  
после проведения термомеханического калибрования (ТМК) [4-5]

Сечения	Конус №1		Конус №2	
	Ø <sub>верх. .</sub> , мм	Ø <sub>ниж. .</sub> , мм	Ø <sub>верх. .</sub> , мм	Ø <sub>ниж. .</sub> , мм
1-7	4061	3510	3190	2313
2-8	4061	3527	3184	2313
3-9	4070	3527	3184	2313
4-10	4061	3527	3184	2313
5-11	4061	3510	3180	2305
6-12	4050	3510	3190	2305

Общую некруглость вычисляют по формуле [7]:

$$a = \frac{2(D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} \times 100\%, \quad (4)$$

где  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$  – минимальный и максимальный диаметр обечайки.

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} \times \lambda_0, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва;  $[\sigma]$  – величина допускаемого напряжения;  $D$  – диаметр обечайки;  $S$  – толщина стенки обечайки;  $c$  – отклонения толщины обечайки, принимается равным 1 мм на 10 мм толщины.

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \text{– при } A \leq 1\% \\ \left( \frac{D}{200(s-c)} \right) + \sqrt{\left( \frac{D}{200(s-c)} \right)^2 + 1} \\ \left( \frac{aD}{200(s-c)} \right) + \sqrt{\left( \frac{aD}{200(s-c)} \right)^2 + 1} \quad \text{– при } 1 \leq A \leq 2\% \end{array} \right. \quad (6)$$

Величина общей некруглости – а, для всех измеренных диаметров составляет диапазон 0,008-0,01%. Таким образом,  $\lambda_0 = 1$ .

По данным таблицы 5 можно сделать вывод, что увеличение или уменьшение диаметра обечайки на 1 мм приводит к изменению допускаемого давления на 15%, что важно при конической конструкции обечаек.

Данные выводы также подкрепляются результатами математического моделирования и экспериментальными данными. Нессимметричная эллиптичность в пределах 20 мм при проведении термомеханического калибрования обечаек приводит к искажениям вафельного фона и образованию зон критических остаточных напряжений [8].

Таблица 5

Допускаемое давление обечаек Конус №1 и Конус №2  
после проведения сварки полуобечаек

Изделие/ Контрольные параметры	Допускаемое давление		Общая (симметричная) эллиптичность
	[p] <sub>верх. диам.</sub> , МПа	[p] <sub>нижн. диам.</sub> , МПа	
Конус №1	0,3675	0,4228	0
	0,3666	0,4215	10
	0,3655	0,42	20
Конус №2	0,4681	0,6429	0
	0,4665	0,6402	10
	0,4652	0,6374	20

**Выводы.** В работе, с помощью аналитического расчета были получены характерные значения напряженно-деформированного состояния обечаек до и после проведения ТМК.

Так, значение внутреннего допускаемого давления для обечаек 0,36-0,46 МПа (максимальный и минимальный нижний диаметр), изменяясь на 15% при уменьшении или увеличении диаметра на 1 м.

Данные величины могут быть использованы при проведении сертификационных испытаний качества обечаек.

Также было установлено различие значений внутреннего допускаемого давления для локальной и общей некруглости, которое составляет 1-2%, но имеет важное технологическое значение при проведении ТМК обечаек. Подобные строгие требования точности вызваны высокой стоимостью и необходимой высокой надежностью обечаек головного аэродинамического обтекателя РН "Циклон-4", что соответствует общим положениям подобных государственных стандартов и методик расчет в других отраслях промышленности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зайнуллин, Р.Х. Безопасная эксплуатация цилиндрических сосудов с дефектами ипа "вмятина" на обечайке [Текст]/: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.04 / Зайнуллин Раиль Халилович; Казанский гос. ун-т. – Казань, 2000. – 24 с.
2. ОСТ 24.201.03-90 Сосуды и аппараты стальные высокого давления. Общие технические требования. [Текст]. – Введен впервые; введен 01.07.1991. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 15 с.
3. Архипов, А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния котла цистерны, имеющего геометрические несовершенства[Текст]/: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Архипов Андрей Владимирович; Екатеринбургский гос. ун-т. – Екатеринбург, 2007. – 32 с.
4. Маршрутно-технологический паспорт [Текст]: Корпус 94.7300.1220.0340.00.0, цех №87, сверен и откорректирован с эталоном 25.09.12 – Днепропетровск, ПО ГП "Южмаш" им. А.М.Макарова. – 15 с.
5. Маршрутно-технологический паспорт [Текст]: Корпус 94.7300.1220.0240.00.0, цех №87, сверен и откорректирован с эталоном 07.12.12 – Днепропетровск, ПО ГП "Южмаш" им. А.М.Макарова. – 25 с.
6. ГОСТ 52857.2-2007. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек [Текст]. – Введен впервые; введен 27.12.2007. – М.: Стандартиформ, 2008. – 44 с.
7. ГОСТ 52857.11-2007. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек [Текст]. – Введен впервые; введен 27.12.2007. – М.: Стандартиформ, 2008. – 16 с.
8. Шерстюк Д.Г. Моделирование остаточных напряжений и несимметричной эллиптичности осесимметричных крупногабаритных конструкций в расчетной среде ANSYS / Д.Г. Шерстюк, О.В. Кулик // Сборник научных трудов Sworld. – Том 5. Технические науки. – Одесса: Куприенко СВ. – С.70-75