

УДК 621.643.43

В. К. ИТБАЕВ, В. М. ГОРБАНЕНКО, Р. С. СУЛТАНОВ, Ч. А. ЯРУЛЛИН

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ГИБКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ

Теоретически и экспериментально установлено влияние асимметрии нагружения на малоцикловую прочность гибких металлических трубопроводов. С целью увеличения ресурса предложена новая технология их сборки, а также монтажа в трубопроводные системы. *Гибкие металлические рукава; сильфонные компенсаторы; напряженно-деформированное состояние; малоцикловая прочность*

Гибкие металлические трубопроводы (ГМТ) — гибкие металлические рукава (ГМР) и сильфонные компенсаторы (СК) — находят широкое применение в различных системах авиационной, ракетной и наземной техники. Главными конструктивными элементами ГМТ являются герметичная гофрированная оболочка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и проволоочная оплетка, играющая роль защитного экрана, силовой связи между торцами оболочки, а также демпфирующего элемента. СК выполняются как с оплеткой, так и без нее.

До настоящего времени вопросы, связанные с влиянием сборки на качество ГМТ, не изучались. Проведенные исследования показывают, что внесением достаточно простых и недорогих операций в технологию сборки самих ГМР и СК или в технологию установки этих устройств в трубопроводную систему можно существенно повысить ресурс их работы.

ГМР и СК во время эксплуатации подвергаются воздействию различных видов нагрузок, как правило, повторного характера. При этом допускаются такие перемещения, при которых наиболее нагруженные зоны гофрированных оболочек работают за пределами упругости. Таким образом, долговечность СК и ГМР определяется малоцикловой усталостью гофрированной оболочки.

В настоящее время имеются достаточно совершенные методики оценки малоцикловой прочности различных элементов конструкций [1, 2, 3]. В основе этих методик лежит деформационно-кинетический критерий. Известно, что асимметрия нагружения влияет на число циклов до разрушения. При сред-

нем напряжении $\sigma_m < 0$ (напряжение сжатия) число циклов до разрушения $N_{ц}$ увеличивается. В работах [1, 3, 4] такое влияние отмечается и учитывается в предлагаемых методах расчетов.

Несмотря на то, что ГМР и СК в большинстве случаев работают при асимметричном нагружении, в литературе нет сведений о влиянии асимметрии нагружения на их малоцикловую прочность. Так, имеющиеся методики [5, 6] определения малоцикловой долговечности ГМР и СК предполагают расчет только по симметричному циклу.

Специально проведенные экспериментальные исследования малоцикловой прочности гофрированных оболочек ГМТ различных типоразмеров показали, что при повторно-статическом осевом нагружении в условиях постоянства размаха перемещения торцов гофрированные оболочки весьма чувствительны к асимметрии цикла деформирования. Для одной и той же величины размаха осевого перемещения торцов наибольшая долговечность наблюдается при циклах сжатия оболочки, наименьшая — при циклах растяжения. Влияние асимметрии тем больше, чем ниже уровень деформации. Числа циклов до разрушения при этом различаются в 3–5 раз. В таблице приведены в качестве примера результаты испытаний на малоцикловую прочность гофрированных оболочек с условным диаметром $d_y = 32$ мм при одном и том же размахе осевого перемещения торцов $\Delta = 6$ мм и при одном и том же внутреннем давлении, но с различной степенью асимметрии.

Теоретическое объяснение отмеченного влияния асимметрии нагружения на малоци-

Таблица

**Результаты испытаний гофрированных оболочек
на малоцикловую прочность**

Схема нагружения $\Delta_{\min} = -6, \Delta_{\max} = 0$			Схема нагружения $\Delta_{\min} = -3, \Delta_{\max} = +3$			Схема нагружения $\Delta_{\min} = 0, \Delta_{\max} = +6$		
№ обр.	$N_{ц}$	$N_{цСР}$	№ обр.	$N_{ц}$	$N_{цСР}$	№ обр.	$N_{ц}$	$N_{цСР}$
1	9500	11752	1	5195	7443	1	2966	3640
2	10800		2	5700		2	3100	
3	10820		3	6060		3	3134	
4	10950		4	6240		4	3309	
5	11000		5	7050		5	3620	
6	11020		6	7150		6	3750	
7	11800		7	9130		7	3770	
8	12670		8	9190		8	3900	
9	12890		9	9218		9	4410	
10	16070		10	9500		10	4450	

кловую прочность гофрированных оболочек вряд ли будет иметь успех, если при расчете напряжений в наиболее нагруженных зонах исходить из общепринятых допущений в расчетах оболочек, в частности, считать, что ее толщина мала по сравнению с другими размерами, в первую очередь, по сравнению с радиусами гофров в меридиональном сечении.

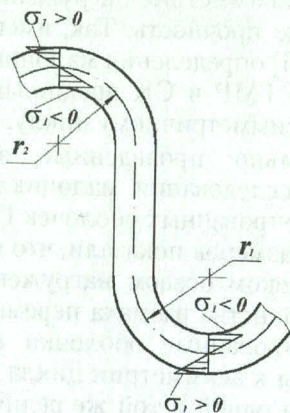


Рис. 1

Действительно, в таком случае, принимая во внимание, что основными деформациями гофрированной оболочки являются деформации изгиба в меридиональном сечении, и именно они рассматриваются как главный фактор, определяющий малоцикловую прочность, можно заметить (рис. 1), что асимметричное осевое нагружение оболочки на одну и ту же величину, либо на сжатие, либо на растяжение будет отличаться только тем, что максимальные значения меридиональных изгибных напряжений, оставаясь неизменными по модулю на вершинах и впадинах гофров, поменяют свои знаки на наружных и

внутренних поверхностях. На рис. 1 показаны эпюры меридиональных изгибных напряжений в наиболее нагруженных зонах при осевом сжатии гофрированной оболочки. При растяжении оболочки эпюры становятся зеркальным отображением показанных на рис. 1. Таким образом, неблагоприятное с точки зрения прочности при повторно-статическом нагружении действие растягивающего среднего напряжения цикла остается, меняется лишь зона, где оно действует.

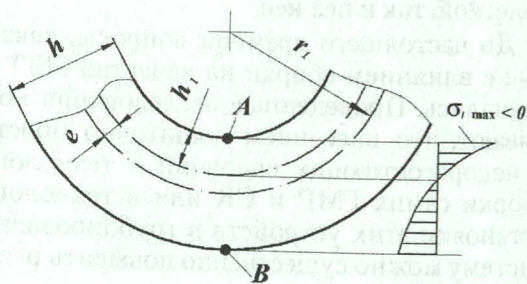


Рис. 2

Если принять во внимание реальную геометрию гофрированных оболочек, то для некоторых их типов отношение толщины стенки h к меридиональным радиусам r_1 и r_2 гофра оказывается больше $1/5$. Для гофрированных оболочек, имеющих сварной технологический шов, выполненный внахлестку, отношение h/r в зоне шва доходит до $2/5$. В этой связи расчет максимальных напряжений в этих оболочках необходимо уточнять. Это можно сделать, например, применив известную формулу для бруса большой кривизны, в соответствии с которой максимальные меридиональные изгибные напряжения на вогну-

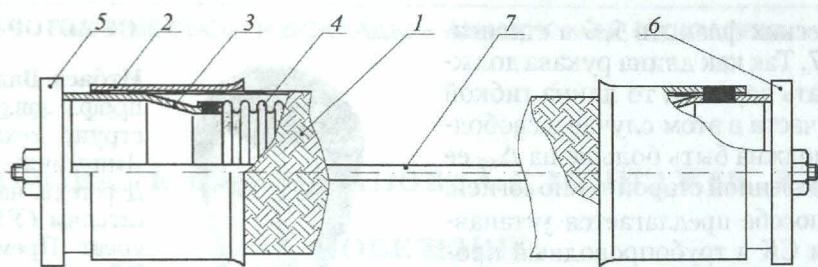


Рис. 3

той поверхности гофров (рис. 2) определяются как

$$\sigma_{1 \max} = M_1 \frac{8h_1}{rhe}, \quad (1)$$

где M_1 — меридиональный изгибающий момент; h_1 — расстояние от нейтральной линии до внутренней поверхности гофра; h — толщина гофрированной оболочки; e — расстояние от нейтральной оси до центра тяжести сечения (в первом приближении $e = h^2/12r$); r — радиус гофра оболочки в меридиональном сечении ($r = r_1$ — для впадины гофра, $r = r_2$ — для вершины гофра).

Применение формулы (1) уточняет значение $\sigma_{1 \max}$ на 20–25%. Заметим, что число зон с максимальными изгибными напряжениями теперь с четырех уменьшилось до двух. Максимальные напряжения имеют место на наружной поверхности впадины и на внутренней поверхности вершины гофров оболочки (на рис. 2 показана одна из этих зон — точка А на наружной поверхности впадины гофра). Таким образом, соотнося поправку к расчету напряжений с асимметрией цикла нагружения оболочки, можно отождествлять осевую сжимающую нагрузку оболочки с возникновением в максимально напряженных зонах среднего сжимающего напряжения, а растягивающую осевую нагрузку оболочки — с возникновением растягивающих средних напряжений. Это и объясняет увеличение числа циклов до разрушения в первом случае нагружения оболочки и уменьшение — во втором.

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования влияния асимметрии цикла нагружения на малоцикловую прочность гофрированных оболочек позволяют сделать вывод о том, что для увеличения ресурса ГМР и СК необходимо, чтобы гофрированная оболочка работала при циклическом нагружении со средним напряжением сжатия ($\sigma_m < 0$) в максимально нагруженных зонах. Для количественной оценки оптимальных параметров цикла нагружения необходи-

мо условно упругие напряжения цикла уточнять по формуле (1). Внутренние усилия в гофрированной оболочке, в частности меридиональный изгибающий момент M_1 , могут быть найдены с привлечением известных методов расчета в упругой области, например, [7]. Далее, исходя из условия получения максимального числа циклов $N_{ц}$ до разрушения, используя [1, 3], можно по заданному для конкретного ГМТ или СК размаху эксплуатационного перемещения Δ определить среднее осевое перемещение Δ_m оболочки. Расчет $N_{ц}$ при этом необходимо проводить не только по напряжениям в точке А (рис. 2), но и проверять по напряжениям в точке В, так как, если в точке А $\sigma_m < 0$, то в точке В, несмотря на то, что уровень максимальных напряжений ниже, среднее напряжение $\sigma_m > 0$, и разрушение может произойти в этой зоне.

Практически расчетный цикл нагружения гофрированной оболочки со средним напряжением сжатия в максимально напряженной зоне с целью увеличения ресурса можно осуществить двумя способами.

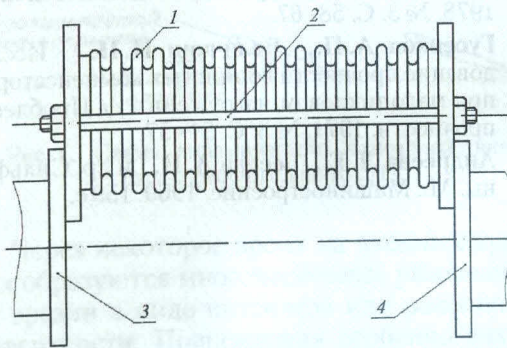


Рис. 4

Первый способ заключается в применении технологии сборки ГМР или СК, согласно которой обычным образом собирается один конец ГМР или СК (рис. 3), а перед приваркой второго конца оплетки 1 и стакана 2 к присоединительной втулке 3, гофрированная оболочка 4 предварительно сжимается на рассчитанную величину Δ_m с помощью специаль-

ных технологических фланцев 5, 6 и стягивающей шпильки 7. Так как длина рукава должна соответствовать чертежу, то длина гибкой гофрированной части в этом случае в свободном состоянии должна быть больше на Δ_m ее длины, предусмотренной старой технологией.

Во втором способе предлагается устанавливать ГМТ или СК в трубопроводный пролет в предварительно поджатом состоянии (рис. 4). Перед монтажом компенсатор 1 сжимается на расчетную величину Δ_m с помощью специальных стяжек 2 и вставляется между присоединительными фланцами 3 и 4 трубопровода, затем стяжки убираются, ось компенсатора совмещается с осью трубопровода и осуществляется крепление компенсатора.

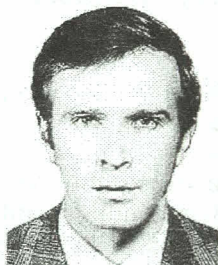
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Махутов Н. А., Воробьев А. З.** и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1983. 271 с.
2. **Гусенков А. П.** Прочность при изотермическом и неизотермическом нагружении. М.: Наука, 1979. 290 с.
3. **Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
4. **Мясников А. М., Шетулов Д. И., Соколов Л. Д.** Оценка чувствительности к асимметрии цикла по истинной диаграмме деформирования // Заводская лаборатория. 1970. № 11. С. 1281–1408.
5. **Гусенков А. П., Лукин Б. Ю., Москвитин Г. В.** Исследование малоциклового прочностии сильфонных компенсаторов при высоких температурах // Машиноведение. 1978. № 3. С. 58–67.
6. **Гусенков А. П., Величкин Н. Н.** Исследование прочностии волнистых компенсаторов при малоцикловом нагружении // Проблемы прочностии. 1971. № 3. С. 51–57.
7. **Адресова Л. Е., Беседа А. И.** и др. Сильфоны. М.: Машиностроение, 1969. 159 с.

ОБ АВТОРАХ



Итбасв Валерий Каюмович, проф., зав. каф. основ конструир. механизмов и машин. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по авиац. двигателям (УГАТУ, 1996). Лауреат Прем. Правительства РФ. Заслуж. машиностроитель РБ. Иссл. в обл. динамики и прочн. авиац. двигателей.



Горбаненко Владимир Михайлович, доц., каф. теор. механики. Дипл. инж. (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по авиац. двигателям (МАИ, 1979). Иссл. в обл. динамики и прочностии сложных механических систем.



Султанов Риф Габдуллович, директор ОАО «Ишимбайгаз». Дипл. горн. инж., инж.-элект. (УГНТУ, 1972). Иссл. и разработки в обл. нефтегазового оборудования и автоматик.



Яруллин Чингиз Асхатович, доц, дир. Ишимбайск. филиала УГАТУ. Дипл. инж. по авиац. двигателям (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по динамике полета (МАИ, 1983). Иссл. в обл. механики сложных систем.