КУЙБЫШЕВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С. П. КОРОЛЕВА
Труды, выпуск XXXVI, 1969 г.
Вибрационная прочность и надежность двигателей
и систем летательных аппаратов

В. А. БОРИСОВ

ДЕФОРМАЦИЯ УПЛОТНИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА С УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ МР, ЗАКЛЮЧЕННЫМ В НЕЗАМКНУТУЮ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ОБОЛОЧКУ ПРИ ЗАТЯЖКЕ СОЕДИНЕНИЯ

При использовании «металлической резины» (МР) [1] в уплотнительных прокладках для обеспечения непроницаемости ее приходится заключать в какую-либо оболочку или пропитывать достаточно податливыми пластиками. Перспективными являются уплотнительные кольца с упругим элементом из МР, заключенным в металлическую оболочку [2], так как они при достаточной упругой деформации могут работать почти без старения в широком диапазоне температур и практически в любых средах.

Во время затяжки соединения уплотнительное кольцо деформируется с изменением геометрии как оболочки, так и упругого элемента.

Если в рабочих условиях происходит раскрытие стыка, то оно компенсируется упругой деформацией уплотнительного кольца. Обычно оболочка изготавливается из пластичных материалов и имеет значительно меньшую упругость по сравнению с элементом из МР

Ниже исследуется влияние характеристик оболочки на величину упругой деформации и жесткость кольца. При этом уплотнительное кольцо рассматривается как статически неопределимая система с параллельной работой оболочки и упругого элемента (фиг. 1). Такое допущение справедливо до нагрузок, когда начинается деформация оболочки от поперечной силы, возникающей при сжатии упругого элемента.

При затяжке соединения деформация оболочки в основном пластическая. Поэтому для нее, как и для упругого элемента, жесткость является функцией деформации. В дальнейшем при иссле-

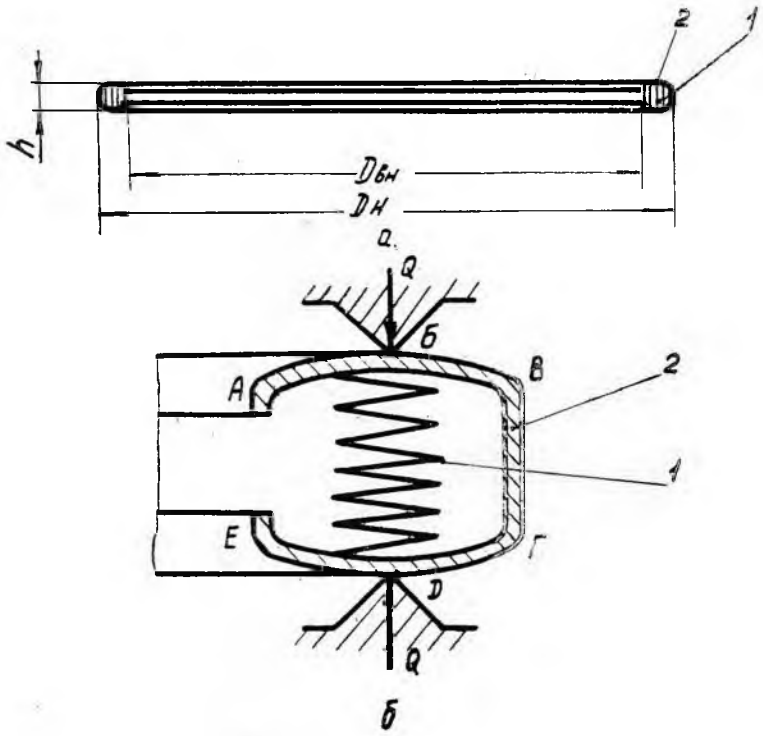
дования рассматривается средняя жесткость на определенном участке деформации:

$$C_{ср} = \frac{\Delta Q}{\Delta y},$$

где $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ — изменение нагрузки;
а $\Delta y = y_2 - y_1$ — соответствующая деформация.

При сжатии кольца часть нагрузки $Q_о$ примет на себя оболочка, другую часть $Q_э$ — упругий элемент

и
$$Q = Q_э + Q_о \tag{1}$$



Фиг. 1. а — уплотнительное кольцо с упругим элементом из МР в металлической оболочке; *б* — схема расчета;
1 — упругий элемент из МР (жесткость $C_э$); *2* — оболочка (жесткость $C_о$).

Жесткость оболочки и упругого элемента соответственно будет

$$C_э = \frac{Q_э}{y_э}, \quad C_о = \frac{Q_о}{y_о}.$$

Здесь $y_о$ и $y_э$ — перемещение оболочки и упругого элемента.
При совместной работе

$$y_о = y_э = y_к, \tag{2}$$

где $y_к$ — перемещение кольца.

Тогда

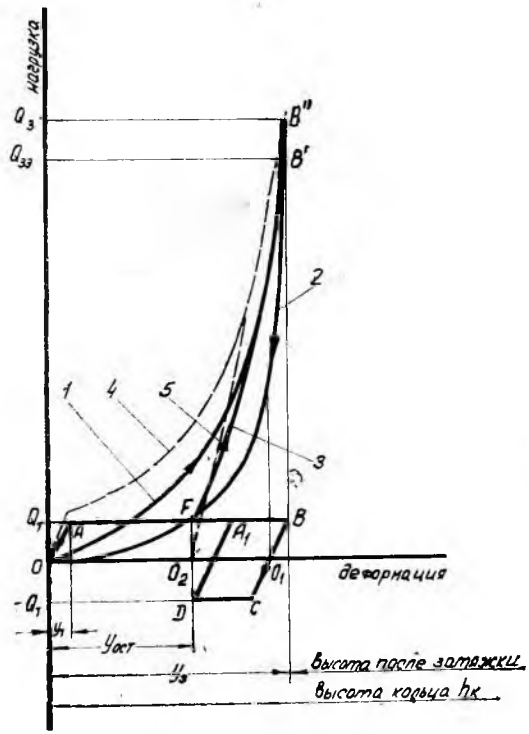
$$\frac{Q_о}{C_о} = \frac{Q_э}{C_э} \text{ и } Q_о = Q\frac{C_о}{C_о + C_э},$$

$$Q_э = Q\frac{C_э}{C_о + C_э}.$$

Сжатие кольца $$y_к = \frac{Q}{C_о + C_э}, \quad (3)$$

Жесткость кольца $$C_к = C_о + C_э. \quad (4)$$

При расчете деформации оболочки без упругого элемента ее можно рассматривать состоящей из цилиндрического участка (ВГ) и двух кольцевых пластин (АБВ и ГДЕ на фиг. 1,б). Нагружение такой оболочки приводит к деформации кольцевых пластин. Подобная схема используется при расчете сильфонов [3] и позволяет применить теорию изгиба круглых пластин.



Фиг. 2. Диаграмма совместной деформации упругого элемента и оболочки:

1 и *2* — кривые деформаций упругого элемента при нагружении и разгружении соответственно; *3* — деформация упругого элемента после частичного разгружения; *4* и *5* — кривые совместной деформации упругого элемента и оболочки при первом и последующем нагружении соответственно.

Для качественного анализа можно принять, что оболочка деформируется как идеально пластическое тело. В этом случае после достижения в ней напряжений, соответствующих пределу текучести, начнется ее деформация при постоянной нагрузке $O_т$ (линия АВ на фиг. 2). Деформация упругого элемента при этом будет происходить по кривой нагружения *1*.

Из условий совместной работы (1) и (2) для нагрузок $Q > O_т$ следует, что усилие при затяжке кольца будет

$$Q_з = Q_{зэ} + Q_т,$$

где $Q_{зэ} = f(y_з)$.

Если нагрузка будет снята, упругий элемент восстановится по кривой 2, а оболочка по прямой BO_1. Однако реакция упругого элемента при сжатии, соответствующем O_1, будет достаточна, что-

бы продолжать деформировать оболочку (линия O_1 CD). Положение равновесия наступит при равенстве реакции МР упругим силам в оболочке ($O_2D=O_2F$). За счет остаточных напряжений в оболочке упругий элемент окажется сжатым, а уплотнительное кольцо получит остаточную деформацию, определяемую точкой пересечения кривой разгружения *2* с прямой $Q = Q_т$. Как видно, величина остаточной деформации растет с увеличением нагрузки, вызывающей текучесть оболочки, (т. е. несущей способности оболочки) и уменьшается при увеличении жесткости МР

Совместная деформация упругого элемента и оболочки при первом нагружении представлена кривой *4*. Средняя жесткость кольца при этом:

$$C'_{ср} = \frac{Q_з}{y_з} = \frac{Q_{зэ} + Q_т}{y_з} = C_{э\,ср} + C_{о\,ср} = C_{э\,ср} + C_{он}\frac{y_т}{y_з}, \qquad (5)$$

где $C_{он}$ — жесткость оболочки при упругой деформации, а

$y_т$ — деформация оболочки, соответствующая началу текучести.

При повторном нагружении кольца оболочка деформируется по линиям DA_1 и A_1B, элемент из МР — по кривой 3.

Началом деформации кольца (кривая 5) будет точка O_2, а его средняя жесткость

$$C_{ср} = \frac{Q_з}{y_з - y_{ост}} = \frac{C_{э\,ср\,F-B'}(y_з - y_{ост}) + 2Q_т}{y_з - y_{ост}} =$$

$$= C_{э\,ср\,F-B'} + \frac{2Q_т}{y_з - y_{ост}} \qquad (6)$$

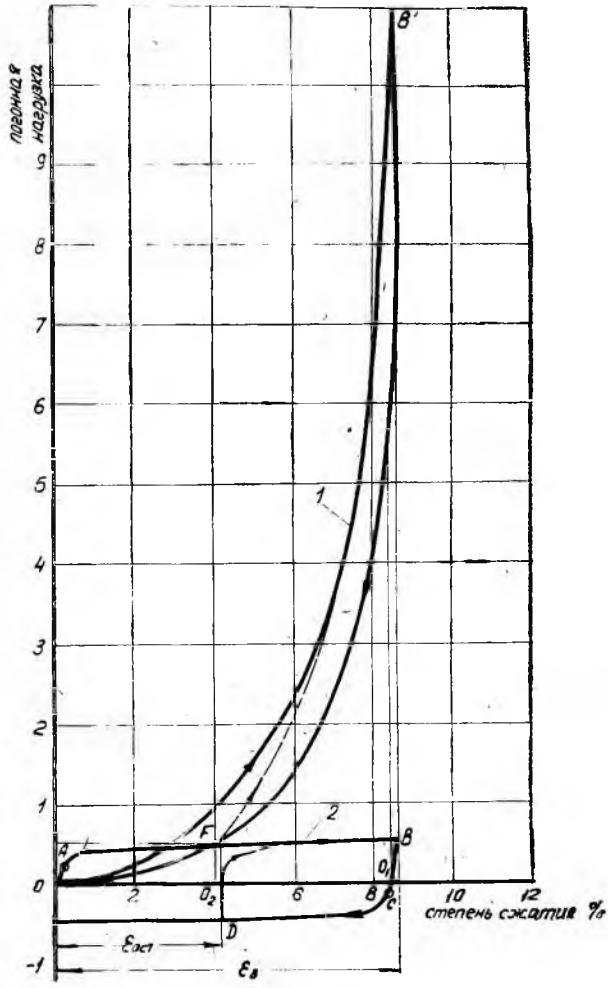
Таким образом, увеличение средней жесткости кольца при повторном нагружении определяется величиной остаточной деформации, то есть несущей способностью оболочки и жесткостью МР.

На фиг. 3 приведены кривые деформации упругого элемента (1) и оболочки (2) из меди толщиной 0,5 *мм* для кольца с размерами $D_н=110$ *мм*, $D_{вн}=100$ *мм*, $h=5$ *мм*. Пластическая деформация оболочки рассчитывалась методом переменных параметров упругости [4]. Из фигуры видно, что оболочка деформируется с малым упрочнением, приближаясь к идеально пластической.

Герметичность соединения при затяжке, в случае отсутствия отклонений от заданной геометрии стыкуемых деталей, наступит при определенном контактном давлении на поверхности кольца q_{ys} [2], непосредственно зависящем от величин предела текучести оболочки. Следовательно, соответствующая этому моменту нагрузка на кольцо $Q_у$ связана с величиной $Q_т$, хотя и превосходит ее.

При затяжке кольца за счет его деформации до наступления герметичности происходит некоторая компенсация отклонений от геометрии (монтажных перекосов, короблений и т. д.).

Если соединение будет разобрано, значительная часть этой деформации перейдет в остаточную и возможность компенсации монтажных отклонений за счет кольца существенно уменьшится. В то



Фиг. 3. Деформация упругого элемента из МР-1 и оболочки из медной фольги $\delta = 0{,}5$ *мм* с внутренним разъемом — 2 ($D_н = 110$ *мм*, $D_{вн} = 100$ *мм*, $h = 5$ *мм*).
Погонная нагрузка в *кг/мм*.

же время величина этих отклонений при последующей сборке может даже возрасти, так как точно восстановить относительное положение фланцев и кольца практически невозможно. Поэтому при повторном использовании уплотнительных колец величина $Q_у$ может быть больше, чем при первой сборке.

ВЫВОДЫ

1. Для повышения упругой деформации кольца необходимо снижать среднюю жесткость оболочки.

2. При повторном использовании уплотнительных колец усилие, необходимое для уплотнения соединения, может возрастать.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Бузицкий, А. М. Сойфер. Цельнометаллические упруго-демпфирующие элементы, их изготовление и применение. КуАИ. Труды, выпуск XIX, 1965.

2. В. А. Борисов, Д. Ф. Пичугин. Некоторые исследования уплотнительных колец с упругим элементом из материала МР в металлической оболочке. КуАИ. Труды, выпуск XXX, 1967.

3. В. И. Королев. Расчет сильфонов. «Вестник московского университета», № 9, 1954.

4. И. А. Биргер. Круглые пластинки и оболочки вращения. Оборонгиз, 1961.