

2. Крючков А., Евгеньев Г. Еще раз о прорывных технологиях автоматизации предприятий// САПР и Графика. 1998. №4.
3. Евгеньев. Г САПР XXI века: персональному компьютеру персональное программное обеспечение// САПР и Графика. 2000. № 2.
4. Коваленко В. Системы автоматизации проектирования вчера, сегодня, завтра. М.: ИПМ РАН, 2000. kvn@spp.keldysh.ru

## ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Итбаев В.К., Федоров В.А.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г.Уфа

Малоцикловое нагружение сильфонов при изгибах происходит в жестком цикле нагружения. Для описания обобщенной циклической диаграммы деформирования использован обобщенный принцип Мазинга. В качестве критерия разрушения используется деформационно-кинетический критерий

$$d_{уст} + d_{ст} = 1,$$

где  $d_{уст}$  - усталостное повреждение;  
 $d_{ст}$  - квазистатическое повреждение.

В жестком цикле нагружения, характерном для работы многослойных сильфонных компенсаторов, односторонне накопленная деформация

$$N_i(t) = \left( \frac{c(t)}{\varepsilon^{(k)}_{n \max} - \frac{\sigma_{-1}}{3G(t)}} \right)^2,$$

практически отсутствует. Поэтому принимаем условие прочности в виде  $d_{уст} < 1$ . Кривая усталости аппроксимируется выражением типа Лэнджера

$$c(t) = 0.5 \times \ln \frac{1}{1 - \psi(t)};$$

где

$\psi$  - коэффициент поперечного сужения гладкого образца;

$G(T)$  - модуль сдвига;

$\sigma_{-1}$  - предел выносливости гладкого образца;

$\varepsilon_{\text{max}}^{(k)}$  – максимальное значение интенсивности деформаций в  $k$ -м полуцикле нагружения;

$t$  – общее время деформирования.

Для корреляции гладкого образца в тонкостенную оболочку силь-

$$c(t) = 0.5 \times \ln \left( \frac{1}{1 - \psi_1(t)} \right),$$

фона используется коэффициент  $k=1,5$  [1]. Таким образом

где  $\psi_1(t) = \psi(t) \times k$ .

Для определения значения  $\psi$  используется диаграмма  $\psi = f(p(t))$ , где  $p(t)$  – параметр Ларсена-Миллера.

$$p = (273+t)(s + \lg \tau),$$

где  $\tau$  – время выдержки;

$s$  – коэффициент,  $s = 7, 12$ ;

$t$  – температура по шкале Цельсия.

Диаграмма строится на основе испытаний образцов на длительную статическую прочность. При расчете долговечности, используя найденное значение  $p$  (определяется по температуре), по диаграмме определяется значение  $\psi$ .

Используется решение задачи теории оболочек для полуцикла нагружения.

В качестве первой группы разрешающих уравнений используются уравнения равновесия элемента оболочки.

Второй группой разрешающих уравнений являются соотношения связи перемещений и деформаций срединной поверхности оболочки.

При рассмотрении связи деформаций оболочки и ее срединной поверхности, а также связи напряжений и деформаций использованы гипотезы Кирхгофа-Лява. Из соотношений упругости в форме закона Гука в соответствии с теорией малых упруго-пластических деформаций используется третья группа разрешающих уравнений – выражения, связывающие внутренние усилия и деформации срединной поверхности,

$$E \times A = B,$$

где  $E$  – матрица коэффициентов;

$A$  – матрица деформаций;

$B$  – матрица усилий.

Для соотношения связи напряжений и деформаций за пределами

упругости использован метод переменных параметров упругости И.А. Биргера (МПИТУ).

Вышеописанные три группы разрешающих уравнений в частных производных образуют замкнутую систему — систему восьми обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка в полных производных для случая винтообразной оболочки.

$$\frac{dY}{dS} = D \times Y + F,$$

где  $Y$  — вектор неизвестных;

$D$  — матрица коэффициентов;

$F$  — вектор температурных и распределенных силовых нагрузок.

Для случая расчета сильфонов с кольцевыми гофрами используется система шести уравнений.

Для определения перемещений сильфона при качании перемещения от изгиба приводятся к эквивалентным перемещениям от растяжения-сжатия.

Долговечность всего сильфона определяется по долговечности слоя с наименьшими значениями числа циклов до разрушения.

На основе вышеизложенной методики были рассчитаны количества циклов до разрушения сильфонов Ду36, Ду56 и Ду92. В качестве материалов слоев использовались нержавеющая сталь Х18Н10Т и алюминиевый деформируемый сплав АМгб.

Механические характеристики материалов, такие как модуль сдвига  $G$ , предел выносливости  $\sigma_{-1}$ , коэффициент линейного расширения  $\alpha$ , коэффициент Пуассона  $\mu$  и другие, выбираются для соответствующих температур.

Расчеты проводились с помощью программных продуктов, разработанных в НИЛ по гибким грубопроводным системам Уфимского государственного авиационного технического университета.

Расчеты показали (см. таблицу), что при одной и той же температуре, например 77К, и угле качания слой сильфона, выполненный из алюминиевого сплава АМгб, обладает большим запасом по циклопрочности, чем тот же слой сильфона, выполненный из нержавеющей стали Х18Н10Т.

Таблица

## Число циклов до разрушения сильфона

Слой сильфона	Механические свойства		Число циклов N, циклов
	материал	температура, К	
сильфон Ду92			
внутренний	АМг6	293К	833869
		77К	4303715
наружный	АМг6	293К	402028
		77К	2451176
	Х18Н10Т	293К	83625
		77К	118797
сильфон Ду56			
внутренний	АМг6	293К	45326588
		20К	12680071
наружный	АМг6	293К	24942760
		20К	4490013
	Х18Н10Т	293К	271668
		20К	180854
сильфон Ду36			
внутренний	АМг6	293К	10558
		24К	32324
наружный	АМг6	293К	21501
		24К	127219

## Список литературы

1. Исследование влияния технологической наследственности на геометрические характеристики и малоцикловую прочность сильфонных компенсаторов: Отчет о научно-исследовательской работе. Договор № 891 между ИМАШ АН СССР и Уф НИИД. Москва, 1989.