

РАСЧЁТ СИЛЬФОННОГО КОМПЕНСАТОРА НА МАЛОЦИКЛОВУЮ ПРОЧНОСТЬ

© 2015 А.И. Аистов, Ю.В. Скворцов, С.Н. Перов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 27.03.2015

В данной работе выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния сильфона в виде гофрированной двухслойной оболочки. По результатам данного расчёта проведена оценка его долговечности при малоциклового усталости.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, долговечность, метод конечных элементов, петля гистерезиса, пластичность, сильфонный компенсатор, гофрированная двухслойная оболочка.

Большинство поломок машин и конструкций, возникающих при их эксплуатации, как показывают литературные данные, вызвано усталостью металлов. Усталость металлов – это процесс постепенного накопления повреждений в материале при циклическом нагружении, приводящий к возникновению усталостной трещины, её развитию и окончательному разрушению материала.

В настоящее время проблема малоциклового усталости элементов машин и конструкций стала особо актуальной в связи с интенсификацией эксплуатации изделий в условиях высокой нагруженности при квазистационарном характере повторных статических силовых воздействий.

Разрушение при малом числе циклов нагружения возникает, как правило, при развитых циклических пластических деформациях в макрообъёмах, и эта его специфика определяет особенности исследований, направленных на разработку методов расчёта.

При анализе многоциклового прочностных конструкций долговечность обычно определяется на основе характеристик цикла напряжений. В качестве исходных данных здесь используется кривая усталости Вёлера, описывающая зависимость амплитуды напряжения от числа циклов до разрушения. Однако для анализа малоциклового усталости многие исследователи применяют деформационный подход. Деформационная кривая усталости, представляющая собой зависимость амплитуды полной деформации от числа полуциклов до разрушения, обычно задаётся аналитически, например, в виде уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина [1]:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c, \quad (1)$$

Перов Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения.

E-mail: perov@imi-samara.ru

Скворцов Юрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения.

E-mail: proch@ssau.ru

Аистов Алексей Иванович, аспирант кафедры космического машиностроения. E-mail: a_i_aistov@gmail.com

где σ'_f – коэффициент усталостной прочности (значение амплитуды напряжения, при котором разрушение произойдёт за один полуцикл нагружения при условии отсутствия пластических деформаций);

ε'_f – коэффициент усталостной вязкости (значение амплитуды деформации, при котором разрушение произойдёт за один полуцикл нагружения при условии отсутствия упругих деформаций);

b – показатель степени усталостной прочности (экспонента Басквина);

c – показатель степени усталостной вязкости (экспонента Мэнсона-Коффина);

ε_a – амплитуда полной деформации;

$2N$ – число полуциклов до разрушения.

Следует отметить, что уравнение (1) было получено в предположении о симметрии цикла нагружения. Для учёта общего случая асимметрии цикла к настоящему времени предложено несколько модификаций данного соотношения. Одной из них является формула учёта средних напряжений Смита-Уотсона-Топпера (Smith-Watson-Topper) или SWT-модель [2]:

$$\sigma_{\max} \varepsilon_a = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N)^{b+c}, \quad (2)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение цикла.

В настоящей работе в качестве объекта исследований выбран сильфон компенсатора магистрального окислителя ракеты-носителя «Союз-2» (разработки РКЦ «Прогресс»). Для него имеются результаты испытаний на подтверждение назначенного ресурса, а также результаты испытаний образцов материала, отобранных из изготовленных сильфонов.

Сильфон (см. рис. 1) представляет собой двухслойную гофрированную оболочку с кольцевыми гофрами, изготовленную из стали 12Х18Н10Т. При этом толщина каждого слоя составляет 0,5 мм.

Рассматривается режим циклического нагружения, который реализуется при испытаниях на подтверждение назначенного ресурса осевых

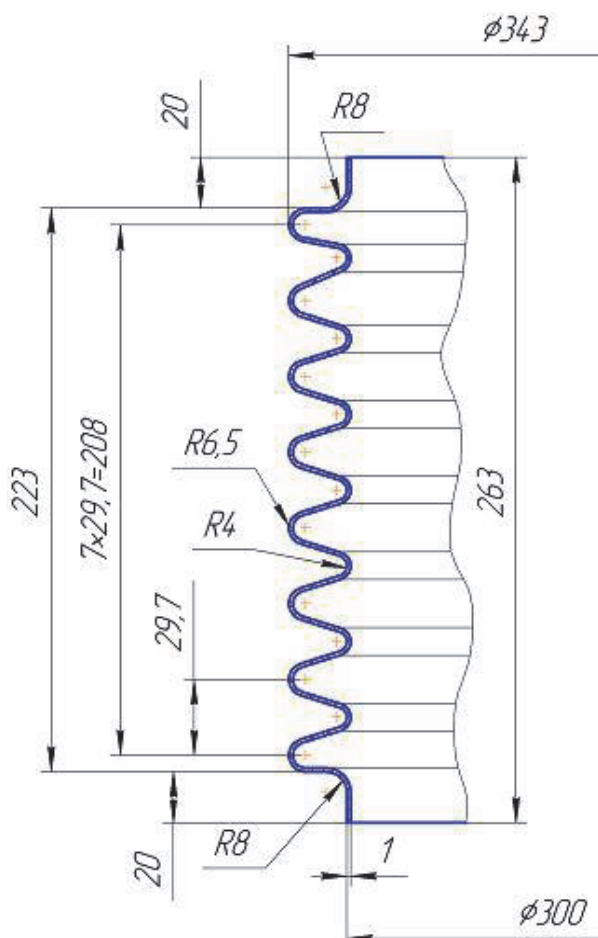


Рис. 1. Геометрия сиффона

сиффонных компенсаторов. Данные испытания проводятся путём многократно повторяющихся перемещений вдоль оси сиффона в обе стороны относительно исходного положения при действии внутреннего гидравлического давления 1,5 МПа, равного давлению испытания компенсатора на герметичность. Один цикл такого нагружения включает в себя:

сжатие 60 мм, изгиб $\pm 3^\circ$, возвращение в исходное положение;

растяжение 30 мм, изгиб $\pm 3^\circ$, возвращение в исходное положение.

Геометрия сиффона и нагрузка, обусловленная осевыми перемещениями, являются осесимметричными. Однако небольшой изгиб $\pm 3^\circ$ нарушает условия осевой симметрии. Для упрощения задачи данный изгиб приводится к осевой нагрузке путём добавления к осевым перемещениям сжатия и растяжения дополнительного смещения, вызванного поворотом торца. В этом случае вместо всего сиффона можно ограничиться рассмотрением лишь одного его сечения, т.е. свести трёхмерную задачу теории упругости к двумерной, что существенно упрощает решение.

Отметим, что при наличии внутреннего давления наиболее нагруженными участками сиффона будут области впадин. Поэтому здесь удобнее оперировать не наружными, а внутренними

гофрами, ограниченными перпендикулярными к оси оболочки плоскостями, проходящими через середины двух соседних вершин. Нумерация таких гофров показана на рис. 2.

Рассматриваемый сиффон работает в крайне тяжёлых условиях. При этом имеют место все возможные виды нелинейностей (и большие перемещения, и развитие пластические деформации, и контактное взаимодействие между слоями оболочки и стенками гофров.). Поскольку упрощённая постановка, реализуемая практически во всех модулях «Fatigue» современных CAE-систем, не позволяет оценивать долговечность таких конструкций, моделирование и расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) данного сиффона проводится непосредственно в среде ANSYS.

Для построения конечно-элементной модели сиффона используется элемент осесимметричной оболочки SHELL209. Он является элементом второго порядка с тремя узлами, что позволяет более точно описывать криволинейную геометрию. Элемент SHELL209 учитывает изменение толщины оболочки, и поэтому может применяться для анализа высоконелинейных процессов при наличии больших и даже конечных деформаций. Формулировка данного элемента основана на логарифмических деформациях и действительных напряжениях.

При задании пластических свойств материала выбирается полилинейная модель Мизеса с кинематическим упрочнением. Отметим, что данный тип упрочнения учитывает эффект Баушингера и рекомендуется при циклическом нагружении.

Элемент оболочки получает свои свойства с помощью средств создания поперечных сечений, где можно указать число точек интегрирования по толщине. Для более точного описания изменения упругопластических деформаций по толщине

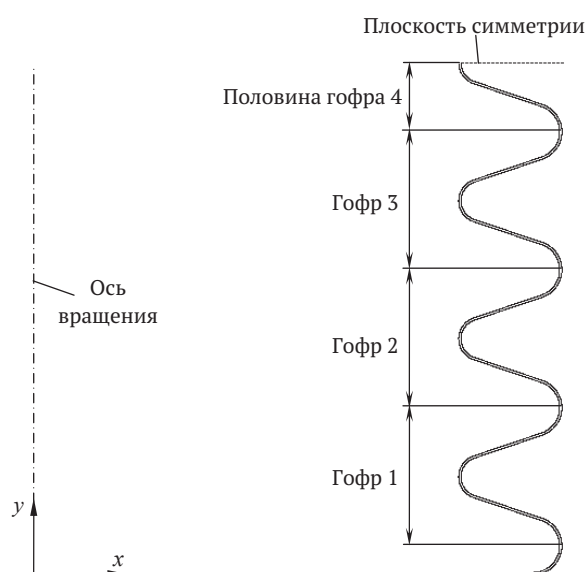


Рис. 2. Геометрическая модель сиффона

здесь выбирается максимально возможное число точек, равное девяти.

Помимо оболочечных элементов генерируются ещё и контактные элементы, моделирующие контактное взаимодействие двух слоёв гофрированной оболочки. При этом задаётся стандартный нелинейный контакт с трением, допускающий разделение поверхностей. Поскольку смазка между слоями отсутствует, коэффициент трения принят равным 0,05 (сталь по стали). Кроме контактного взаимодействия слоёв при рассматриваемых условиях нагружения в контакт могут войти также и стенки каждого гофра по внутренним поверхностям. Поэтому создаются ещё четыре контактных пары (по числу моделируемых гофров), причём для четвёртого гофра, который моделируется не полностью, строится контакт с недеформируемой поверхностью (линией), совпадающей с плоскостью симметрии.

Следует отметить, что решение данной задачи выполняется пошаговым методом последовательных нагружений. При этом для повышения точности решения и улучшения его сходимости каждый шаг нагружения разбивается на несколько дополнительных подшагов, в которых будут вычисляться промежуточные решения.

На первом шаге задаются граничные условия в виде запрета всех перемещений нижней кромки и условий симметрии на верхней кромке. Кроме того, к линиям, представляющим внутренний слой, прикладывается внутреннее давление.

На втором шаге дополнительно к нижней

кромке прикладывается осевое перемещение, вызывающее сжатие сальфона. На третьем шаге задаётся осевое перемещение, вызывающее растяжение сальфона. Все последующие пары шагов повторяют второй и третий шаги.

При определении долговечности с использованием деформационного подхода требуется график петли упругопластического гистерезиса в опасной точке (или точках) конструкции, где возникают наиболее неблагоприятные условия для накопления усталостных повреждений.

Анализ результатов расчёта НДС показывает, что наибольшие эквивалентные напряжения по Мизесу возникают при сжатии сальфона (чётные шаги) на внутренней поверхности наружного слоя двухслойной оболочки в местах впадин гофров (рис. 3). Таким образом, данные области и будут определять долговечность сальфона.

Диаграмма циклического деформирования определяет НДС тела при переменном нагружении и его кинетику, процесс накопления повреждений и характер разрушения [3]. Важными характеристиками этой диаграммы являются ширина и размах петли гистерезиса.

Результаты расчётов показывают, что на первых полуциклах нагружения (когда имеет место упрочнение материала оболочки) гофры деформируются по-разному, какие-то больше, а какие-то меньше. При этом на диаграммах деформирования для некоторых гофров можно заметить пикообразное изменение напряжения, обусловленное вовлечением в пластическое

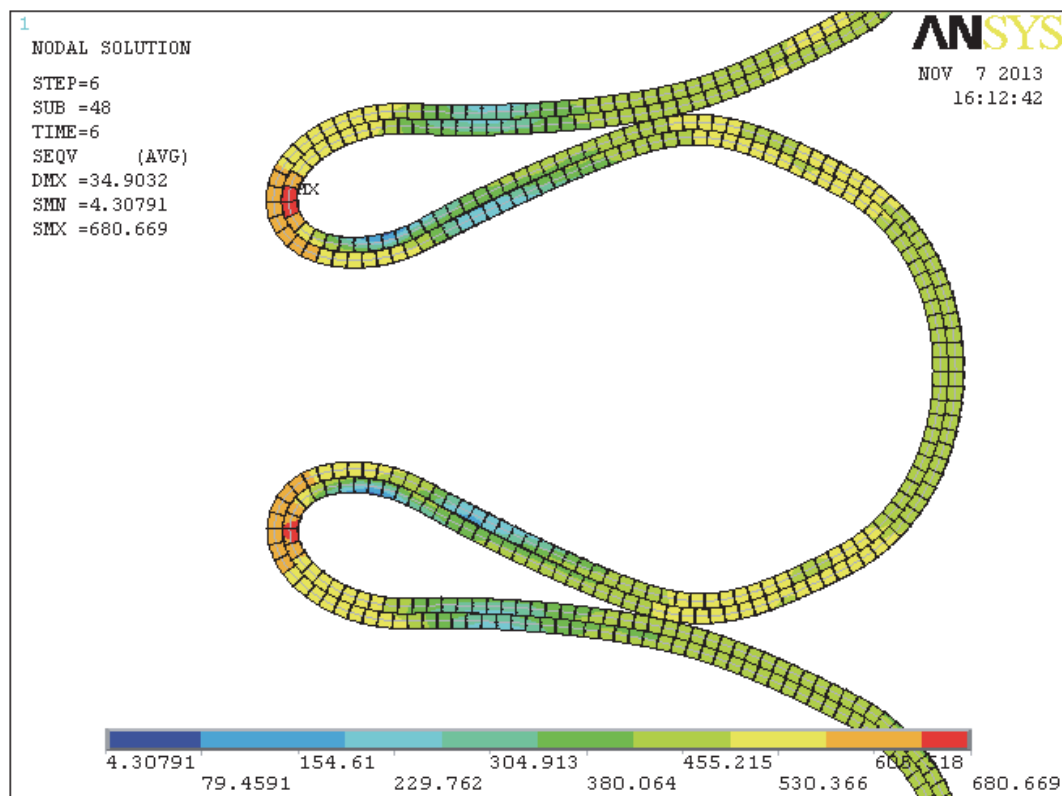


Рис. 3. Распределение напряжений по Мизесу (МПа) в конце шестого шага нагружения

деформирование соседних гофров. Однако со временем гофры начинают работать практически одинаково, и происходит стабилизация деформаций в цикле нагружения. Так, для самого нагруженного четвёртого гофра стабилизация петли гистерезиса наблюдается после семи полуциклов.

Следует отметить, что из-за действия внутреннего давления, а также эффекта Пуассона оболочка сильфона работает в условиях двухосного напряжённого состояния. Для учёта данного факта требуется построить диаграмму циклического деформирования в виде зависимости интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций ε_i . Такая кривая для наиболее нагруженного гофра, представлена на рис. 4, где отмечены номера полуциклов k . Видно, что после стабилизации петли гистерезиса размах интенсивности полных деформаций $\Delta\varepsilon_i$ здесь составляет 0,09623.

Для дальнейших расчётов потребуется амплитуда полных деформаций

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon_i}{2} = \frac{0,09623}{2} = 0,04811,$$

а также для коррекции кривой усталости по методу SWT значение максимальной интенсивности напряжений цикла $\sigma_{\max} = 758,3$ МПа.

Поскольку в нашем случае цикл нагружения не является симметричным, для коррекции кривой усталости по среднему напряжению используется SWT-модель, представленная уравнением (2). Помимо ε_a и σ_{\max} , найденных при помощи CAE-системы ANSYS, сюда входят четыре параметра σ'_f , ε'_f , b и c , для отыскания которых

требуются довольно дорогостоящие экспериментальные исследования. В отсутствие опытных данных здесь можно воспользоваться различными оценками этих параметров. Результаты таких расчётов для материала 12X18H10T представлены в табл. 1, причём после названия каждого метода указаны ссылки на статьи, где приведены соответствующие формулы. Здесь же представлены значения долговечности (в циклах), найденные из решения нелинейного уравнения (2).

Анализ полученных результатов показывает, что для четырёх из восьми методов оценки параметров уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина долговечность сильфона примерно одинакова и составляет порядка 50 циклов нагружения. Два метода – модифицированный метод универсальных наклонов, а также усреднённый метод (дающий для всех сталей практически одинаковые результаты) являются наиболее консервативными. При их использовании долговечность сильфона минимальна и равна примерно 25 циклам. И, наконец, два оставшихся метода приводят к среднему результату, около 36 циклов. Разброс результатов здесь в основном обусловлен различием в оценках коэффициента усталостной вязкости ε'_f , т.е. значения амплитуды деформации, при котором разрушение происходит за один полуцикл нагружения при условии отсутствия упругих деформаций.

Следует отметить, что все представленные выше оценки параметров деформационной кривой усталости получены для случая однородного НДС, когда напряжения и деформации постоянны по толщине.

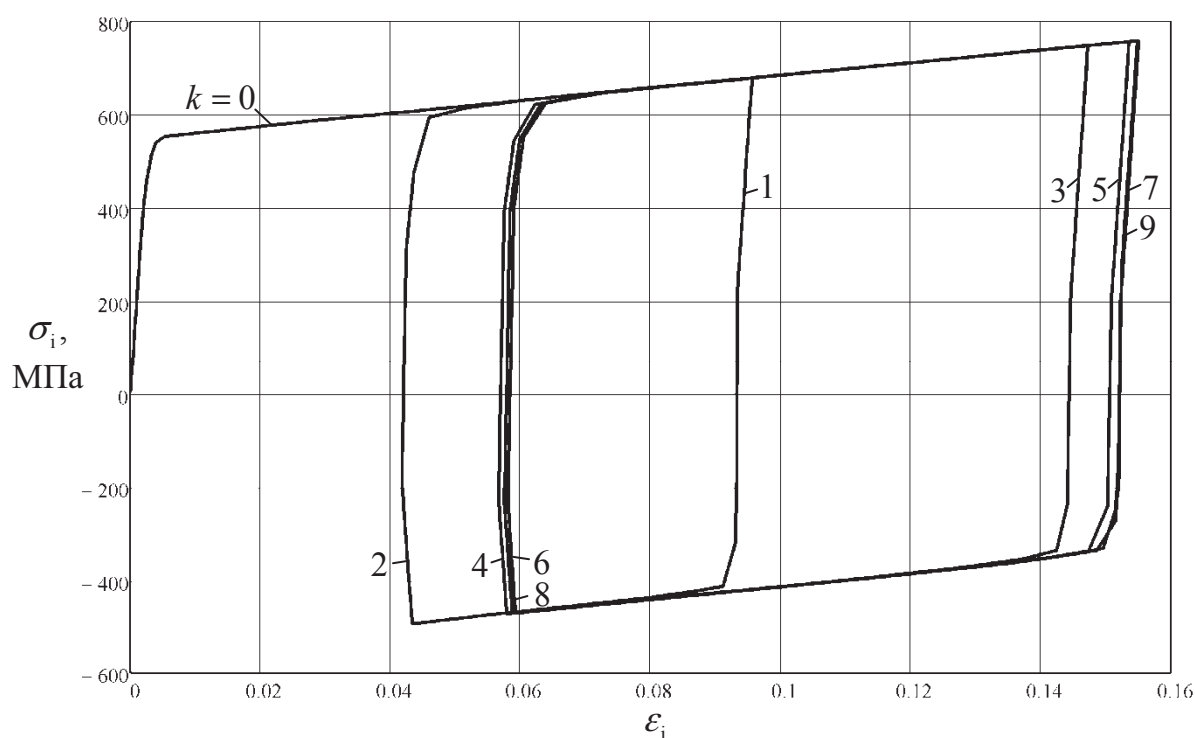


Рис. 4. Диаграмма циклического деформирования (гофр 4)

Таблица 1. Результаты расчётов долговечности сильфона

Название метода	σ'_f , МПа	ε'_f	b	c	N , цикл
Метод Митчелла [4]	1045	0,799	-0,079	-0,6	55,9
Метод универсальных наклонов Мэнсона [5]	1331	0,662	-0,12	-0,6	46,9
Модифицированный метод универсальных наклонов Муралидхарана-Мэнсона [4]	1128	0,379	-0,09	-0,56	25,3
Метод четырёхточечной корреляции Мэнсона [5]	1443	0,549	-0,125	-0,551	54,8
Модифицированный метод четырёхточечной корреляции Онга [6]	1259	0,799	-0,097	-0,634	52,9
Метод Боймеля-Зигера [7]	1050	0,553	-0,087	-0,58	35,4
Метод твёрдости Расла-Фатеми [8]	985,8	0,570	-0,09	-0,56	37,0
Усреднённый метод Мегиоларо-Кастро [9]	1050	0,45	-0,09	-0,59	24,2

Как отмечалось ранее, для рассматриваемого сильфона в местах впадин гофров, фактически определяющих долговечность данной конструкции, наблюдается изгиб каждого из слоёв двухслойной оболочки. При этом меридиональные деформации изменяются по толщине слоя по линейному закону. Деформации здесь принимают максимальные значения на поверхности слоя и убывают по мере удаления от неё. Таким образом, лишь небольшая часть сечения оболочки работает с амплитудой деформаций ε_a , по которой рассчитывается долговечность.

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что при неоднородном НДС, характеризуемом градиентом напряжений (де-

формаций) по толщине, сопротивление усталости существенно выше, чем при однородном НДС [10]. Оно увеличивается с ростом градиента, т.е. с уменьшением толщины.

Для учёта данного факта в идеале следует располагать экспериментальной кривой усталости, полученной по результатам испытаний до разрушения при циклическом изгибе. Для проката толщиной 0,5 мм из стали 12Х18Н10Т, из которого изготовлены слои рассматриваемого сильфона, такая кривая в координатах $\varepsilon_a - N$ приведена в работе [3]. При этом испытания проводились на изгиб, выполняемый вокруг жёсткого шаблона. Она представлена на рис. 5.

Как видно из графика, амплитуде деформаций $\varepsilon_a = 0,04811$ соответствует число циклов до

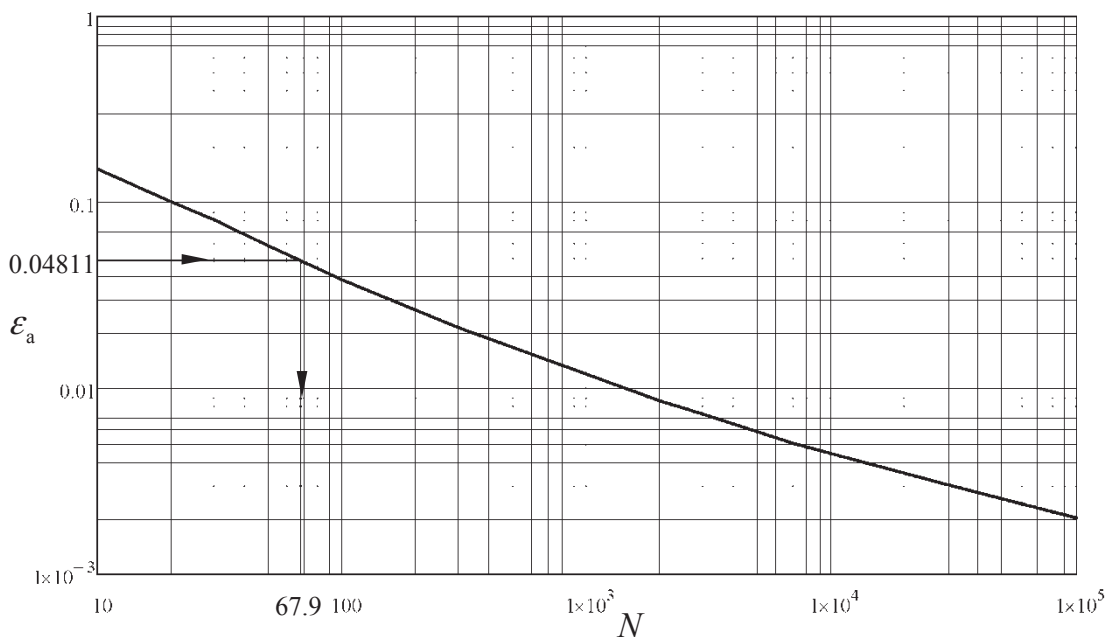


Рис. 5. Определение долговечности по экспериментальной кривой усталости

разрушения $N = 67,9$. Таким образом, можно окончательно принять, что долговечность рассматриваемого силфона составляет не менее 67 циклов нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morrow J.D.* Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. Internal friction, damping and cyclic plasticity // ASTM STP 378. Philadelphia (PA), 1965. P. 45-87.
2. *Smith K.N., Watson P., Topper T.H.* A stress-strain function for the fatigue metals // J. Mater. 1970. V. 5(4). P. 761-778.
3. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчёта и испытаний / С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, А.П. Гусенков и др. М.: Наука, 1975. 288 с.
4. *Muralidharan U., Manson S.S.* A modified universal slopes equation for estimation of fatigue characteristics of metals // J. Eng. Mater. Tech. 1988. V. 110. P. 55-58.
5. *Manson S.S.* Fatigue: a complex subject – some simple approximation // Exp. Mech. 1965. V. 5. P. 193-226.
6. *Ong J.H.* An improved technique for prediction of axial fatigue life from tensile data // Int. J. Fracture. 1993. V. 15, No. 3. P. 213-219.
7. *Bäumel J.A., Seeger T.* Materials data for cyclic loading – supplement. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990.
8. *Roessle M.L., Fatemi A.* Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations // Ibid. 2000. V. 22. P. 495-511.
9. *Meggiolaro M.A., Castro J.T.P.* Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions // Int. J. Fatigue. 2004. V. 26. P. 463-476.
10. *Троценко В.Т.* Усталость металлов при неоднородном напряжённом состоянии. Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. 129 с.

ESTIAMTION OF LOW-CYCLE LIFE OF THE SILPHON COMPENSATOR

© 2015 A.I. Aistov, Y.V. Skvortsov, S.N. Perov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

In this study evaluation of intense-deformed state of the goffered two-layer pipe was made. By results of this evaluation the low-cycle life was estimated.

Keywords: low-cycle life, fatigue life, finite element method, hysteresis loop, plasticity, silphon compensator, goffered two-layer pipe.

Sergey Perov, Doctor of Technics, Professor at the Space Engineering Department. E-mail: perov@imi-samara.ru
Yuri Skvortsov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Space Engineering Department. E-mail: proch@ssau.ru
Aleksey Aistov, Graduate Student at the Space Engineering Department. E-mail: a_i_aistov@gmail.com