

ЦИКЛИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ОДНОПРОЛЁТНОГО ГОФРИРОВАННОГО ПАКЕТА

© 2012 И. Д. Эскин, Р. И. Алкеев, В. И. Иващенко

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

Методом Бубнова – Галёркина решена задача о циклическом сжатии многослойного однопролётного гофрированного пакета с учётом поворота концевых сечений многослойного гофра. В решении получены соотношения, описывающие любой процесс загрузки в поле упругогистерезисных петель пакета. Получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и теоретических результатов.

Многослойный однопролётный гофрированный пакет, циклическое сжатие, метод Бубнова - Галёркина, экспериментальное исследование.

Многослойные кольцевые пакеты гофрированных стальных лент нашли применение в качестве демпферов опор роторов и трубопроводов авиационных ГТД [1 - 3, 7]. Одиночный многослойный гофр применяется в качестве пружины в разгрузочных устройствах демпферов опор роторов тяжелых ГТД [5]. Прямые многослойные многопролётные пакеты применяются в бамперных и пенальных защитных устройствах автомобилей [10 - 13].

Многослойные гофрированные демпферы опор роторов и трубопроводов обладают высокими демпфирующими свойствами, высокой надёжностью, ресурсом, не меньшим, чем ресурс изделия, стабильностью упругодемпфирующих свойств в эксплуатации. Они удобно включаются в силовую схему изделия, имеют малые габариты и вес, способны воспринимать значительные постоянные силы (например, силу веса ротора, приходящуюся на опору) без значительного ухудшения упругодемпфирующих свойств. Эти демпферы могут работать при повышенных температурах, в условиях отсутствия смазки, в агрессивных средах. Они технологичны, так как их изготавливают холодной штамповкой.

Бамперные и пенальные защитные устройства автомобилей [10 - 13] способны рассеять 30 – 50% кинетической энергии удара, при краш-испытаниях легкового автомобиля на фронтальный удар.

К числу положительных качеств всех конструкций демпферов, выполненных в ви-

де многослойных многопролётных гофрированных пакетов [15, 16], следует отнести также возможность изменения в широких пределах их жёсткости без изменения габаритов демпфера, а также геометрических параметров гофра (следовательно, без изменения технологических штампов) только за счёт изменения величины натяга, с которым пакет вставляется в изделие, толщины лент и их количества. Кроме того, кольцевые многослойные многопролётные гофрированные пакеты стальных лент применяются в щелевых и лабиринтных уплотнениях роторов, эффективных при больших смещениях роторов [8, 9], и в качестве виброизолятора в конструкции защитных шлемов [14].

Задача о циклическом сжатии многослойного многопролётного гофрированного пакета является важной задачей конструкционного демпфирования и её решения рассмотрены в [4, 6, 15 - 17]. В работе [6] задача решена методом Бубнова - Галёркина, но не учтены углы поворота сечений вершин гофров и не рассмотрены процессы последовательного отслоения (проскальзывания) вершин гофров относительно сжимающих опорных поверхностей при разгрузке или повторной нагрузке гофрированного пакета.

В работе [17] методом Бубнова – Галёркина решена задача о статическом циклическом сжатии многослойного многопролётного гофрированного пакета с учётом поворота сечений вершин гофров и постепенного отслоения вершин гофров при нагружении гофрированного пакета по повтор-

ным разгрузочным и нагрузочным процессам. Получены соотношения, позволяющие построить любой процесс загрузки в поле упругогистерезисных петель этого пакета.

К сожалению, результаты этой работы труднодоступны, так как эта монография опубликована давно в виде депонированной рукописи и, по-видимому, по этой причине не обсуждается в широко доступных более поздних работах [15, 16].

В работах [15, 16] построена математическая модель статического циклического сжатия прямого многослойного многопролётного гофрированного пакета.

В работе [15] указывается, что модель [6], а следовательно, и модель работы [17] (замечание авторов настоящей статьи), для случая неповорачивающихся сечений, лежащих в вершинах гофров, по сравнению с результатами, полученными с помощью математической модели [15, 16], даёт ошибку до 750% в величине рассеянной энергии и до 350% в величине средней циклической жесткости, и на этом основании делается вывод о непригодности модели [6] для её практического использования. Это утверждение неверно. Как раз модель работы [6] по сравнению с моделью работ [15, 16] даёт более точный результат, а указанные ошибки в величинах рассеянной и средней циклической жесткости даёт математическая модель работ [15, 16]. Поэтому мы приняли решение опубликовать все имеющиеся у нас результаты по этой тематике, в том числе и описанные в работе [17].

Нами проведены экспериментальные исследования в широком диапазоне параметров гофрированных пакетов, перекрывающем диапазоны параметров применяемых пакетов. Результаты расчёта построенной нами модели (модели работы [17]), а для модели [6] при большом числе пролетов пакета для нагрузочного и разгрузочного процессов, протекающих при полном отслоении вершин гофров пакета, хорошо совпадают с экспериментальными результатами.

Получено решение задачи о циклическом сжатии многослойного, многопролёт-

ного гофрированного пакета с неповорачивающимися сечениями в вершинах гофров. Соотношения, описывающие любые процессы загрузки, в этом случае значительно упрощаются. Это решение дает хорошую точность при большом числе пролётов и применено нами для расчета упругофрикционных характеристик бамперных защитных устройств автомобилей [10 - 13], в которых применяются многослойные гофрированные пакеты с большим числом пролётов (большим 30).

Выполненное нами решение этой задачи методом конечных элементов (МКЭ) дало удовлетворительное совпадение с результатами нашего экспериментального исследования и полученным нами приближенным аналитическим решением. Эти результаты будут опубликованы позднее.

Сравнение результатов, полученных с помощью математической модели [15, 16], с результатами эксперимента дало ошибки в величинах рассеянной энергии циклической жесткости указанного выше порядка.

В работе [15] указывается, что в модели [6] в соотношениях, описывающих нагрузочный и разгрузочный процессы в фазе полного расслоения пакета, число лент в пакете n входит в первой степени (в работах [15, 16] эти соотношения зависят от n^2) и, так как этот параметр оказывает существенное влияние на упругофрикционные характеристики пакета, авторы видят в этом одну из основных причин ошибочности работы [6].

В работе [17] для одиночного многослойного гофра для процесса первичного нагружения записана система уравнений, описывающих равновесие каждой ленты пакета под действующими на нее нагрузками. В результате решения этой системы получено соотношение, описывающее процесс первичного нагружения многослойного гофра, совпадающее с выражением (32), полученным методом Бубнова – Галёркина.

Этот результат также подтверждает правильность результатов работ [6, 17].

Кроме того, циклическое сжатие трёхслойной консоли с гофрированной прокладкой рассмотрено в [4]. Это решение даёт

также очень большие ошибки. Причина этих ошибок заключается в том, что в этой модели не учтено «накопление» действия сил трения к гофру прокладки, расположенному у заделки.

О причине ошибок работ [15, 16] можно только догадываться – это, по-видимому, некачественно проведенный эксперимент и неучёт эффекта «накопления» действия сил трения.

Решение задачи о циклическом сжатии многослойного однопролётного гофра является основой для решения задачи о циклическом сжатии многослойных многопролётных гофрированных прямых и кольцевых пакетов.

Циклическое сжатие одиночного однослойного гофра

Условные обозначения

Так как при рассмотрении циклического сжатия многослойного многопролётного гофрированного пакета часто возникает необходимость ссылки на соотношения настоящей работы и в обеих этих работах одинаковые физические параметры обозначены одинаково, условные обозначения, необъясненные в тексте этих работ, помещены единым списком в настоящей работе.

$i = 1, 3, 5, 7, \dots$ — порядковые номера процессов нагружения,

$i = 2, 4, 6, 8, \dots$ — порядковые номера процессов разгрузки,

n — число лент в пакете,

(*) — индекс, указывающий, что значения параметров взяты в конце этапа загрузки пакета (для одиночного гофра в конце процесса загрузки),

h — толщина ленты пакета,

b — ширина пакета,

f — начальный выгиб гофра ленты,

y_0 — текущий начальный выгиб гофра ленты,

t — шаг гофра ленты,

$I = bh^3/12$ — момент инерции поперечного сечения ленты,

E — модуль упругости материала лент пакета,

μ — коэффициент трения скольжения на контактных поверхностях пакета,

P_i — текущее значение циклической силы, действующей на одиночный гофир на i -й за-

грузке,

P_i^* — значение циклической силы, действующей на одиночный гофир в конце i -й загрузки,

x — координата текущего сечения гофра,

$\delta(x - t/2)$ — импульсивная функция Дирака, которая определяется следующим образом:

$\delta = 0$ при $t/2 < x < t/2$, $\delta = \infty$ при $x = t/2$,

$$\int_0^t \delta dx = 1,$$

θ — угол поворота конца гофра (при $x = 0$), найденный из решения задачи, рассмотренной в [17],

$S = b h$ — площадь поперечного сечения гофра,

N_{1i} — продольная сила, растягивающая или сжимающая одиночный гофир на первом этапе i -й разгрузки или i -й повторной нагрузки.

Первичное нагружение

Схема и принятая система координат показаны на рис. 1.

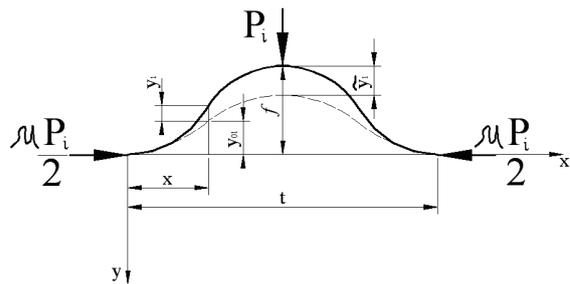


Рис.1. Схема нагружения одиночного гофра

Будем рассматривать гофир, у которого начальный выгиб мал по сравнению с его шагом ($f/t < 0,1$). В этом случае с достаточной для практики точностью гофир можно рассматривать как балку с первоначально изогнутой осью, описываемой соотношением

$$y_0 = -\frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{t} \right). \quad (1)$$

При первичном нагружении гофра силой P_1 концы гофра разъезжаются. Этому смещению препятствуют силы трения $\mu \frac{P_1}{2}$, приложенные к его концам. Дифференциальное уравнение изгиба гофра запишется в виде

$$EJ \frac{d^4 y_1}{dx^4} + \frac{1}{2} \mu P_1 \frac{d^2 y_{01}}{dx^2} = P_1 \delta \left(x - \frac{t}{2} \right), \quad (2)$$

где $y_{01} = y_0 + y_1$. (3)

Уравнение (2) решим методом Галеркина. Функцию распределения прогибов по длине гофра примем в виде

$$y_1 = \tilde{y}_1 \sin \frac{\pi x}{t}. \quad (4)$$

Такой вид функции выбран из следующих соображений: при первичном нагружении гофра его концы поворачиваются. Функция (4) удовлетворяет условиям $y'_1(0)$ и $y'_1(t) \neq 0$, $y'_1(0) = -y'_1(t)$ и $y_1(\frac{t}{2}) = 0$. Отметим, что значение \tilde{y}_1 , найденное с использованием функции (4), практически совпадает с значением \tilde{y}_1 , полученным в [17] с использованием более сложной функции:

$$y_1 = A \left(1 - \frac{2\pi x}{t}\right) + A_1 \sin \frac{\pi x}{t},$$

где постоянные A и A_1 определялись из следующих граничных условий:

$$y_1(0) = -y_1(t) = \theta, \quad y_1\left(\frac{t}{2}\right) = 0, \quad y_1\left(\frac{t}{2}\right) = y'_1.$$

Подставив (3) и (4) в (2), умножив затем согласно методу Галеркина правую и левую части уравнения на $\sin \frac{\pi x}{t}$, проинтегрировав его по длине гофра, получим

$$\tilde{y}_1 = \frac{4P_1 \left(\frac{t}{\pi} - \frac{2}{3}\mu f\right)}{\frac{t}{\pi} \left(C_0 - \mu P_1 \frac{\pi}{t}\right)}, \quad (5)$$

где обозначено $C_0 = 2EJ \frac{\pi^4}{t^3}$.

Углы поворота концевых сечений гофра найдем, продифференцировав (4), в виде

$$y'_1(0) = -y'_1(t) = \frac{\pi}{t} \tilde{y}_1. \quad (6)$$

Если известна деформация гофра \tilde{y}_1 , силу, сжимающую гофр, найдем из (5):

$$P_1 = \frac{C_0 \tilde{y}_1}{4 - \mu \frac{\pi^2}{t} \left(\frac{8}{3\pi} f - \tilde{y}_1\right)}. \quad (7)$$

Силу в конце первичного нагружения гофра $P_1^* = P_{1max}$ найдем из (7), подставив в него значение $\tilde{y}_1 = \tilde{y}_1^*$.

Разгрузка

При разгрузке гофра силы трения из-

меняют свое направление. Силы растяжения гофра, возникающие при его разгрузке, преодолевают силы трения только в конце первого этапа разгрузки. Поэтому гофр на первом этапе разгрузки деформируется без смещения концов. Будем также предполагать, что на первом этапе разгрузки в силу малости толщины гофра концевые сечения не поворачиваются. Поэтому текущее значение приращения деформации гофра на первом этапе разгрузки запишем в виде

$$y_{12} = \frac{\tilde{y}_{12}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{t}\right). \quad (8)$$

При свободных концах суммарная величина их перемещений будет равна

$$\Delta t = \frac{1}{2} \int_0^t \left(\frac{d(y_{01}^* + y_{12})}{dx}\right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^t \left(\frac{d y_{01}^*}{dx}\right)^2 dx, \quad (9)$$

где

$$y_{01}^* = -\frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{t}\right) + \tilde{y}_1^* \sin \frac{\pi x}{t}. \quad (10)$$

Подставив (8), (10) в (9) и пренебрегая величинами второго порядка малости, получим

$$\Delta t \approx \frac{\pi^2}{2t} \tilde{y}_{12} \left[f \left(1 - \frac{8}{3\pi}\right) + \frac{8}{3\pi} \tilde{y}_{01}^* \right], \quad (11)$$

где

$$\tilde{y}_{01}^* = -y_{01}^* \left(\frac{t}{2}\right) = f - \tilde{y}_1^*. \quad (12)$$

Так как концевые сечения гофра на первом этапе разгрузки не могут смещаться, перемещению (11) будет соответствовать сила, которую с учетом (12) можно записать в виде

$$N_{12} = \frac{\Delta t ES}{t} = \frac{3C_0 t}{\pi^2 h^2} \tilde{y}_{12} F_1, \quad (13)$$

где $F_1 = f - \frac{8}{3\pi} \tilde{y}_1^*$.

Дифференциальное уравнение, описывающее изгиб гофра на первом этапе разгрузки, запишется следующим образом:

$$EJ \frac{d^4 y_{12}}{dx^4} - N_{12} \frac{d^2 y_{12}}{dx^2} + \frac{1}{2} \mu P_1^* \frac{d^2 y_{12}}{dx^2} = (P_{12} - P_1^*) \delta \left(x - \frac{t}{2}\right), \quad (14)$$

где

$$y_{012} = y_{01}^* + y_{12}. \quad (15)$$

Подставив (8), (10), (13) и (15) в (14) и применив метод Галёркина, получим приращение деформации гофра на первом этапе разгрузки

$$\tilde{y}_{12} = \frac{P_1^* - P_{12}}{C_0 \left(1 + \frac{3}{2h^2} F_1 \right) - \frac{1}{4} \mu \frac{\pi^2}{t} P_1^*}. \quad (16)$$

Перемещение вершины гофра на первом этапе разгрузки равно

$$\tilde{\tilde{y}}_{12} = \tilde{y}_{12}^* - \tilde{y}_{12}. \quad (17)$$

Если задано перемещение вершины гофра $\tilde{\tilde{y}}_{12}$ и, следовательно, приращение перемещения \tilde{y}_{12} , то сила, сжимающая гофр на первом этапе разгрузки, запишется так:

$$P_{12} = P_1^* - \frac{\tilde{y}_{12}}{2} \left[2C_0 + \frac{3C_0}{h^2} F_1^2 - \frac{1}{2} \mu P_1^* \frac{\pi^2}{t} \right]. \quad (18)$$

Первый этап разгрузки закончится, когда начнётся проскальзывание противоположного направления. Учтя, что в конце первичной нагрузки гофр сжат в продольном направлении силой $\frac{1}{2} \mu P_1^*$, условие начала проскальзывания концевых сечений гофра запишем в виде

$$N_{12} = \frac{\mu}{2} (P_1^* + P_{12}). \quad (19)$$

Приращение перемещения вершин гофра в конце первого этапа разгрузки найдем, подставив (18) и (13) в (19):

$$\tilde{y}_{12}^* = \frac{2P_1^*}{C_0 \left[\frac{3}{2h^2} F_1^2 + \frac{6t}{h^2 \pi^2 \mu} F_1 + 1 \right] - \frac{1}{4} \mu \frac{\pi^2}{t} P_1^*}. \quad (20)$$

Перемещение вершины гофра в конце первого этапа найдем, подставив (20) в (17). Силу в конце первого этапа разгрузки найдем из соотношения (18), подставив в него значение \tilde{y}_{12}^* , определенное из (20).

На втором этапе разгрузки деформирование гофра происходит при проскальзывании его концевых сечений.

Зависимость силы от перемещения точки ее приложения на втором этапе разгрузки можно получить, не повторяя всех выкладок, если в формуле (7) поменять знак

перед μ на противоположный:

$$P_{22} = \frac{C_0 \tilde{\tilde{y}}_{22}}{4 + \mu \frac{\pi^2}{t} \left(\frac{8}{3\pi} - \tilde{\tilde{y}}_{22} \right)}. \quad (21)$$

Второй этап закончится, когда сила достигнет величины $P_{22}^* = P_{22\min}^* \geq 0$ и перемещение величины $\tilde{\tilde{y}}_{22}^* = \tilde{\tilde{y}}_{22\min}^* \geq 0$.

В случае полной разгрузки, когда $P_{22}^* = 0$, $\tilde{\tilde{y}}_{22}^* = 0$, гофр, при последующем нагружении деформируется снова по процессу первичного нагружения.

Повторная нагрузка

Повторная нагрузка осуществляется при последующем нагружении гофра после его частичной разгрузки ($P_{22}^* > 0$, $\tilde{\tilde{y}}_{22}^* > 0$).

На первом этапе повторной нагрузки гофр деформируется также без проскальзывания и поворота его концевых сечений, так как силы трения, снова сменившие знак, не преодолеваются возникшей продольной нагрузкой.

Перемещение вершины гофра определяется соотношениями, аналогичными (17) и (16):

$$\tilde{\tilde{y}}_{13} = \tilde{y}_{22}^* + \tilde{y}_{13}, \quad (22)$$

$$\tilde{y}_{13} = \frac{P_{13} - P_{22}^*}{C_0 \left[1 + \frac{3}{2h^2} F_{22}^2 \right] + \frac{1}{4} \mu \frac{\pi^2}{t} P_{22}^*}, \quad (23)$$

где $F_{22} = \frac{8}{3\pi} \tilde{\tilde{y}}_{22}^* - f$,

сила - соотношением

$$P_{13} = P_{22}^* + \tilde{y}_{13} \left[C_0 \left(1 + \frac{3}{2h^2} F_{22}^2 \right) + \frac{1}{4} \mu \frac{\pi^2}{t} P_{22}^* \right]. \quad (24)$$

Продольная сдвигающая сила определяется уравнением

$$N_{13} = \frac{3C_0 t}{\pi^2 h^2} \tilde{y}_{13} F_{22}. \quad (25)$$

Первый этап повторной нагрузки окончится, когда продольные сдвигающие силы преодолеют силы трения:

$$|N_{13}| = \frac{\mu}{2} (P_{22}^* + P_{13}^*). \quad (26)$$

Подставив в (26) (24) и приравняв ре-

зультаты подстановки (25), определим приращение перемещения вершины гофра в конце первого этапа повторной нагрузки в виде

$$\tilde{y}_{13}^* = \frac{P_{22}^*}{C_0 \frac{3}{h^2} (-F_{22}) \left(\frac{t}{\mu\pi^2} + \frac{1}{4} F_{22} \right) - \frac{C_0}{2} - \frac{\mu\pi^2 P_{22}^*}{8t}} \quad (27)$$

Перемещение вершины гофра и силу в конце первого этапа повторной нагрузки найдём из (22) и (24), подставив в них (27).

Далее процесс нагружения гофра описывается соотношением (7).

Экспериментальная проверка полученного решения показала, что для удовлетворительного совпадения с экспериментом (см. рис. 3,4) в соотношения (7) и (21) должен быть введён экспериментальный поправочный коэффициент $K_э = 1,5$.

Соотношения, определяющие петлю гистерезиса, в форме, справедливой для любой i – й загрузки

Запишем соотношения, определяющие петлю гистерезиса однослойного однопролётного гофра, в форме, справедливой для любой i – й загрузки гофра, с учетом экспериментальной поправки.

Сила, действующая на гофр на любой i -й загрузке, когда концевые сечения гофра смещаются и поворачиваются, описывается соотношением

$$P_i = \frac{K_э C_0 \tilde{y}_i}{4 + (-1)^i \frac{\mu\pi^2}{t} \left(\frac{8}{3\pi} - \tilde{y}_i \right)} \quad (28)$$

Сила, действующая на первом этапе i -й загрузки, когда гофр деформируется без смещения и поворота, описывается соотношением

$$P_{ir} = P_{i-1}^* + \tilde{y}_{ir} \left[(-1)^{i+1} C_0 \left(1 + \frac{3}{2h^2} F_{i-1}^2 \right) + \frac{1}{4} \mu \frac{\pi^2}{t} P_{i-1}^* \right], \quad (29)$$

где $F_{i-1} = \frac{8}{3\pi} \tilde{y}_{i-1}^* - f$.

Перемещение вершины гофра на i -й загрузке можно представить в виде

$$\tilde{y}_{li} = \tilde{y}_{i-1}^* - (-1)^i \tilde{y}_{li} \quad (30)$$

Вследствие наличия экспериментальной поправки более рациональным является

определение приращения перемещения в конце первого этапа i -й загрузки \tilde{y}_{li}^* из условия сшивки процессов загрузки гофра при неподвижных и подвижных концевых сечениях в конце первого этапа.

Подставив (30) в (28), приравняв результат подстановки (29) и отбросив величины второго порядка малости, получим с учетом, что $K_э = 1,5$:

$$\tilde{y}_{li}^* = \frac{P_{i-1}^* \left[4 + (-1)^i \frac{\mu\pi^2}{t} \left(\frac{8}{3\pi} f - \tilde{y}_{i-1}^* \right) \right] - 1,5 C_0 \tilde{y}_{i-1}^*}{C_0 \left\{ 2,5 (-1)^i + (-1)^i \frac{6}{h^2} F_{i-1}^2 + \frac{\mu\pi^2}{t} \left(1 + \frac{3}{2h^2} F_{i-1}^2 \right) \left(\frac{8}{3\pi} f - \tilde{y}_{i-1}^* \right) \right\}} - \frac{P_{i-1}^* \left[4 + (-1)^i \frac{\mu\pi^2}{t} \left(\frac{8}{3\pi} f - \tilde{y}_{i-1}^* \right) \right] - 1,5 C_0 \tilde{y}_{i-1}^*}{P_{i-1}^* \frac{\mu\pi^2}{t} \left[2 + (-1)^i \frac{\mu\pi^2}{4t} \left(\frac{8}{3\pi} f - \tilde{y}_{i-1}^* \right) \right]} \quad (31)$$

Величину перемещения вершины гофра и силу в конце первого этапа разгрузки найдём из (30) и (29), подставив в них \tilde{y}_{li}^* из (31).

Циклическое сжатие многослойного однопролётного гофрированного пакета

Принятая расчетная схема многослойного гофра показана на рис.2, где показана принятая эпюра распределения давлений по лентам пакета.

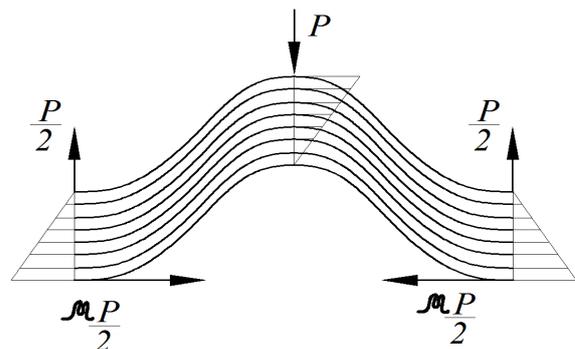


Рис.2. Схема нагружения одиночного многослойного гофра

При циклическом сжатии многослойного одиночного гофра определение точного распределения давления между слоями, а следовательно, и сил трения на контактных поверхностях и программы проскальзывания представляет чрезвычайно трудную и громоздкую задачу.

Для обоснования приближенной методики решения задачи (принятой эпюры распределения сдавливающей нагрузки между

лентами пакета) в [17] рассмотрен первичный процесс нагружения многослойного гофра малого шага ($t/h \leq 20$) на этапе полного расслоения пакета. У этого пакета был задан физически обоснованный закон распределения сдвливающей нагрузки не только по высоте, но и длине пакета. Для простоты было принято, что концевые сечения лент не поворачиваются. Задача решалась методом Галёркина.

В результате была определена сдвливающая нагрузка, действующая на каждый слой (ленту) пакета, и сила, действующая на пакет в этом случае, записывается в виде

$$P_1 = \frac{C_0 \tilde{y}_1}{1 + \frac{\pi^2}{4} \mu (\tilde{y}_1 - f)}, \quad (32)$$

где C_0 - жесткость многослойного гофра без трения,

$$C_0 = \frac{2n\pi^2 EJ}{t^3}. \quad (33)$$

Сравнив (32) с соотношением (5) [6], приходим к выводу, что на этапах, когда пакет полностью расслоен, он деформируется как одна лента с жесткостью, равной сумме жесткостей всех лент.

При большом шаге гофра $t/h > 20$ с учетом известного принципа Сен - Венана можно принять эпюру распределения давления, показанную на рис.2.

Справедливость этого допущения подтверждена не только экспериментально (см.рис.3,4) но и результатами решения задачи о циклическом сжатии многослойного многопролетного гофрированного пакета методом МКЭ (эти результаты будут опубликованы позднее).

Заметим, что принятие эпюры распределения давления между лентами пакета, показанной на рис.2, эквивалентно принятию допущения об одновременном проскальзывании лент при нагружении пакета.

При этом справедливо и допущение, что на этапе, когда пакет не расслоен, он деформируется, так же как одна лента с жесткостью, равной сумме жесткостей лент, концевые сечения которых не поворачиваются и не проскальзывают.

В случае, показанном на рис.2, уравнение, описывающее изгиб любого s -го слоя пакета, запишется так:

$$EJ \frac{d^4 y_1}{dx^4} + \frac{1}{2} \mu \frac{P_1}{n} \frac{d^2 y_{01}}{dx^2} = \frac{P_1}{n} \delta \left(x - \frac{t}{2} \right). \quad (34)$$

Решив (34) методом Галёркина, силу, приложенную к вершине гофра, найдем также в виде (32).

Соотношения, описывающие любой i -й процесс загрузки многослойного гофра, получим из соотношения (28), (29), (31), подставив в них значения жесткости C_0 из (33).

Результаты экспериментального и расчетного исследования

Описание экспериментальной установки и методика эксперимента будут опубликованы позднее.

Результаты экспериментального и расчетного исследования представлены на рис.3,4.

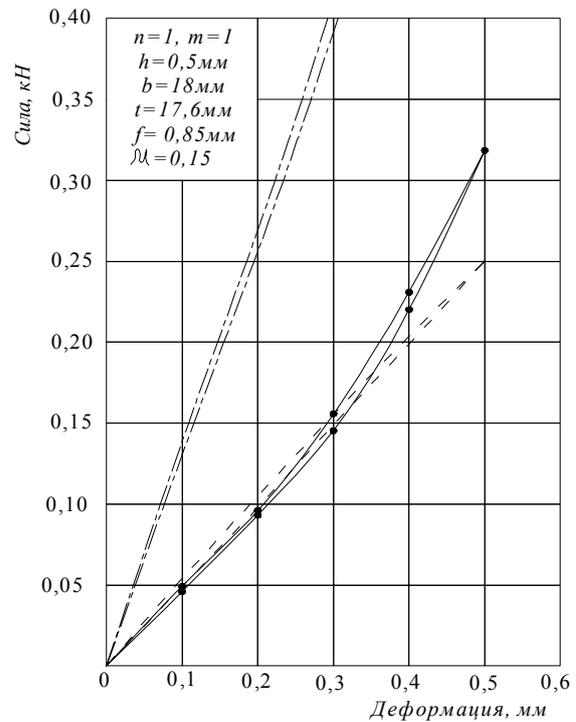


Рис.3. Результаты экспериментального исследования

На рисунках показаны процессы загрузки, ограничивающие поля упругогистерезисных петель различных компоновок пакета. Нагрузочный процесс в этом случае представляет собой первичный процесс нагружения пакета (в тренировочных циклах пакет полностью разгружался). Последний этап разгрузки, когда пакет также расслоен, занимает почти весь интервал деформации пакета.

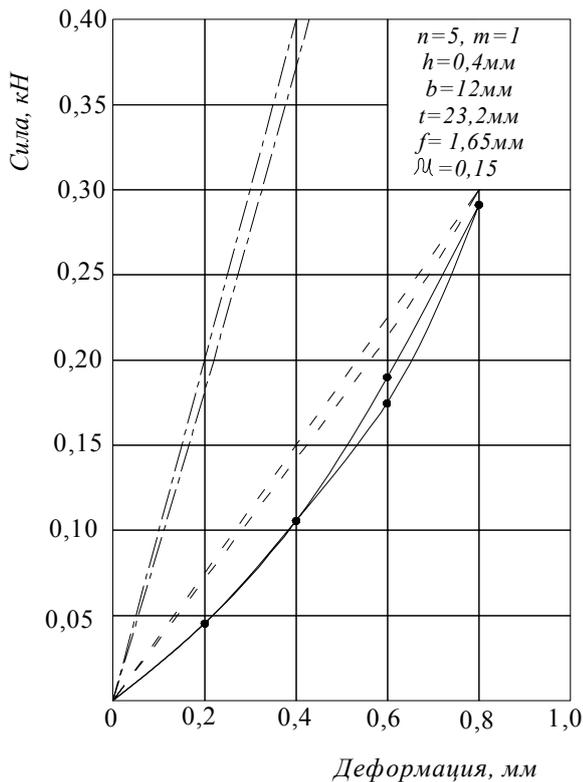


Рис.4. Результаты расчетного исследования

На рис. 3, 4 сплошной линией с черными точками изображены процессы, полученные экспериментально, штриховой линией – процессы, полученные расчетом из соотношений (27) и (33) для первичного нагружения при $i=1$ и для разгрузки при $i=2$, штрихпунктирной линией изображены эти процессы, рассчитанные по упрощенной модели, не учитывающей поворота концевых сечений пакета. Из рисунков видно, что для одиночного однослойного и многослойного гофра упрощенная модель дает неприемлемо большие ошибки. Модель, учитывающая поворот концевых сечений при введении в расчетные формулы поправочного экспериментального коэффициента $K_{\varepsilon}=1,5$, достаточно точно отражает реальный процесс циклического сжатия как однослойного, так и многослойного однопролетного гофрированного пакета.

Библиографический список

1. А.с. 200343 СССР МПК F16f 16/10. Металлический термостойкий упругофрикционный демпфер [Текст] / Е.М.Семенов, П.Ф.Андреев, Н.С.Кондрашев

//Б.И.-1967.-№16.

2. А.с. 383923 СССР, МКл F16f 7/00. Пластинчатый демпфер [Текст] / И.Д.Эскин, Ю.К.Пономарев, Ю.И.Ефремов // БИ.-1973.-№24.

3. А.с. 1203251 СССР, МКИ F16F 7/00. Демпфирующее устройство [Текст] / И.Д.Эскин, В.И. Иващенко //БИ.-1981.-№18.

4. Волк, И.М. Поперечный изгиб трехслойной консоли с гофрированной прокладкой при циклическом нагружении [Текст] / И.М. Волк, Г.А. Новиков // Тр. КуАИ.- Вып. 36.- 1969.

5. Иващенко, В.И. Методика расчета разгрузочного устройства для демпферов опор роторов [Текст] / В.И. Иващенко, И.Д. Эскин // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. - Куйбышев: КуАИ, 1985. - С. 39 – 45.

6. Кондрашов, Н.С. Упругофрикционные характеристики демпферов с гофрированными лентами [Текст] / Н.С. Кондрашов // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. - Куйбышев: КуАИ, 1972.- Вып.51. - С.45-62.

7. Мальтеев, М.А. Методология определения упругодиссипативных характеристик опор трубопроводов с многослойными пакетами [Текст] / М.А. Мальтеев, Ю.К. Пономарев // Надежность механических систем. – Самара: Изд-во СГТУ, 1995. - С.146.

8. Пат. на изобретение №2348849 РФ, МПК В60R 19/00. Уплотнение роторов турбомашин [Текст] / И.Д. Эскин, И.А. Жданов. – Оpubл. 10.03.2009, Бюл.№7.

9. Пат. на изобретение №2382207 РФ, МПК В60R 19/00. Уплотнение ротора турбомашин [Текст] / И.Д. Эскин, И.А. Жданов. – Оpubл. 20.02.2010, Бюл.№5.

10. Пат. на полезную модель №78463 РФ, МПК В60R 19/00. Защитное устройство повышающее безопасность водителя и пассажиров при аварии автомобиля [Текст] / И.Д. Эскин, Р.И. Алкеев. - Оpubл. 10.07.2008, Бюл.№33.

11. Пат. на полезную модель №79845 РФ, МПК В60R 19/00. Защитное устройство повышающее безопасность водителя и пасса-

жиров при аварии автомобиля [Текст] / И.Д. Эскин, Р.И. Алкеев. - Оpubл. 15.09.2008, Бюл.№2.

12. Пат. на полезную модель №82171 РФ, МПК В60R 19/00. Пенальное защитное устройство для повышения безопасности водителя и пассажиров при аварии автомобиля [Текст] / И.Д. Эскин, Р.И. Алкеев. - Оpubл. 20.04.2009, Бюл.№11.

13. Пат. на полезную модель №84791 РФ, МПК В60R 19/00. Устройство повышающее уровень защиты от травматизма водителя и пассажиров [Текст] / И.Д. Эскин, Р.И. Алкеев. - Оpubл. 20.07.2009, Бюл.№20.

14. Пат. на полезную модель №107903 РФ, МПК В60R 19/00. Шлем, защищающий от травм / И.Д. Эскин, В.И. Сусликов, С.В.

Сусликов - Оpubл. 10.09.2011, Бюл.№25.

15. Многослойные демпферы двигателей летательных аппаратов [Текст] / [Ю.К. Пономарев и др.]. - Самара: СГАУ, 1998. - 232с.

16. Чегодаев, Д.Е. Демпфирование [Текст] / Д.Е. Чегодаев, Ю.К. Пономарев. - Самара: СГАУ, 1997. - 334с.

17. Эскин, И.Д. О циклическом сжатии многопролетного гофрированного пакета пластин [Текст] / И.Д. Эскин, В.И. Иващенко. Депонированная рукопись №8050-13 от 21.11.1985г. реферат опубл. в библиограф. указ. ВИНТИ «Депонированные рукописи», 1986, №2 б/о 570.

CYCLED PRESSURE OF THE MULTILAYERED MULTISPAN PACKAGRCORRUGATED PACKAGE

© 2012 I. D. Eskin, R. I. Alkeev, V. I. Ivashchenko

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

Us by the Bubnov - Galerkin method to solve the problem of cyclic compression laminated single-impurity flying corrugated package with respect to rotation of end sections of laminated corrugated. The decision received relations describing any process of loading in the elastic - hysteresis loops of the package. The good agreement between experimental and theoretical results.

Multi layered multispans corrugated package, cycled pressure, Bubnov-Galerkin method, experimental research.

Информация об авторах

Эскин Изольд Давидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории №1, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-11. E-mail: eskinid_33@mail.ru. Область научных интересов: конструкционное демпфирование, динамика и прочность.

Алкеев Руслан Иванович, ассистент кафедры инженерной графики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-11. E-mail: ruruslan@hotmail.ru. Область научных интересов: конструкционное демпфирование, динамика и прочность.

Иващенко Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-10 E-mail: ivashch@yandex.ru. Область научных интересов: конструкционное демпфирование, динамика и прочность.

Eskin Izold Davidovich, Candidate of Science, Senior Lecturer, laboratory research engineer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-11. E-mail: eskinid_33@mail.ru. Area of research: construction dumping, dynamics and strength research.

Alkeev Ruslan Ivanovich, Research Assistant of Engineering Drawing Department of Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-11. E-mail: ruruslan@hotmail.ru. Area of research: construction dumping, dynamics and strength research.

Ivashchenko Vladimir Ivanovich, Candidate of Science; Senior Lecturer, head of engineer drawing sub-faculty, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-10. E-mail: ivashch@yandex.ru. Area of research: construction dumping, dynamics and strength research.