

## ЦИКЛИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ МНОГОСЛОЙНОГО МНОГОПРОЛЁТНОГО ГОФРИРОВАННОГО ПАКЕТА С УЧЁТОМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЕГО ЛЕНТ

© 2020

**Р. И. Алкеев** доцент кафедры инженерной графики;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[wild\\_cat\\_ruru@mail.ru](mailto:wild_cat_ruru@mail.ru)

**В. И. Сусликов** кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции  
и проектирования двигателей летательных аппаратов;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[suslikov\\_v\\_i@yandex.ru](mailto:suslikov_v_i@yandex.ru)

**И. Д. Эскин** кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[Izold.eskinid@mail.ru](mailto:Izold.eskinid@mail.ru)

Методом конечных элементов с использованием редактора «Ansys» выполнено решение задачи о циклическом сжатии однослойного и многослойного гофра и однослойного многопролётного гофра. Эту задачу можно рассматривать как первую часть общей сложной нелинейной задачи о циклическом сжатии многослойного многопролётного гофрированного пакета с сухим трением на контактных поверхностях. Выполнен анализ известных опубликованных решений этой задачи. Важность решения задачи объясняется наличием удачных примеров практического применения в области авиа- и ракетного двигателестроения в качестве демпфирующих устройств. Известные решения задачи получены для циклического сжатия многослойного многопролётного пакета в области его упругих деформаций и для одной и той же геометрической формы гофра. Актуальной для разработки противоударных демпфирующих устройств одноразового действия, повышающих пассивную безопасность автомобиля – бамперных защитных устройств, является задача улучшения массовой характеристики устройства. Она может быть решена применением однослойных или двух, трёхслойных многопролётных пакетов с оптимально подобранной геометрической формой гофра, деформируемых в упругопластической области. Поэтому задачи решены с учётом упругопластической деформации гофров для любой их геометрической формы. Полученные решения позволяют построить любые процессы загрузки в поле упругогистерезисных петель пакета. Исследовано влияние параметров гофрированного пакета на его упругофрикционные характеристики, в том числе формы гофра и наличия зазоров между лентами пакета в вершинах их гофров.

*Однослойный и многослойный гофр; однослойный многопролётный гофр; циклическое сжатие; пластические деформации; метод конечных элементов.*

---

**Цитирование:** Алкеев Р.И., Сусликов В.И., Эскин И.Д. Циклическое сжатие многослойного многопролётного гофрированного пакета с учётом пластической деформации его лент // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 1. С. 106-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-106-117

### Введение

Эффект рассеивания энергии при сжатии пакета гофрированных лент за счёт проскальзывания лент относительно опорных поверхностей с реализацией сил трения известен давно. Кольцевые многослойные, многопролётные, гофрированные пакеты используются в качестве демпферов опор роторов в авиационных двигателях НК8, НК8-4, НК22, НК144; турбонасосных агрегатах (ТНА) ракетных двигателей; в качестве разгрузочного устройства демпферов опор роторов авиационных газотурбинных двигателей

(ГТД) [1]. В газотурбинных двигателях применяются пакеты кольцевых лент в опорах трубопроводов [2] для снижения их вибраций. В последнее время появились патенты РФ на конструкции блисков роторов компрессоров ГТД с оригинальными конструкциями демпферов [3] для гашения вибраций их рабочих лопаток и длинных пустотелых широкохордых лопаток вентиляторов авиационных двухконтурных турбореактивных двигателей (ДТРД) [4], на бамперные и пенальные устройства, защищающие автомобиль, водителя и пассажиров при аварии [5 – 9]. Многослойные гофрированные пакеты применяются также в качестве упругих элементов, создающих сдавливающую нагрузку между слоями рессор [10].

Такое широкое использование многослойных гофрированных пакетов объясняется тем, что они обладают высокими упругофрикционными характеристиками (УФХ). Максимальный коэффициент рассеивания при циклическом сжатии этих пакетов  $\psi_{\max} = 3,5$ , а у многослойных рессор, сдавливающая нагрузка между слоями которых создана выпрямлением гофров гофрированных слоёв этих рессор, при их циклическом изгибе  $\psi_{\max} = 5$  [11].

Циклическое сжатие многослойных гофрированных пакетов исследовалось во многих работах. В диссертационной работе [11] экспериментально исследовано циклическое сжатие двустороннего упругогистерезисного упора, составленного из двух двухпролётных многослойных гофрированных пакетов. Показано, что эти упоры во всём практически важном диапазоне параметров этих пакетов, в диапазоне деформаций, когда физическая нелинейность системы невелика, приближённо подобны по упругофрикционным свойствам. Для этих упоров в этом диапазоне деформаций пакетов в критериальных координатах «безразмерная сила – безразмерная деформация» построено единое обобщённое поле упругогистерезисных петель и численно методом Рунге – Кутты решена задача о вынужденных колебаниях массы, подвешенной на этом двустороннем упругогистерезисном упоре.

В [12] методом Галеркина решены задачи о циклическом сжатии многослойного многопролётного гофрированного пакета между двумя параллельными жёсткими плитами и циклического одноосного нагружения кольцевого многослойного многопролётного гофрированного пакета. Недостатком этих решений является аппроксимация повторных процессов нагрузки и разгрузки пакета, при которых происходит постепенное проскальзывание вершин гофров относительно плит или корпуса и втулки демпфера, процессом с бесконечной жёсткостью. Это приводит к большим ошибкам при определении УФХ кольцевых пластинчатых демпферов опор роторов ГТД и ТНА, амплитуда деформаций гофров которых не превышает 0,1...0,2 мм.

В работах [13;14] методом Галеркина решена задача о циклическом сжатии многослойного многопролётного гофрированного пакета между двумя параллельными жёсткими плитами. В [13] получены аналитические соотношения, позволяющие расчётным путём построить поле упругогистерезисных петель пакета (любой нагрузочный или разгрузочный процесс в этом поле). В [14] получено более простое аналитическое решение этой задачи и в широком диапазоне параметров проведено её экспериментальное и расчётное исследование. Особенностью этого экспериментального исследования является то, что гофрированные ленты изготавливались по способу, предложенному в [6]. Ленты гофрировались с начальным выгибом гофра, бóльшим остаточного выгиба гофра  $f$ . Затем пакет гофрированных лент нагружался до полного выпрямления его гофров и полностью разгружался. В эксперименте при циклическом сжатии в диапазоне деформаций  $0 \leq y \leq f$  пакет нагружался и разгружался по стабильным процессам. Показано, что результаты расчёта по упругой модели циклического сжатия гофрированного пакета [13] хорошо совпадают с результатами эксперимента во всём исследо-

ванном диапазоне параметров гофрированных пакетов с числом гофров  $m$  от 1 до 17. Результаты расчёта по более простой упругой модели [14] совпадают с результатами эксперимента при  $m \geq 10$ .

Это решение может быть использовано для расчёта параметров бамперного и пенальных защитных устройств автомобилей, для определения УФХ демпфирующих устройств длинных пустотелых широкохордовых лопаток вентиляторов авиационных ДТРД, для определения сдавливающей нагрузки в многослойной рессоре, для расчёта процессов сборки демпфирующих устройств с многослойными, многопролётными, гофрированными пакетами и может оказаться полезным в ряде других случаев.

В [14] показано, что при циклическом сжатии многослойного многопролётного гофрированного пакета между двумя абсолютно жёсткими плитами преобладающая часть энергии рассеивается за счёт работы сил сухого трения при проскальзывании вершин гофров пакета относительно жёстких плит и процессы нагружения многопролётного пакета из  $n$  гофрированных лент при его упругой деформации достаточно точно описываются циклическим сжатием одной гофрированной ленты с такими же числом пролётов  $m$ , шагом  $t$ , начальным выгибом гофра  $f$ , шириной ленты  $b$ , модулем упругости  $E$  и коэффициентом трения  $\mu$ .

Поэтому предпочтительно применять в бамперных защитных устройствах автомобилей блоки с одной гофрированной лентой, установленной с каждой стороны гладкой ленты. Это позволяет в тех же самых габаритных размерах бамперного защитного устройства разместить большее число последовательно соединённых блоков и, следовательно, существенно увеличить суммарную величину взаимных проскальзываний с сухим трением в упругогистерезисном элементе бамперного защитного устройства – пакете, собранном из блоков, а следовательно увеличить и величину энергии, рассеиваемой упругогистерезисным элементом. В некоторых случаях с целью улучшения прочностной характеристики упругогистерезисного элемента полезно применить блоки с пакетами, собранными из небольшого количества гофрированных лент (не более двух).

### Постановка задачи

При одностороннем сжатии пакета на каждую  $j$ -ю половину гофра действует продольная сила величиной

$$\mu \left( \sum_{i=1}^{j-1} P_i + \frac{P_j}{2} \right), \quad (1)$$

где  $j$  – номер половины гофра, отсчитываемый от крайней свободной половины гофра к закреплённой половине;  $P_j$  – сила, действующая на  $j$ -й гофр в направлении оси  $u$ ;  $\mu$  – коэффициент трения скольжения.

Из (1) видно, что продольная сила, которую должен преодолеть  $j$ -й гофр пакета, чтобы его вершина сместилась относительно плит, возрастает от свободных крайних гофров к центральному. В этом состоит эффект «накопления» (суммирования) действия сил сухого трения. Именно из-за действия этого эффекта при одновременном сжатии пакета на одну и ту же величину деформации жёсткости гофров пакета получаются неодинаковыми и возрастают от крайнего свободного гофра к центральному гофру. Аналогично возрастает и сила, действующая на гофр. Величина проскальзывания вершины гофра наоборот возрастает (суммируется) от центрального гофра к свободному гофру. Оба эти эффекта, во-первых, увеличивают энергию, рассеиваемую пакетом и, во-вторых, в определённой мере нивелируют энергии, рассеянные отдельными гофра-

ми. Так как энергия рассеивается в основном на границах пакета, при проскальзывании вершин гофров по пластинам, то при выполнении демпфирующего элемента из  $k$  последовательно соединённых пакетов энергия, рассеиваемая демпфирующим элементом при одной и той же деформации каждого пакета, также возрастёт примерно в  $k$  раз.

Все гофрированные однослойные и многослойные пакеты в первичном процессе нагружения деформируются с упругим проскальзыванием всех вершин гофров пакета, кроме центральной вершины центрального гофра, по плитам и с взаимным упругим проскальзыванием лент пакета, т.е. пакет деформируется как полностью расслоённый.

При загрузке пакета по любому повторному нагрузочному или разгрузочному процессу происходит постепенное распространение упругих проскальзываний вершин гофров по плитам от крайних гофров на свободных концах пакета к центральному гофру.

Рассмотренные выше модели решают задачу для пологих гофров с отношением  $t/f \leq 10$ , которые даже при полном выпрямлении деформируются упруго или зоны их пластической деформации в поперечных сечениях, лежащих в вершинах гофров, малы, и упругая модель деформации пакета даёт приемлемые по точности результаты. Здесь  $f$  – выгиб гофра;  $t$  – шаг гофра.

Но для автомобилей с массой, большей одной тонны, выгодно применять бамперные защитные устройства, у которых ленты многослойных (или однослойных) многопролётных гофрированных пакетов при аварии подвергаются большим пластическим деформациям. Применение таких защитных устройств позволяет значительно повысить их УФХ. Кроме того, решение этой задачи делает расчётным процесс изготовления гофрированных пакетов по способу [6].

Процессы циклического сжатия гофрированного пакета с учётом пластических деформаций его лент очень сложны. Деформации гофрированной ленты характеризуются тремя нелинейностями: нелинейным поведением материала, геометрическими нелинейностями и собственным нелинейным поведением контактных элементов, описывающих процесс трения гофров лент между собой и о жёсткие плиты. Сложны законы распространения упругих взаимных проскальзываний с сухим трением лент гофрированного пакета в вершинах его гофров, вершин гофрированного пакета по жёстким плитам и в каждом из контактов лент пакета и его вершин при циклическом сжатии гофрированного пакета по повторным нагрузочным и разгрузочным процессам. Сложны законы распространения пластических деформаций в сечении каждой ленты, проходящем через вершину гофра пакета, по лентам в этом сечении и в лентах по вершинам гофрированного пакета и вследствие взаимного влияния всех этих процессов друг на друга.

Рассмотрим физику протекания этих процессов. Как уже отмечалось, при сжатии гофрированного пакета по первичному процессу нагружения он деформируется как полностью расслоённый. При этом пластические деформации, прежде всего, возникают в вершине, расположенной у заделанного конца пакета, в ленте, в этом сечении опирающейся на плиту, в волокне этой ленты, непосредственно опирающемся на плиту. При дальнейшем нагружении пакета в этом сечении пластические деформации постепенно распространяются на всё сечение ленты, охватывают ленту за лентой, распространяясь в направлении от ленты, непосредственно опирающейся на плиту. При достаточно большом выгибе гофра  $f$  в этом сечении может даже образоваться пластический шарнир. Кроме того, пластические деформации постепенно распространяются от этого сечения к сечению, расположенному в вершине на свободном конце пакета, в сечениях, расположенных в вершинах гофра, постепенно распространяясь описанным образом. Первичный процесс нагружения пакета заканчивается при деформации пакета:

$y_{\max} \leq f$ . На первом этапе повторных разгрузочных и нагрузочных процессов пакет деформируется как чисто упругий без взаимных проскальзываний лент в сечениях в вершинах пакета и вершин пакета относительно плит. Первый этап этих процессов заканчивается, когда отслаивается лента, расположенная снаружи пакета, не контактирующая с плитой, в сечении в вершине гофра, расположенной на свободном конце пакета. С дальнейшим ростом деформации пакета в этом сечении ленты одна за другой постепенно отслаиваются, пока не отслоится последняя лента, вершина гофра которой контактирует с плитой в этом сечении. Параллельно этому процессу происходит постепенное распространение упругих взаимных проскальзываний с сухим трением от этой вершины к вершине, расположенной на заделанном конце пакета, и постепенное распространение взаимных проскальзываний описанным образом лент пакета в сечениях, расположенных в вершинах гофров. На последнем этапе этих процессов пакет деформируется полностью расслоённым.

### Метод и результаты решения задачи

В работе задача решена численным методом конечных элементов (МКЭ) с помощью программы *ANSYS*. Ниже обсуждаются результаты расчётного исследования задачи и сравнение их с экспериментальными результатами, полученными в [14].

**Одиночный однослойный гофр (рис. 1).** Геометрия гофра описывается по закону косинуса

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

Гофр опирается на две прямых линии *zigid*. На любом шаге вычислений нижняя линия описывается уравнением

$$Y(x) = 0.$$

Верхняя линия имеет возможность вертикальных перемещений в отрицательном направлении оси  $y$  и описывается выражением

$$Y(x) = f + h + y,$$

где  $-f \leq y \leq 0$  – величина смещения верхней линии в вертикальном направлении, равная деформации гофра  $y$  в сечении, контактирующем с верхней линией, на шаге вычисления.

Правый конец гофра жёстко закреплён:

$$y = 0 \text{ и } s = 0 \text{ при } x = 0,$$

где  $s$  – смещение в направлении оси  $x$ .

Левый конец гофра в сечении, контактирующем с плитой, скользит с заданным коэффициентом трения  $\mu$  по плите (по верхней линии). При этом в любом его  $i$ -м сечении выполняется условие

$$y_{0i} + y_i \leq f + y. \tag{2}$$

Причём, если в результате расчёта на каком-то шаге вычисления, в каких-то  $i$ -х сечениях, условие (2) не выполняется, то деформации  $y_i$  присваивается значение  $y$  и  $y_{0i}$  присваивается значение  $f$ . Эти условия описывают процесс «уплощения» вершины гофра при больших деформациях  $-f < y < -f + 0,1 \div 0,2$ .

Задача циклического сжатия гофра решается в приращениях деформации гофра  $\Delta y$ .



Рис. 1. Одиночный однослойный гофр

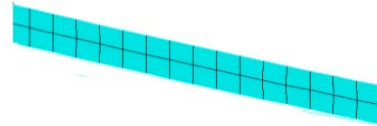


Рис. 2. Расчётная модель одиночного однослойного гофра

Модель описана плоским четырёхугольным конечным элементом *PLANE 42* высотой  $h = 0,15$  мм единичной ширины (рис. 2) с малой длиной грани  $0,1$  мм.

В процессе сжатия в вершинах гофров материал испытывает необратимые деформации за пределами закона Гука. Эти напряжения в нагартованной ленте из материала 65Г в вершине гофра при его сжатии превышают пределы прочности и текучести материала (соответственно  $\sigma_B = 980$  н/мм<sup>2</sup> и  $\sigma_{02} = 785$  н/мм<sup>2</sup>) с разностью относительных удлинений материала при пределе прочности и пределе текучести  $\Delta\delta = 8\%$ .

Геометрическая нелинейность гофра обусловлена кривизной его срединной поверхности. Нелинейность (физическая) проявляется в тех случаях, когда перемещения модели значительно меняют её жёсткость, например при деформации гофра, когда он практически выпрямляется (за счёт уплощения вершин гофров и уменьшения пролёта гофров). Изменение жёсткости гофра при сжатии учитывается в программе *ANSYS* включением команды *NLGEOM* с использованием итеративной схемы метода последовательных приближений Ньютона – Рафсона.

Контакты гофра о плиты описаны контактными элементами *CONTA 172* и *TARGE 169* с опцией возможности скольжения гофра по плите с заданным коэффициентом трения  $\mu$  без внедрения в неё.

Данный подход позволяет значительно сократить время расчёта без заметного снижения точности за счёт отсутствия краевых эффектов.

Расчёт процессов нагружения заканчивался при положении верхней прямой линии *rigid*, определяемым  $y = -1,95$  мм (при деформации сжатия  $y = -2$  мм гофр полностью выпрямляется) в фиксированной точке  $x = t/2$ . При дальнейшем росте деформации процессы нагружения описываются почти вертикальной прямой, и на расчёт этого участка процесса нецелесообразно тратить время.

Осевые напряжений  $\sigma_x$  в ленте гофра при деформации  $y = -1,85$  мм показаны на рис. 3. Они носят изгибный характер и уменьшаются по мере удаления от вершины гофра, но уровень напряжений сжатия в сечении ленты несколько выше напряжений растяжения за счёт сил трения по оси  $X$ . В вершине гофра эти напряжения превышают предел текучести материала, зона пластических деформаций мала, поэтому за удлинение ленты в осевом направлении  $X$  можно приближённо принять величину

$$\Delta S = L - t,$$

где  $L$  – геометрическая длина ленты, из которой изготовлен гофр.

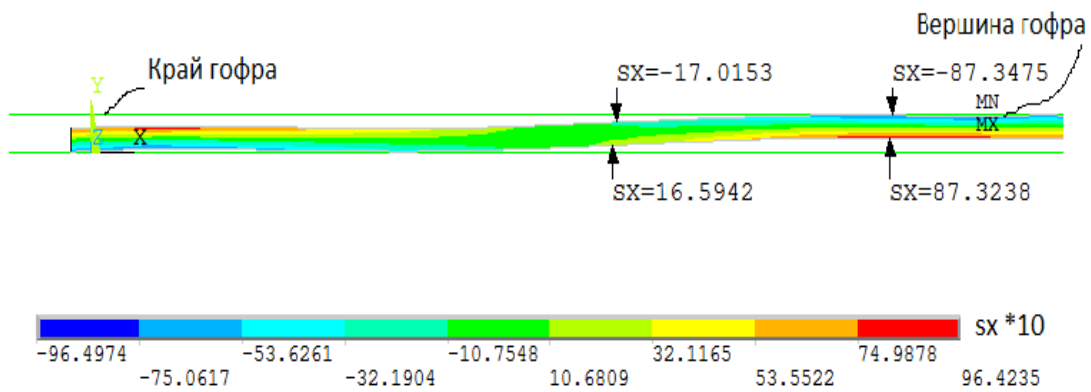


Рис. 3. Напряжения в ленте по оси X

Исследовались зависимости жёсткости гофра от его формы. Исследовались гофры ( $n=1, m=1$ ) с толщиной  $h=0,3$  мм, с шагом  $t=30$  мм и выгибом  $f=2$  мм. Наряду с гофром с формой косинус (2) (рис. 4) рассматривался гофр, описанный тремя дугами сопряжённых окружностей с радиусом, вычисленным из соотношения

$$R = (f + t^2/4f)/4$$

и равным  $R=17$  мм, (окружность) и гофр с прямыми склонами с радиусом сопряжения в вершине гофра 12 мм на дуге 10 градусов (прямая). Из рис. 4 видно, что с ростом деформации гофра до деформации  $y = -1,8$  мм усилие, сжимающее гофр, у всех трёх гофров линейно растёт. На этом участке деформации разница усилий при одной и той же деформации гофра (косинус) и гофра с прямыми склонами не превышает  $-30\%$ , а гофра (косинус) и гофра (окружность)  $-10\%$ . Затем при обжатии на  $\Delta y = -0,2$  мм линии усилий идут почти вертикально вверх.

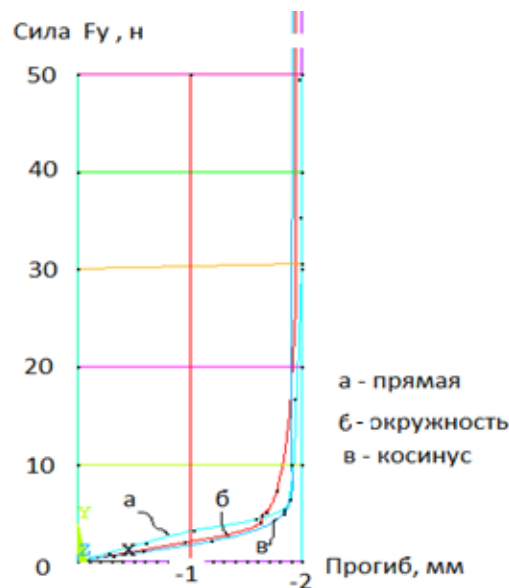


Рис. 4. Исследование влияния геометрической формы гофра

**Многопролётная гофрированная лента.** Расчётная модель представлена на рис. 5.



Рис. 5. Расчётная модель многопролётной гофрированной ленты

С целью определения влияния эффекта суммирования действия сил трения, приложенных к вершинам гофров в направлении от свободного конца ленты к её заделанному концу, на распределение сжимающих сил по вершинам гофрированной ленты исследовался процесс первичного нагружения стальной шлифованной нагартованной ленты толщиной  $h = 0,3$  мм, содержащей  $m = 17$  гофров с шагом  $t = 30$  мм и выгибом  $f = 3$  мм, при коэффициенте трения  $\mu = 0,15$ .

Расчёты показали, что при обжатии ленты на величину  $y = -1,21$  мм первый гофр, расположенный у заделки, воспринимает 11,3% равнодействующей сил, сжимающих ленту, второй гофр – 9,86%, третий гофр – 9,25% и последний гофр, расположенный у свободного конца ленты, – 2,35%. Таким образом, сила, сжимающая при указанной деформации первый гофр, приблизительно в 4,9 раза больше силы, сжимающей последний гофр ленты. Этот эффект оказывает сильное влияние на УФХ многопролётных, однослойных и многослойных гофрированных пакетов. Это влияние растёт с увеличением числа гофров в пакете ( $m$ ), и при большом числе гофров ( $m > 10$ ) только за счёт этого эффекта среднециклическая жёсткость пакета и рассеиваемая им энергия могут возрасти в несколько раз.

**Многослойный гофрированный пакет.** При построении расчётной модели вводят контактные элементы между всеми слоями (лентами) пакета. Как и у однослойного гофра, осевые напряжения имеют изгибный характер (рис. 6) и уменьшаются по мере удаления от вершины гофра в направлениях осей координат  $x$  и  $y$ . Но уровень напряжений сжатия в сечении каждой ленты также несколько выше напряжений растяжения за счёт действия сил трения по оси  $X$ .

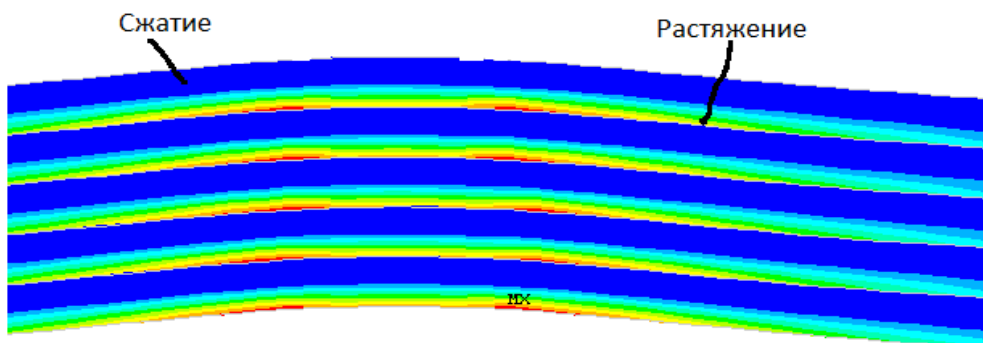


Рис. 6. Распределение осевых напряжений в слоях гофрированного пакета

Распределение давления между слоями пакета (рис. 7) носит локальный характер, сосредоточено в области вершин гофров и уменьшается в направлении оси  $y$  от ленты, непосредственно контактирующей с плитой, к последней ленте пакета. В пролётах между вершинами гофров ленты не давят друг на друга (имеет место потеря контактов между лентами).



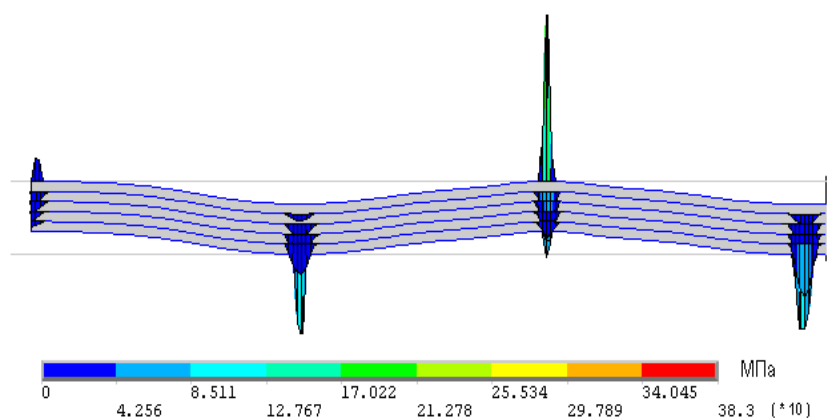


Рис. 7. Распределение давления между слоями многослойного гофрированного пакета

С целью установления требований к точности изготовления гофрированных лент пакета исследовалось влияние наличия зазоров между лентами пакета в вершинах его гофров (рис. 8).

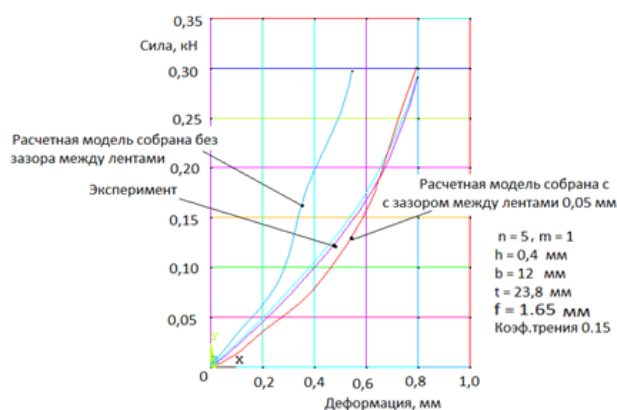


Рис. 8. Влияние зазоров между лентами на УФХ многослойного пакета

Проведённое исследование показало, что наличие даже небольших зазоров между лентами в вершинах гофров пакетов сильно влияет на УФХ и прочностную характеристику пакета – снижает жёсткость и величину рассеянной энергии. Из рассмотренного примера видно, что при наличии даже небольших зазоров 0,05 мм между лентами в вершине гофра пакета с суммарной величиной этих зазоров, равной 12% от выгиба гофров  $f$  лент пакета, жёсткость пакета, собранного с зазорами, меньше в 2,4 раза жёсткости пакета с такими же конструктивными параметрами, но собранного без зазоров. Причём следует отметить хорошее совпадение результатов расчёта с результатами экспериментального исследования пакета с аналогичными конструктивными параметрами и зазорами, проведённого в [14].

### Заключение

В отличие от известных решений, выполненных в упругой области деформаций для одной заданной геометрической формы гофра, в работе задачи решены с учётом упругопластической деформации гофров для любой их геометрической формы. Полученные решения позволяют построить любые процессы загрузки в поле упругогистерезисных петель пакета.

**Библиографический список**

1. Иващенко В.И., Эскин И.Д. Методика расчёта разгрузочного устройства для демпферов опор роторов // В сб.: «Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов». Куйбышев: КуАИ, 1985. С. 39-45.
2. Мальтеев М.А., Пономарев Ю.К. Методология определения упругодиссипативных характеристик опор трубопроводов с многослойными пакетами // В сб.: «Надёжность механических систем». Самара: СГТУ, 1995. С. 146.
3. Эскин И.Д., Ермаков А.И., Гаршин Е.А. Ротор компрессора авиационного газотурбинного двигателя со спаркой блисков и спаркой блиска с «классическим» рабочим колесом и со спаркой «классического» рабочего колеса с рабочим колесом с четвертой по шестую ступень с устройствами демпфирования колебаний рабочих лопаток этих блисков и рабочих колёс, ротор вентилятора и ротор бустера с устройством демпфирования колебаний рабочих широкохордных лопаток вентилятора, способ сборки спарки с демпфирующим устройством: патент РФ № 2665789; опубл. 04.09.2018; бюл. № 25.
4. Эскин И.Д., Ермаков А.И. Длинная пустотелая широкохордная лопатка вентилятора и способ её изготовления: патент РФ № 2626523; опубл. 28.07.2017; бюл. № 22.
5. Эскин И.Д., Сусликов В.И., Алкеев Р.И. Бамперное устройство автомобиля: патент РФ № 2506177; опубл. 10.02.2014; бюл. № 4.
6. Эскин И.Д., Алкеев Р.И., Сусликов В.И. Бамперное защитное устройство для легковых автомобилей и способ изготовления его упругогистерезисного элемента: патент РФ № 2559675, опубл. 10.08.2015; бюл. № 22.
7. Эскин И.Д., Храмова А.А., Сусликов В.И. Бамперное защитное устройство автомобиля: патент РФ № 2478052; опубл. 27.03.2013; бюл. № 9.
8. Эскин И.Д., Алкеев Р.И. Защитное устройство, повышающее безопасность водителя и пассажиров при аварии автомобиля: патент РФ № 78463; опубл. 27.11.2008.
9. Эскин И.Д., Алкеев Р.И. Пенальное защитное устройство для повышения безопасности водителя и пассажиров при аварии автомобиля: патент РФ № 82171; опубл. 20.04.2009.
10. Эскин И.Д., Ермаков А.И. Пустотелая широкохордая лопатка вентилятора. Способ её изготовления: патент РФ № 2622682; опубл. 19.06.2017; бюл. № 17.
11. Эскин И.Д. Исследование обобщённых упругофрикционных характеристик демпферов и амортизаторов авиационных двигателей. Дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1973. 315 с.
12. Кондрашов Н.С. Упругофрикционные характеристики демпферов с гофрированными лентами // В сб.: «Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов». Вып. 51. Куйбышев: КуАИ, 1972. С. 45-62.
13. Эскин И.Д., Алкеев Р.И., Иващенко В.И. Циклическое сжатие многослойного многопролётного гофрированного пакета // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 1 (39). С. 178-191. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-1(39)-178-191
14. Эскин И.Д., Алкеев Р.И., Иващенко В.И. Экспериментальные и расчётные исследования моделей циклического сжатия многослойного многопролётного гофрированного пакета // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 1 (39). С. 192-200. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-1(39)-192-200

## CYCLIC COMPRESSION OF A MULTI-LAYER MULTI-SPAN CORRUGATED PACKAGE WITH PLASTIC DEFORMATION OF ITS TAPES

© 2020

- R. I. Alkeev** Senior Lecturer, Department of Engineering Graphics;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[wild\\_cat\\_ruru@mail.ru](mailto:wild_cat_ruru@mail.ru)
- V. I. Suslikov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department  
of Aircraft Engine Design and Construction;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[suslikov\\_v\\_i@yandex.ru](mailto:suslikov_v_i@yandex.ru)
- I. D. Eskin** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department  
of Aircraft Engine Design and Construction;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[eskinid\\_33@mail.ru](mailto:eskinid_33@mail.ru)

In this article we present our solution of the problem of cyclic compression of a single-layer and multi-layer corrugation, as well as of a single-layer multi-span corrugation by the FEM method using Ansys. This problem can be considered as the first part of the general complex nonlinear problem of cyclic compression of a multi-layer multi-span corrugated package with dry friction on the contact surfaces. We conducted an analysis of the known published solutions to this problem, and we discovered inaccuracy of some of them and the physical reason resulting in this unacceptable error. A very large number of published solutions to this problem are generally explained by the presence of successful examples of their practical application in the field of aircraft and rocket engine manufacturing, by the wide possibilities of their use as damping devices in both of these areas, and, for example, in the automotive industry, by their high elastic-friction, strength and performance characteristics. All the known published solutions to this problem were obtained for cyclic compression of a multilayer multi-span package in the region of its elastic deformations and for the same geometric shape of the corrugation. The task of improving the mass characteristics of an engineering unit is quite relevant for the development of shock-proof single-shot damping devices that increase the passive safety of the car – bumper protective devices. This can be solved by using single-layer or two-layer, multi-span packages with an optimally selected geometric shape of the corrugation, deformable in the elastic-plastic region. Therefore, the above-mentioned problems are solved taking into account the elastic-plastic deformation of the corrugations for any of their geometric shapes. The obtained solutions make it possible to construct any loading processes in the field of elastic-hysteresis package loops. We also investigated the influence of the parameters of the corrugated package on its elastic-friction characteristics (including the shape of the corrugation and the presence of gaps between the tapes of the package at the tops of their corrugations).

*Single-layer and multi-layer corrugation; single-layer multi-span corrugation; cyclic compression; plastic deformation; FEM method.*

---

*Citation:* Alkeev R.I., Suslikov V.I., Eskin I.D. Cyclic compression of a multi-layer multi-span corrugated package with plastic deformation of its tapes. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 1. P. 106-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-106-117

### References

1. Ivashchenko V.I., Eskin I.D. Metodika rascheta razgruzochnogo ustroystva dlya dempferov opor rotorov. *V sb.: «Vibratsionnaya prochnost' i nadezhnost' dvigateley i sistem letatel'nykh apparatov»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1985. P. 39-45. (In Russ.)
2. Mal'teev M.A., Ponomarev Yu.K. Metodologiya opredeleniya uprugodissipativnykh kharakteristik opor truboprovodov s mnogoslownymi paketami. *V sb.: «Nadezhnost' mekhanicheskikh sistem»*. Samara: Samara State Technical University Publ., 1995. P. 146. (In Russ.)
3. Eskin I.D., Ermakov A.I., Garshin E.A. *Rotor kompressora aviatsionnogo gazoturbinnogo dvigatelya so sparkoy bliskov i sparkoy bliska s «klassicheskim» rabochim*

*kolesom i so sparkoy «klassicheskogo» rabocheho koleasa s rabochim koleksom s chetvertoy po shestuyu stupen' s ustroystvami dempfirovaniya kolebaniy rabochikh lopatok etikh bliskov i rabochikh koles, rotor ventilyatora i rotor bustera s ustroystvom dempfirovaniya kolebaniy rabochikh shirokokhordnykh lopatok ventilyatora, sposob sborki sparki s dempfiruyushchim ustroystvom* [Rotor of aircraft gas-turbine engine compressor with twin of blisks and twin of blisk with classic impeller and with twin of classic impeller with impeller with fourth-to-sixth stage with devices for damping vibrations of workers of these clips and impellers, fan rotor and booster rotor with device for damping of vibrations of working wide chord blades of fan, twin assembly method with damper device]. Patent RF, no. 2665789, 2018. (Publ. 04.09.2018, bull. no. 25)

4. Eskin I.D., Ermakov A.I. *Dlinnaya pustotelaya shirokokhordnaya lopatka ventilyatora i sposob ee izgotovleniya* [Long hollow wide chord fan blade and method of its manufacture]. Patent RF, no. 2626523, 2017. (Publ. 28.07.2017, bull. no. 22)

5. Eskin I.D., Suslikov V.I., Alkeev R.I. *Bampernoe ustroystvo avtomobilya* [Car protective bumper]. Patent RF, no. 2506177, 2014. (Publ. 10.02.2014, bull. no. 4)

6. Eskin I.D., Alkeev R.I., Suslikov V.I. *Bampernoe zashchitnoe ustroystvo dlya legkovykh avtomobiley i sposob izgotovleniya ego uprugogistereznogo elementa* [Car bumper and method of its strain hysteresis element fabrication]. Patent RF, no. 2559675, 2015. (Publ. 10.08.2015, bull. no. 22)

7. Eskin I.D., Khranova A.A., Suslikov V.I. *Bampernoe zashchitnoe ustroystvo avtomobilya* [Car protective bumper]. Patent RF, no. 2478052, 2013. (Publ. 27.03.2013, bull. no. 9)

8. Eskin I.D., Alkeev R.I. *Zashchitnoe ustroystvo, povyshayushchee bezopasnost' voditelya i passazhirov pri avarii avtomobilya* [Protective device improving the safety of the driver and passengers in the event of a car accident]. Patent RF, no. 78463, 2008. (Publ. 27.11.2008)

9. Eskin I.D., Alkeev R.I. *Penal'noe zashchitnoe ustroystvo dlya povysheniya bezopasnosti voditelya i passazhirov pri avarii avtomobilya* [Protective device improving the safety of the driver and passengers in the event of a car accident]. Patent RF, no. 82171, 2009. (Publ. 20.04.2009)

10. Eskin I.D., Ermakov A.I. *Pustotelaya shirokokhordnaya lopatka ventilyatora. Sposob ee izgotovleniya* [Hollow wide-chord blade of the fan and method of its manufacture]. Patent RF, no. 2622682, 2017. (Publ. 19.06.2017, bull. no. 17)

11. Eskin I.D. *Issledovanie obobshchennykh uprugofriktsionnykh kharakteristik dempferov i amortizatorov aviatsionnykh dvigateley. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Analysis of generalized elastic-friction characteristics of dampers and shock absorbers of aircraft engines: Candidate of Science (Engineering) Dissertation]. Kuybyshev, 1973. 315 p.

12. Kondrashov N.S. *Uprugofriktsionnye kharakteristiki dempferov s gofrirovannymi lentami. V sb.: «Vibratsionnaya prochnost' i nadezhnost' dvigateley i sistem letatel'nykh apparatov»*. Vyp. 51. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1972. P. 45-62. (In Russ.)

13. Eskin I.D., Alkeev R.I., Ivaschenko V.I. *Cyclic compression of a multilayer multispan laminated package of corrugated sheets. Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 1 (39). P. 178-191. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-1(39)-178-191

14. Eskin I.D., Alkeev R.I., Ivashchenko V.I. *Experimental and design analysis of models of cyclic compression for a multilayer multispan package of corrugated sheets. Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 1 (39). P. 192-200. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-1(39)-192-200