

УДК 621.4

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТА ЖЁСТКОСТИ АВИАЦИОННЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2012 И. С. Барманов

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

В статье приведена методика проектирования коэффициента жёсткости упругого элемента типа «беличье колесо». Методика позволяет повысить точность расчётов упругих элементов, применённых в авиационных двигателях.

Упругий элемент, деформация, коэффициент жёсткости, метод конечных элементов, аппроксимация.

При проектировании опорных узлов авиационных двигателей большое внимание уделяется их динамическим характеристикам жёсткости и демпфирования. Эти характеристики оказывают влияние на вибрационное состояние двигателя, которое отражается на конструкции летательных аппаратов – крыло, фюзеляж. В состав опорных узлов современных двигателей входит упругий элемент (УЭ) типа «беличье колесо». Конструкция упругого элемента типа «беличье колесо» представляет собой цилиндрическую втулку с продольными прорезями и фланцем для крепления (рис. 1).

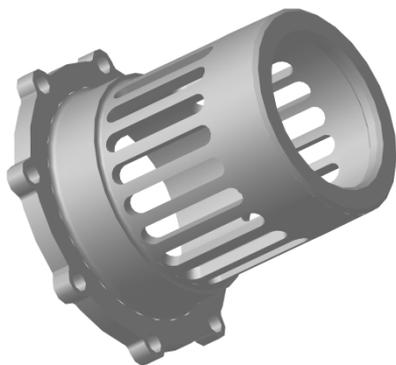


Рис. 1. Упругий элемент типа «беличье колесо»

Прорези образуют несколько равномерно расположенных по окружности стержневых элементов – балочек. Прорези, как правило, выполняются цилиндрическими фрезами, в результате чего поперечное сечение получается сложной формы (рис. 2), а на концах прорезей имеют место скругления,

радиус которых определяется диаметром фрезы.

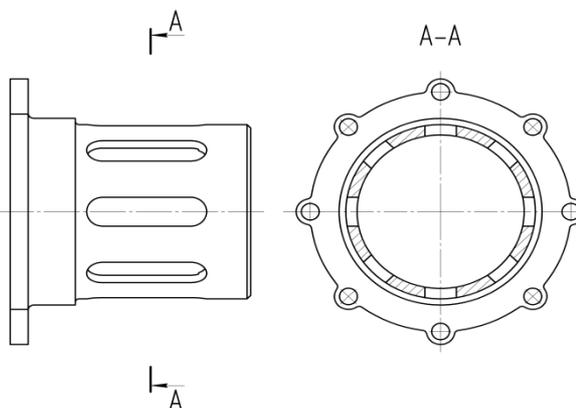


Рис. 2. Сечение балочек реального УЭ

Наибольшее практическое применение нашла формула, предложенная С.И. Сергеевым:

$$c = \frac{nEbhb(b^2 + h^2)}{2l_0^3},$$

где n – количество балочек; b , h , l_0 – соответственно ширина, толщина и длина балочек; E – модуль Юнга материала (рис. 3).

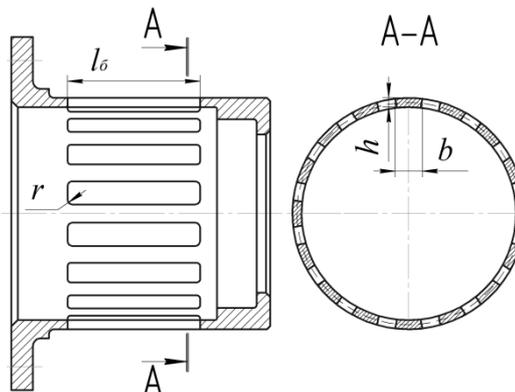


Рис. 3. Геометрические параметры УЭ

Позднее в данную формулу был введён поправочный коэффициент, и выражение для коэффициента жёсткости приняло следующий вид:

$$c = \frac{nEbhb(b^2 + h^2)}{2l_0^3} \frac{1}{\left(1 + \frac{2\sqrt{bh}}{l_0}\right)^3}. \quad (1)$$

Данная формула удобна в применении, однако она даёт хорошие результаты вычисления жёсткости при соотношении $l_0/h \geq 30$. Для конструкций авиационных УЭ это соотношение не выполняется, и формула может дать погрешности в вычислении до 40 % и более.

Формула (1) не учитывает величину радиуса скругления, а само наличие скруглений вносит неопределённость в отношении длины балочки: за длину можно принимать либо максимальную длину прорезей, либо длину прямолинейного участка прорезей, либо какую-то промежуточную величину.

Для повышения точности вычисления коэффициента жёсткости УЭ была создана параметрическая модель с использованием пакета ANSYS. С помощью данной модели получены поправочные коэффициенты, устраняющие недостатки формулы (1).

На рис. 4 представлена конечно-элементная модель упругой втулки типа «беличье колесо». При составлении конечно-элементной модели использован объёмный конечный элемент типа «solid 45» оптимизированной формы.

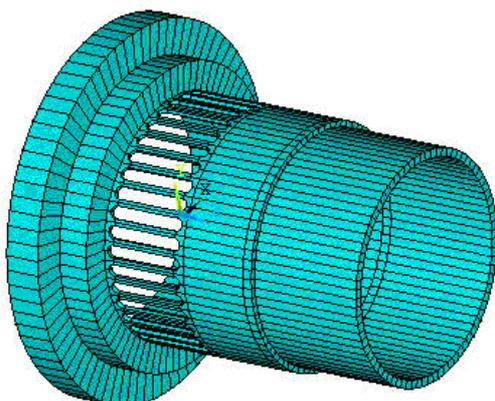


Рис. 4. Конечно-элементная модель

Исследования проводились в безразмерном виде. Были введены следующие параметры: безразмерная длина упругих балочек $L_0 = l_0/h$ и безразмерный радиус скругления пазов $\bar{r} = r/b$, где r – радиус скругления пазов.

Рассмотрены значения длин упругих балочек в интервале 18...60 мм при толщине балочки 1,73 мм, что соответствует интервалу безразмерной длины балочки 10...35. Для каждого значения длины исследовано их влияние на относительный коэффициент жёсткости $\bar{c} = c_0/c$, где c_0 и c – коэффициенты жёсткости, определяемые методом конечных элементов для нулевого и заданного радиуса скругления, соответственно.

Упругий элемент нагружался радиальной силой 1 кН, и для каждого значения безразмерных длин балочек определялось перемещение (рис. 5).

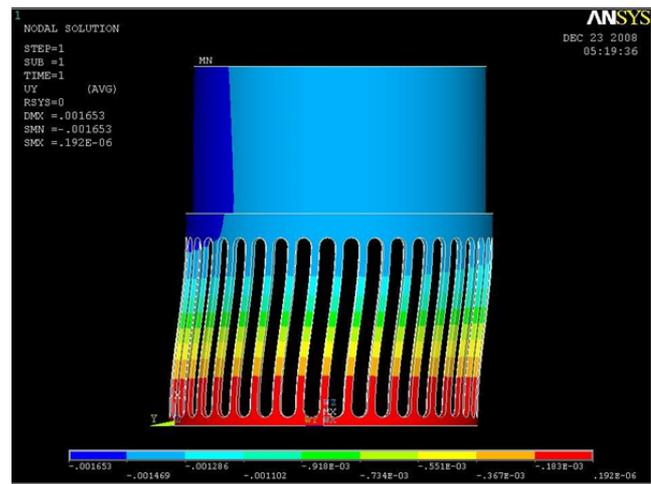


Рис. 5. Радиальные перемещения

Коэффициент жёсткости определялся как отношение приложенной силы к перемещению. Полученные зависимости представлены на рис. 6.

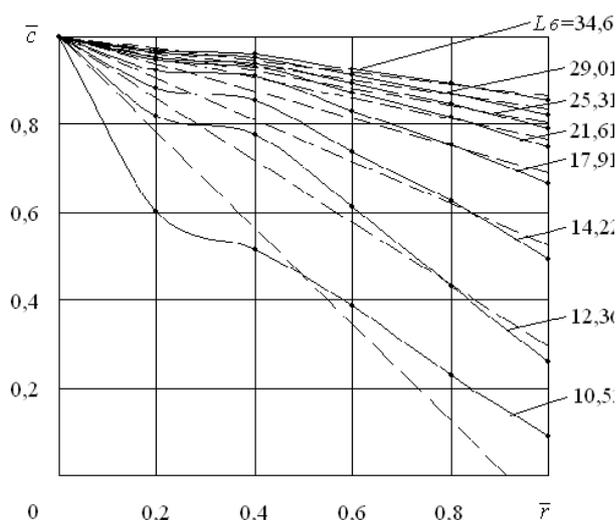


Рис. 6. Зависимость относительной жёсткости от безразмерного радиуса при различных длинах балочек

Зависимости представляют собой монотонно убывающие функции с точкой перегиба в интервале безразмерного радиуса 0,2...0,4. Для упругих балочек длиной более 30 мм при наличии небольшого радиуса скругления имеет место снижение жёсткости в пределах 10 %. В предельном случае, когда $\bar{r} = 1$, снижение коэффициента жёсткости достигает 35 %, что является существенным недостатком. При длине балочек свыше 60 мм графики функций постепенно сходятся, и наблюдаемое различие между ними невелико. В случае, когда безразмерная длина балочки не превышает 10, функция зависимости относительной жёсткости от безразмерного радиуса скругления вырождается, и дальнейшее аналитическое описание данной зависимости не представляется возможным.

Нахождение поправочного коэффициента проводилось линейной аппроксимацией группы функций методом наименьших квадратов. На рис. 6 аппроксимирующие прямые показаны штриховыми линиями. Общее уравнение аппроксимирующих прямых имеет вид:

$$\bar{c} = 1 - a\bar{r},$$

где a – коэффициент, определяющий наклон аппроксимирующих прямых.

Зависимость коэффициента a от безразмерной длины была аппроксимирована степенной функцией (рис. 7):

$$a = 8,2L_0^{-1,35}.$$

Погрешность аппроксимации не превышала 8 % в интервале $12 \leq L_0 \leq 35$.

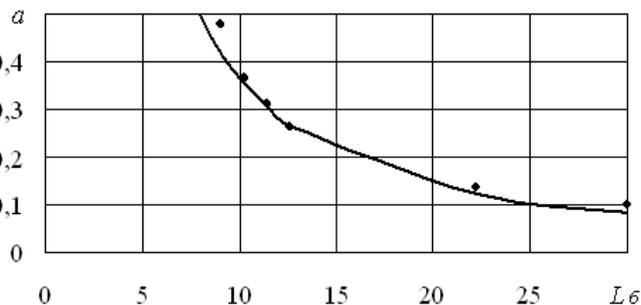


Рис. 7. Зависимость коэффициента a от безразмерной длины упругих балочек

Относительный коэффициент жёсткости УЭ принимает вид:

$$\bar{c} = 1 - 8,2L_0^{-1,35}\bar{r}.$$

Поправочный коэффициент, учитывающий радиус скругления пазов:

$$k_2 = \frac{1}{1 - 8,2\left(\frac{l_0}{h}\right)^{-1,35}\frac{r}{b}}.$$

Выражение для жёсткости с учётом радиуса скругления примет вид:

$$c = c_0 k_2.$$

Полученный коэффициент k_2 позволяет с достаточно высокой степенью точности учитывать радиус скругления пазов УЭ.

С целью дальнейшего совершенствования формулы (1) были оценены границы её применимости. Для этого построена зависимость безразмерного коэффициента жёсткости $\bar{c}_s = \frac{c_s}{c_0}$, где c_0 – коэффициент жёсткости, определяемый методом конечных элементов для нулевого радиуса скругления, c_s – коэффициент жёсткости, определяемый по формуле (1). График зависимости безразмерной жёсткости

от безразмерной длины балочек представлен на рис. 8.

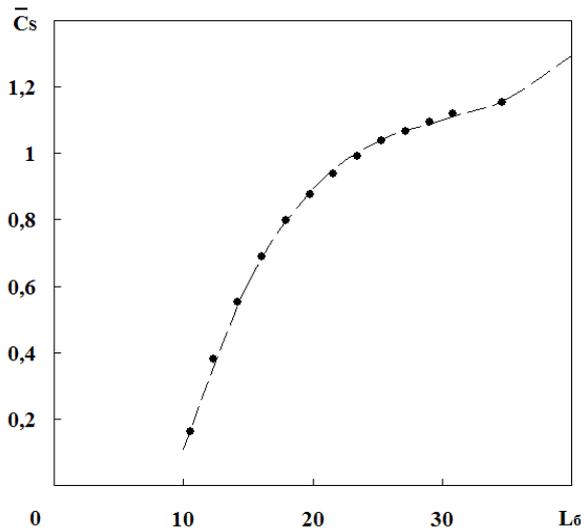


Рис. 8. Зависимость безразмерного коэффициента жёсткости \bar{c}_s от безразмерной длины упругих балочек

Из рис. 8 видно, что формула С.И. Сергеева может давать как завышенные, так и заниженные значения коэффициентов жёсткости. Причём при малых безразмерных длинах балочек значения могут отличаться до 80 %. Полученная зависимость аппроксимируется полиномом третьей степени:

$$\bar{c}_s = 0,000095L_6^3 - 0,0086L_6^2 + 0,27L_6 - 1,825.$$

Аппроксимирующая линия показана пунктиром на рис. 8. Достоверность аппроксимации (квадрат смешанной корреляции) вычислялась по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}$$

и составила $R^2 = 0,9995$.

Выражение для поправочного коэффициента будет иметь вид:

$$k_3 = \frac{1}{(0,000095L_6^3 - 0,0086L_6^2 + 0,27L_6 - 1,825)}.$$

Окончательное выражение для определения жёсткости УЭ примет вид:

$$c = \frac{nEbh(b^2 + h^2)}{2l_6^3} k_1 k_2 k_3.$$

Полученная формула позволяет с высокой степенью точности определять коэффициент жёсткости упругого элемента типа «беличье колесо», имеющего геометрические особенности, характерные для опор авиационных двигателей.

DESIGN PROCEDURE OF FACTOR OF RIGIDITY OF AVIATION ELASTIC ELEMENTS

© 2012 I. S. Barmanov

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (national research university)

In work the design procedure of factor of rigidity of an elastic element of type of "the squirrel wheel" is resulted. The given technique allows to raise essentially accuracy of calculations of the elastic elements applied in aviation engines.

Elastic element, deformation, rigidity factor, method of final elements, approximation.

Информация об авторе

Барманов Ильдaр Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: isbarmanov@mail.ru. Область научных интересов: конструкция и проектирование опор роторов ГТД.

Barmanov Ildar Sergeyevich, candidate of sciences technical, assistant, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (national research university). E-mail: isbarmanov@mail.ru. Area of research: design and designing of support of rotors GTE.