УДК 539.3

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК НА ОБОЛОЧЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГТД

Ю.С. Воробьев, д-р техн. наук,

М.В. Чернобрывко, канд. техн. наук,

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного, г. Харьков, Украина;

Л. Крушка, д-р фил.,

Военно-техническая академия, Варшава, Польша

Элементы газотурбинных двигателей подвергаются воздействию импульсных нагрузок, интенсивность которых растет с увеличением единичной и удельной мощности ГТД и скоростей движения транспортных средств. Известна актуальность изучения воздействия таких нагрузок на вентиляторные лопатки и лопаточный аппарат компрессоров авиационных двигателей [1, 2]. Однако элементы корпусов, роторов барабанного типа и входных устройств ГТД также могут подвергаться импульсным нагрузкам. Источником таких нагрузок являются твердые частицы, засасываемые в двигатель. Наиболее интенсивные нагрузки возникают при ударе частей лопаток и межлопаточных связей при их обрыве. При этом воздействие испытывают как элементы корпуса, так и ротора.

Скоростная деформация элементов ГТД при таких воздействиях может проходить как в упругой, так и в упругопластической стадиях [3 - 5]. Для моделирования элементов корпуса могут быть использованы зависимости для цилиндрических и конических оболочек [6 - 8]. Чтобы обеспечить возможность учета волновых процессов целесообразно использовать теорию оболочек типа Тимошенко. В зоне вентиляторных лопаток и лопаток первых ступеней компрессоров корпус часто укрепляется за счет композитных элементов. Поэтому целесообразно рассмотреть анизотропные модели оболочек [7]. Элемент корпуса ГТД рассматривается как часть цилиндрической оболочки. Система координат xyz связана со серединной поверхностью элемента оболочки. Оси x и y совпадают с главными осями анизотропии и направлены по главным кривизнам оболочки. Ось z перпендикулярна к серединной поверхности и направлена внутрь оболочки.

Вектор перемещений $U(u, v, w, \psi_x, \psi_y)$ имеет своими компонентами перемещения в направлении осей x, y, z и углы поворота нормали к серединной поверхности оболочки относительно осей x и y. Далее используются следующие обозначения:

h – толщина оболочки,

ρ - плотность материала,

E_x, E_y – модули упругости анизотропного материала при растяжении,

G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} – при сдвиге,

ν_{xy}, ν_{yz} – коэффициенты Пуассона,

$$D_x^0 = \frac{E_x h}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}};$$

$$D_y^0 = \frac{E_y h}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}}$$ - продольные,

$$D_{xy}^0 = G_{xy}h;\; D_{xz}^0 = G_{xz}h;$$

$$D_{yz}^0 = G_{yz}h$$ - сдвиговые жесткости оболочки в направлении главных осей анизотропии,

$$D_x = D_x^0 h^2/12;\quad D_y = D_y^0 h^2/12;\quad J = h^3/12$$ - моменты инерции нормального к серединной поверхности элемента.

Уравнения динамики ортотропной круговой цилиндрической оболочки в волновом приближении Тимошенко могут быть представлены в матричном виде [7]:

$$A\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+B\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}+C\frac{\partial^2 U}{\partial xy}+$$
$$+a\frac{\partial U}{\partial x}+b\frac{\partial U}{\partial y}+cU= \qquad . \qquad (1)$$
$$=P+M\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

Матрицы A и B имеют отличными от нуля только диагональные элементы:

$$A_{11}=D_x^0, A_{22}=D_{xy}^0, A_{33}=D_{xz}^0,$$
$$A_{44}=D_x, A_{55}=D_{xy};$$
$$B_{11}=D_{xy}^0, B_{22}=D_y^0, B_{33}=D_{yz}^0,$$
$$B_{44}=D_{xy}, B_{55}=D_y.$$

В остальных матрицах C, a, b и c отличны от нуля только такие элементы:

$$C_{12}=D_x^0\nu_{yx}+D_{xy}^0,\ C_{21}=D_y^0\nu_{xy}+D_{xy}^0,$$
$$C_{45}=D_x\nu_{yx}+D_z,\ C_{54}=D_y\nu_{xy}+D_z;$$
$$a_{13}=-\frac{D_x^0\nu_{yx}}{R},\ a_{31}=\frac{D_y^0\nu_{xy}}{R}, a_{32}=\frac{D_y^0}{R},$$
$$a_{34}=D_{xz}^0,\ a_{43}=-D_{xy}^0;$$
$$b_{23}=-\frac{D_y^0}{R},\ b_{35}=D_{yz}^0,\ b_{53}=-D_{yz}^0;$$
$$c_{33}=-\frac{D_y^0}{R},\ c_{44}=-D_{xz}^0,\ c_{55}=-D_{yz}^0;$$

P – вектор-столбец нагрузок с компонентами (p_x, p_y, p_z).

В матрице масс M отличными от нуля являются только диагональные члены:

$$m_{11}=m_{22}=m_{33}=\rho;\ m_{44}=m_{55}=\rho J.$$

Из уравнения (1) могут быть получены и уравнения изотропной оболочки.

Локальная импульсная нагрузка представляется как нагрузка, распределенная по прямоугольной площадке со сторонами x_0, y_0 или по круговой площадке радиусом r_0. Изменение нагрузок во времени может быть представлено с помощью экспоненциального или синусоидального законов [3, 7]

$$P=P_0e^{-t/t_1},$$
$$P=P_0\sin\frac{\pi t}{t_1}\left[\operatorname{sign}(t_1-t)+1\right] \qquad (2)$$

или с помощью функции Хэвисайда

$$P=P_0\left[H(t)-H(t_1-t)\right]. \qquad (3)$$

Здесь t_1 – время окончания действия нагрузки. Выбор закона нагружения зависит от конкретного процесса и метода численной реализации задачи.

Для интегрирования уравнений (1) используется явная разностная схема метода сеток [3, 7]. Размеры сеточной области с шагами Δx, Δy выбираются такими, чтобы отраженные волны не успевали приходить в исследуемую точку до момента анализа в ней поведения оболочки. По толщине оболочки в зависимости от решаемой задачи берется от одного до трех слоев. Перемещения и углы поворотов определяются в узлах сетки, а силы, моменты, деформации и напряжения – в центре образованных сеткой элементов [3, 7]. Члены уравнения (1) с недиффиренцируемыми переменными приводятся к узлам путем осреднения соответствующих значений. Шаг по времени Δt определяется скоростью распространения упругих волн и размеров шагов по координатам Δx, Δy [7]. В процессе вычислений проверяется сходимость и устойчивость разностной схемы и ведется контроль за выполнением разностного аналога закона сохранения энергии. Сила P(t) задается с помощью одной из зависимостей (2) или (3) или определяется в процессе расчета.

При контактном ударе перемещение W_m тела-ударника массой m, имеющего в момент начала контакта скорость V_0, будет [9]:

$$W_m(t)=V_0t-\frac{1}{m}\int_0^t dt\int_0^t P(t)dt=$$
$$=\alpha(P)+w(x_0,y_0,z_0,t), \qquad (4)$$

где $\alpha(P)$ принимает закон проникновения тела в оболочку,

$w(x_0,y_0,z_{0,}t)$ – перемещение оболочки в месте контакта с телом.

Предполагается, что на каждом интервале времени Δt сила P(t) изменяется по линейному закону. В начальный момент P(0) = 0 [9].

На каждом шаге при вычислении компонент тензора напряжений проверяется выполнение условий текучести Мизеса с учетом динамического предела текучести [3]:

$$\sigma_T^d = \sigma_T^{ct}\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D}\right)^{\frac{1}{n}}\right], \qquad (5)$$

где $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость интенсивности деформаций,

σ_T^{ct} – статический предел текучести,

D, n – параметры динамического упрочнения материалов, определяемые экспериментально.

При значениях интенсивностей напряжений $\sigma_i < \sigma_T^d$ скоростная деформация происходит в упругой области, при $\sigma_i \ge \sigma_T^d$ – в пластической области, где используются зависимости

$$\sigma_i = 3G\varepsilon_i\left[1-\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)\right], \qquad (6)$$

где G – модуль упругости при сдвиге,

ε_i – интенсивность деформаций,

$\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ – функция упрочнения [3]:

$$\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) = \lambda\left\{1-\frac{\varepsilon_T^{ct}}{\varepsilon_i}\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D}\right)^{\frac{1}{n}}\right]\right\}, \qquad (7)$$

где ε_T^{ct} – деформация, соответствующая статическому пределу текучести,

$\lambda = 1 - E_1/E$,

E – модуль упругости,

E_1 – модуль упрочнения [3].

При расчете деформирования оболочки в пластической стадии проводится проверка разрушения материала. При этом может использоваться энергетический критерий или критерий Г.С. Писаренко–А.А. Лебедева [5]:

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 \le \sigma_c^+, \qquad (8)$$

где σ_1 – максимальное нормальное напряжение

$\chi = \sigma_b^+ / \sigma_b^-$;

σ_b^+, σ_b^- – пределы сопротивления при растяжении и сжатии.

Расчеты показывают, что при локальном импульсном воздействии смещения оболочки, соизмеримые с ее толщиной, происходят в ограниченной области и резко падают за ее пределами. Если не учитывается физическая нелинейность, описываемая выражениями (5) – (7), область больших смещений расширяется в 1,5 раза, а сами смещения и деформации оказываются заниженными.

Характер изменения интенсивностей деформаций в зависимости от расстояния до центра области нагружения для различных моментов времени показан на рис. 1, а в зависимости от времени – на рис. 2. Импульсная нагрузка приложена на круговой площадке радиусом r_0 (r_0/h=7). Результаты расчетов нашли экспериментальное подтверждение [3]. Исследования показали, что при воздействии на тонкостенные элементы конструкций локальных импульсных нагрузок необходимо использование теории оболочек типа Тимошенко не только для учета волновых процессов, но и в связи тем, что основные деформации происходят в весьма ограниченной области. В этой области деформированная срединная поверхность оболочки имеет большие локальные кривизны. Вне этой области деформации быстро уменьшаются, и исследование их не имеет особого смысла. В то же время в области развития больших деформаций, где учитываются зависимости (4) – (7), необходимо использовать, по крайней мере, теории оболочек типа Тимошенко и подробные сеточные схемы даже при малых соотношениях h/R (≈0,02). В ограниченных зонах, где согласно критериям прочности, например (8), происходит разрушение материала, могут использоваться трехмерные модели. На границах этих зон напряженно-деформированное состояние соответствует результатам расчетов на основе теории оболочек типа Тимошенко.

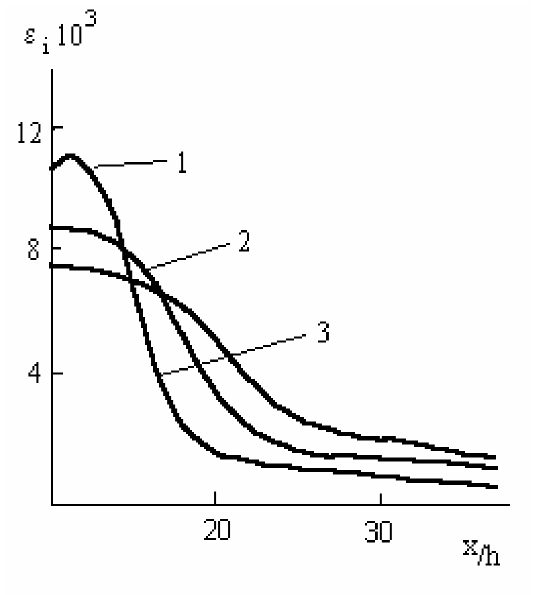

Рис. 1. Изменение интенсивности деформаций вдоль образующей оболочки для моментов времени:

100 мкс – (кривая 1),
300 мкс – (кривая 2),
500 мкс – (кривая 3).

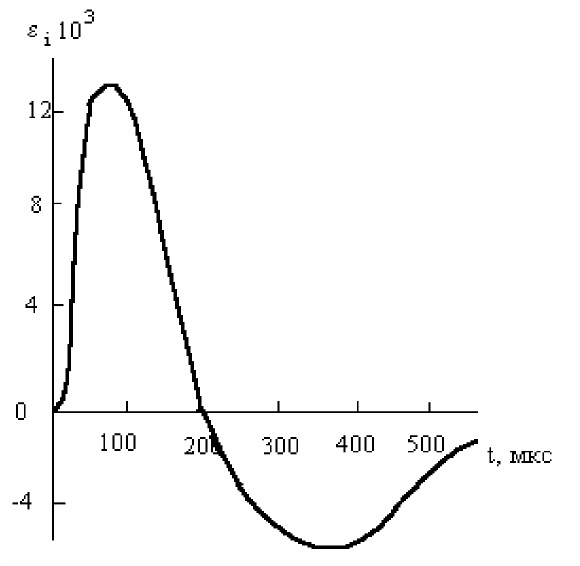

Рис. 2. Изменение интенсивности деформаций во времени в зоне x/h≈15.

Для ортотропной оболочки по сравнению с изотропной максимальные перемещения w уменьшаются, а интенсивности напряжений σ_i растут. Этот эффект наиболее проявляется при $E_y = 2E$, $E_x = E$ [7].

Таким образом, использование уравнений оболочки типа Тимошенко и динамических характеристик материала позволяет провести анализ прочности тонкостенных элементов корпусов ГТД при воздействии импульсных нагрузок.

Литература

1. Роль импульсных нагрузок для ГТД / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, М.В. Чернобрывко, Л. Крушка // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.- Харків: ХАІ, 2002.- Вип. №34. Двигуни та енергоустановки.- С. 136-140.

2. Storace A.F., Nimmer R.P., Ravenhall R. Analytical and Experimental Investigation of Bird Impact on Fan and Compressor Blading // Journal of Aircraft.-1984.- Vol. 21, № 7.- P. 520 - 527.

3. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин.- К.: Наук. думка, 1989.- 192 с.

4. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении.- К.: Наук. думка, 1991.- 288 с.

5. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало, Г.В. Степанов, В.В. Кривенюк.– К.: Логос, 2000.– 571 с.

6. Солоненко В.Р. Поведение цилиндрических оболочек и панелей при локальном динамическом воздействии // Прикл. механика.- 1977.- Т. 13, № 1.- С. 76 - 80.

7. Воробьев Ю.С., Детистов С.И. Влияние ортотропии на прочность цилиндрической оболочки при локальном динамическом воздействии // Проблемы машиностроения.- 1980.- Вып. 10.- С. 11-17.

8. Воробьев Ю.С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин.- К.: Наук. думка, 1988.- 224 с.

9. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем.- М.: Машиностроение, 1970.- 736 с.

Поступила в редакцию 30.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.А. Лавинский НТУ «ХПИ», г. Харьков; канд. техн. наук М.Б. Милешкин, ИП Маш НАНУ, г. Харьков.