

УДК 539.3

Ю.С. ВОРОБЬЕВ¹, М.В. ЧЕРНОБРЫВКО¹, Л. КРУШКА²¹ *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина*² *Военная техническая академия, Польша*

ЛОКАЛЬНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОБОЛОЧЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматривается поведение тонкостенных элементов ГТД под действием локальных импульсных нагрузок. Для моделирования используется теория С.П. Тимошенко для цилиндрических, конических и сферических оболочек. В зоне воздействия локальной нагрузки используется модель трехмерного тела, скоростная деформация которого может происходить как в упругой, так и в упругопластической стадии. Учитываются динамические характеристики материала. Рассмотрен конкретный пример расчета методом конечных разностей.

импульсные нагрузки, локальные нагрузки, оболочки вращения, трехмерные тела, скоростное деформирование, упругопластическое состояние

Введение

Проблема учета импульсных нагрузок при оценке динамической прочности элементов современных газотурбинных двигателей становится все более актуальной. Уже отмечалось опасное воздействие птиц, твердых и жидких частиц на вентиляторные и компрессорные лопатки авиационных газотурбинных двигателей [1 – 3]. Кроме того, входные устройства, корпуса и выходные устройства ГТД часто подвергаются воздействию ударных локальных нагрузок. Причиной их могут быть как влетевшие частицы, так и фрагменты разрушения лопаточного аппарата и ротора [3]. Хотя элементы корпусов, как правило, являются тонкостенными, их следует моделировать с помощью теории оболочек типа Тимошенко [4] для возможности описания волновых процессов. Известно, что при воздействии локальных импульсных нагрузок максимальные напряжения и деформации развиваются в довольно ограниченной зоне [2, 4], где может происходить скоростное упруго-пластическое деформирование и даже разрушение материала. Поэтому в этой области целесообразно использование трехмерных моделей. В связи с тем, что задача становится существенно не-

линейной, она может решаться конечно-разностным методом с учетом изменения динамических свойств материала при каждом шаге как по пространственным координатам, так и по времени [4].

1. Постановка задачи и математическое моделирование

Рассматривается составная конструкция, включающая сопряжение конической, цилиндрической и сферической оболочек вращения (рис. 1). Вектор перемещений для конических и цилиндрических оболочек обозначается $U_c = U(u, w, \beta)$ в системе координат x, r, φ , а для сферических $U_s = U(u, w, \beta)$ в системе координат r, φ, ψ . Толщина оболочки в общем случае является переменной $h(x)$. Хотя конструкция обладает осевой симметрией, задача не является осесимметричной из-за особенностей нагрузки. Нагрузка приложена в ограниченной зоне $x_p, \varphi_p R_c$ под углом $\gamma(\gamma_1, \gamma_2)$ к радиусу (рис. 1). Этот угол определяется кинематикой движения ударника. Зона развития интенсивных напряжений является ограниченной. Напряжения быстро затухают на расстояниях примерно в пять раз превышающих размеры зоны приложения локальной на-

грузки [2, 4]. Из этих соображений выбираются размеры зоны в плане для области, которая модулируется трехмерным телом $x_1, \varphi_1 R_c$.

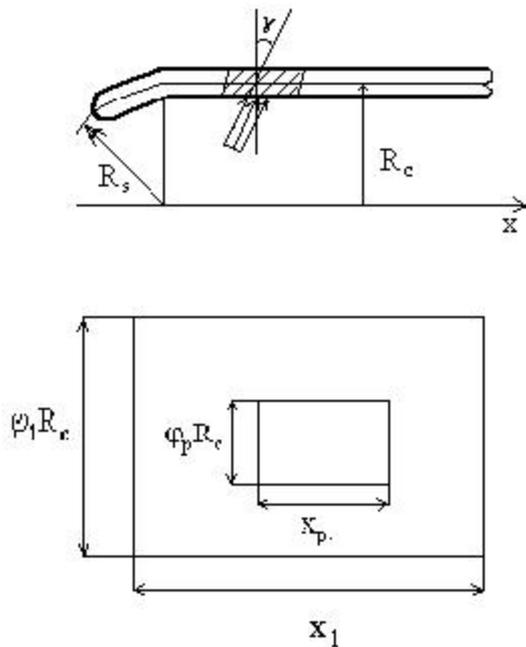


Рис. 1. Схема задачи

Для этой области уравнение движения имеют вид

$$(\lambda + \mu)grad\Theta + \mu\Delta U = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где λ, μ – постоянные Ламе, ρ – плотность материала, $U(u, v, w)$ – вектор перемещений, Θ – относительное объемное расширение

$$\Theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (2)$$

Решение задачи начинается для зоны, описываемой трехмерной моделью. На границе зоны выполняются интегрально условия равенства сил и моментов.

В первом приближении может решаться задача об упруго-пластическом скоростном деформировании трехмерной области, упруго закрепленной по границе, а затем рассматриваться задача о деформировании оболочечной конструкции под действием сил на границе рассматриваемой области, как пра-

вило, в упругой стадии.

При решении задачи для трехмерной области используется зависимость [4 – 7]:

$$\sigma_i = (\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i), \quad (3)$$

где $\sigma_i, \varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i$ – соответственно интенсивности напряжений, деформаций и скорости деформаций.

В задачах, связанных с исследованиями напряженно-деформированного состояния конструкции при повышенных или пониженных режимах эксплуатации, зависимость (3) должна включать и температуру

$$\sigma_i = (\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T), \quad (4)$$

где T – температура конструкционного элемента в предположении адиабатичности протекающего процесса.

На основании работ [4, 5, 8] эти зависимости могут быть приняты в виде:

$$\sigma_i = \sigma_T^{\dot{\sigma}}(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) \left(1 - \frac{T - T_k}{T_p - T_k} \right), \quad (5)$$

где T_k – температура, при которой проводилось определение характеристик материала, T_p – температура плавления, $\sigma_T^{\dot{\sigma}}$ – динамический предел текучести, который может быть выбран в виде:

$$\sigma_T^{\dot{\sigma}} = \sigma_T^{CT} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right], \quad (6)$$

где D, n – характеристики динамического упрочнения материала [4].

Проводится постоянный контроль величины интенсивности напряжений. Когда он превышает динамический предел текучести $\sigma_i > \sigma_T^{\dot{\sigma}}$ [4, 7], то задача скоростного деформирования решается в упруго-пластической стадии.

2. Результаты численного анализа

В качестве примера рассматривалось деформирование цилиндрической конструкции из алюми-

ниевое сплава (АМг2М). Параметры материала принимались следующими:

$$E = 0,71 \cdot 10^{11} \text{ Па};$$

$$E_1 = 7,24 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$\sigma_m^{cm} = 0,96 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$\sigma_g^{cm} = 2,06 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$D = 5,62 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 3,75.$$

В данном случае нагрузка представлялась в виде:

$$Q = q(x, \varphi) e^{-\varepsilon(t-t_0)}, \quad (7)$$

где $q(x, \varphi)$ – распределение максимальной нагрузки по зоне нагружения. При увеличении зоны нагружения интегральная нагрузка не меняется.

Задача является существенно нелинейной. При решении ее конечно-разностным методом линеаризация осуществляется пошагово, но на каждом шаге учитывается изменение свойств материала и соответствующее изменение параметров скоростной упругопластической деформации. В результате нелинейный процесс аппроксимируется кусочно-линейно как по пространственной координате, так и по времени. Точность аппроксимации зависит от густоты сетки.

На рис. 2 и 3 приводятся результаты расчетов для перерезывающих напряжений τ_{xy} в середине трехмерной области и растягивающие напряжения σ_x на ее внутренней поверхности, развивающиеся во временном промежутке от 0 до 110 мкс.

Характерно преобладание перерезывающих напряжений в 1,5 – 2 раза над растягивающими в начальный момент времени. В процессе деформации это преобладание значительно уменьшается. Видна тенденция уменьшения величины касательных напряжений, как во времени, так и по мере удаления от зоны нагружения.

На этом фоне возникает преобладание амплитуды растягивающих напряжений.

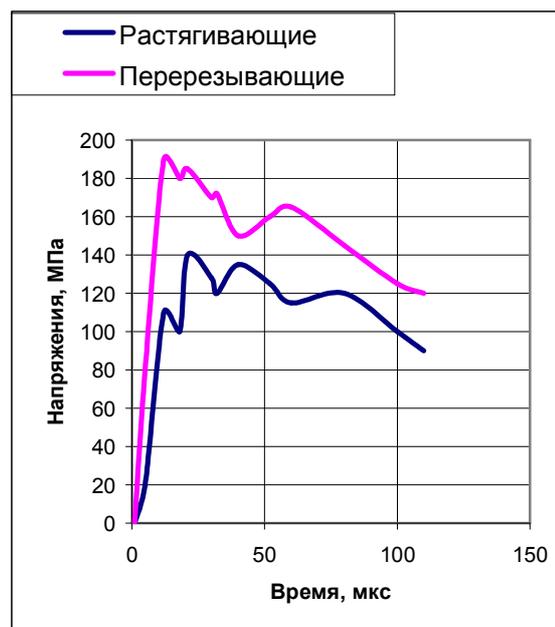


Рис. 2. Напряжения, соответствующие размерам зоны нагружения $0,3 \cdot x_1$.

В данном случае максимальная интенсивность напряжений превосходила динамический предел текучести, но не достигала предела прочности (рис. 2).



Рис. 3. Напряжения, соответствующие размерам зоны нагружения $0,8 \cdot x_1$.

Анализ общей картины напряженно-деформированного состояния позволяет сделать

вывод об уровне динамической напряженности конструкционного элемента в результате локального импульсного воздействия. Анализ интенсивности напряжений и деформаций дает возможность прогнозирования повреждения, трещины или разрушения. Возможное разрушение оценивается на основе одного из критериев прочности [5].

Заключение

Представленная методика определения напряженно-деформированного состояния конструкционного элемента в результате воздействия локальной импульсной нагрузки учитывает динамическое упрочнение материала в процессе скоростного деформирования, влияние температуры и развитие пластических деформаций. Сопоставление максимальных интенсивностей напряжений с динамическим пределом текучести дает возможность прогнозирования повреждений или разрушения. Решение задачи осуществляется методом расчленения на части, в котором процесс скоростного деформирования происходит в различных стадиях. Использование моделей различного уровня позволяет обеспечить эффективное решение задачи.

Литература

1. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Роль импульсных нагрузок для ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т „ХАИ”. – 2002. – Вип. №34. – С. 136 – 140.
2. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Воздействие импульсных нагрузок на оболочечные элементы ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т „ХАИ”. – 2003. – Вип. № 40/5. – С. 64 – 67.
3. Гладкий И.Л. Исследование последствий обрыва лопаток авиационных двигателей методом конечных элементов. // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2004. – №5 (37). – С. 38 – 41.
4. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Янютин Е.Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
5. Трошенко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А., Степанов Г.В., Кривенюк В.В. Механика поведения материалов при различных видах нагружения. – К., 2000. – 566 с.
6. Vorobiev Yu. S., Chernobryvko M.V. Nonlinear high-strain-rate elastic-plastic deformation of structural elements under impulsive loading // *The Int. Conf. on Nonlinear Dynamics*. – Kharkov, September 14-16, 2004. – P. 164 – 167.
7. Воробьев Ю., Крушка Л., Чернобрышко М. Поведение цилиндрических конструкций при воздействии подвижных импульсных нагрузок // *The 13th International scientific and technological conference «Maintenance of infrastructure in crisis situations»*. – Warsaw - Rynia (Poland), October 18-20, 2004. – P. 163 – 171.
8. Meyers M.A. *Dynamics behavior of materials*. – New York: Wiley, 1994. – 283 p.

Поступила в редакцию 25.04.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Н. Шупиков, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.