

УДК 539.3

Ю.С. ВОРОБЬЕВ, М.В. ЧЕРНОБРЫВКО*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины***ДИНАМИКА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Изложена методика определения напряженно-деформированного состояния локальной зоны лопатки компрессора в результате воздействия импульсной нагрузки с учетом динамического упрочнения материала в процессе скоростного деформирования, влияния температуры и развития пластических деформаций. Сопоставление максимальных интенсивностей напряжений с динамическим пределом текучести дает возможность прогнозирования повреждений или разрушения. Решение задачи осуществляется в несколько этапов, в которых процесс скоростного деформирования происходит в различных стадиях.

импульсная нагрузка, лопатка компрессора, скоростное деформирование, динамическое упрочнение материала

Введение

В предыдущих работах [1 – 3] проведены исследования воздействия на вентиляторную лопатку и элементы корпуса ГТД локального удара материальным телом. Показано, что основную роль играет скоростное упругопластическое деформирование в ограниченной зоне. За пределами этой зоны напряжения и деформации резко уменьшаются. Эти результаты подтверждаются экспериментальными данными, полученными при анализе воздействия локальной ударной нагрузки на элементы конструкций [4 – 6].

Численные исследования показывают, что динамические напряжения при локальном ударе даже телом малой массы могут превышать динамический предел текучести материала, а иногда и динамический предел прочности. В результате образуются повреждения, которые могут быть опасны при дальнейшей эксплуатации лопаток ГТД. Из вышесказанного можно сделать вывод, что целесообразно более детальное исследование динамического напряженно-деформированного состояния в ограниченной зоне лопатки с учетом динамических свойств материала в трехмерной постановке [7].

1. Постановка задачи

Рассматривается фрагмент лопатки, представляющий собой трехмерную зону, размеры которой от пяти до десяти раз превышают размеры тела, совершающего локальный контактный удар по поверхности лопатки со скоростью V (рис. 1).

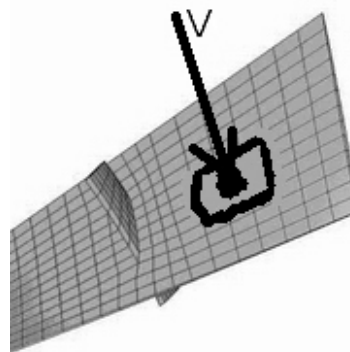


Рис. 1. Фрагмент лопатки.

В упругой области динамическое напряженно-деформированное состояние рассматривается как и в предыдущих работах [8]. Задача решается согласно деформационной теории пластичности после того, как интенсивности напряжений достигают динамического предела текучести, выбранного согласно известным эмпирическим зависимостям для исследуемого материала лопаточного аппарата компрессора [9]:

$$\sigma_i = \sigma_s \left\{ \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] + \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_s} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^m, \quad (1)$$

где σ_s – статический предел текучести, ε_s – деформация предела текучести; D , n , m – параметры динамических свойств материала, определяемые экспериментально.

2. Математическое моделирование

Исследуемую область будем моделировать трехмерным телом в декартовой системе координат x, y, z . Уравнения движения имеют вид [10]:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \mu \Delta u &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \mu \Delta v &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \mu \Delta w &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где u, v, w – компоненты перемещений, λ, μ – параметры Ламе, ρ – плотность материала, α – коэффициент теплового расширения, $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – модуль объемного сжатия, ε – относительное объемное расширение:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div} U. \quad (3)$$

Нагрузка, приложенная в ограниченной области:

$$P(x, y, t) = P(x, y) e^{-\delta t}, \quad (4)$$

где δ – коэффициент затухания ударной нагрузки.

Уравнения движения дополняем зависимостями деформационной теории пластичности [10], учитывая тот факт, что в области больших пластических деформаций используется эмпирическая зависимость (1):

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma &= \frac{1}{\Psi} \left(\varepsilon_x - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_y - \sigma &= \frac{1}{\Psi} \left(\varepsilon_y - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \end{aligned}$$

$$\sigma_z - \sigma = \frac{1}{\Psi} \left(\varepsilon_z - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2\Psi} \gamma_{xy};$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{2\Psi} \gamma_{xz};$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{2\Psi} \gamma_{yz};$$

$$\varepsilon = 3K\sigma + 3\alpha T,$$

где множитель $\Psi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}$.

Предложенная математическая модель позволяет учитывать большие пластические деформации в локальной зоне удара, а также определять связь между максимальными интенсивностями напряжений и ударно-импульсной нагрузкой.

3. Результаты численного анализа

Исследовалось напряженно-деформированное состояние локальной трехмерной области лопатки компрессора из титанового сплава с параметрами материала:

$$E = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \quad E_1 = 10,07 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$\sigma_s = 4,9 \cdot 10^8 \text{ Па}; \quad \sigma_s = 6,9 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$D = 4,45 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}; \quad n = 4,84, \quad m = 1.$$

Воздействие частицы на лопатку рассматривалось при скорости соударения 150 м/с (рис. 2, кривая 1) и 200 м/с (рис. 2, кривая 2), максимальная амплитуда нагрузки 48 МПа и 63 МПа соответственно, коэффициентом затухания импульса 10^6 с^{-1} . Длительность импульса соответствовала величине 10^{-5} с^{-1} .

Очевидно, что в такой постановке задача является существенно нелинейной. Ее решение проводилось с использованием адаптированных конечных разностей, что позволило на каждом шаге учитывать изменение свойств материала и соответствующее изменение параметров скоростной упругопластической деформации.

На рис. 2 приводятся результаты расчетов для максимальных интенсивностей напряжений в зоне

удара. Очевиден рост исследуемой величины в зависимости от скорости соударения с частицей. Анализ результатов позволяет прогнозировать повреждение, трещины или разрушения. Возможное разрушение оценивается на основе одного из критериев прочности [10].

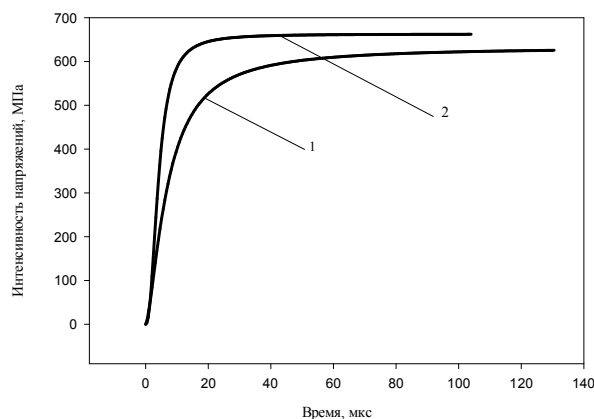


Рис. 2. Максимальные напряжения в зоне удара

Заключение

Представленная методика определения напряженно-деформированного состояния позволяет сделать вывод об уровне динамической напряженности в зоне удара и разработать практические рекомендации.

Литература

1. Роль импульсных нагрузок для ГТД / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук.праць.* — Х.: НАКУ "ХАІ", 2002. — Вип. № 34. Двигуни та енергоустановки. — С. 136-140.
2. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Воздействие импульсных нагрузок на оболочечные элементы ГТД // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* — Х.: НАКУ "ХАІ", 2003. — № 40/5. — С. 64-67.
3. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Локальное импульсное воздействие на оболочечные элементы конструкций. // *Авиационно-*

космическая техника и технология: Научн.-техн. журн. — 2005. — № 9/25. — С. 181-184.

4. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Особенности численного анализа скоростного деформирования элементов конструкций под действием локальных импульсных нагрузок // IX KNT «Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania», Warsaw, Poland, 2005. — P. 545-551.
5. Экспериментально-теоретическое исследование деформирования цилиндрической оболочки при локальном ударе / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, А.В. Ярыжко, Д.И. Степанченко // *Физические и компьютерные технологии. Тр. 12-й МНТК.* — Х., 2006. — С.137-139.
6. Ярыжко А.В., Чернобрышко М.В., Воробьев Ю.С. Воздействие локальной ударной нагрузки на цилиндрическую оболочку // *Автомобильный транспорт.* — 2005. — Вып. 17. — С. 89-91.
7. Чернобрышко М.В. О применимости упрощенных математических моделей для расчетов конструкций при импульсном деформировании // *Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Тр. 11-й Межд. научн.-техн. конф. (2-3 июня 2005 г.).* — Х.: ХНПК "ФЭД", 2005. — С. 264-266.
8. Воробьев Ю.С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин. — К.: Наук. думка, 1988. — 224 с.
9. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. — К.: Наук. думка, 1989. — 192 с.
10. Писаренко Г.С., Мохаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. — К.: Наук. думка, 1981. — 496 с.

Поступила в редакцию 30.04.2007.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.