

УДК 539.3

Ю.С. ВОРОБЬЕВ¹, Н.Ю. ОВЧАРОВА²

¹ *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

² *Национальный технический университет “ХПИ”, Украина*

ЛОКАЛЬНОЕ УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ

Анализ динамического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций является достаточно актуальным. Рассматривается поведение цилиндрических элементов газотурбинного двигателя под действием локальной ударной нагрузки. Используются трехмерные модели и метод конечных элементов. Учитываются конечные деформации и динамические свойства материала. Рассматриваются скоростная деформация и напряжения в зоне локального нагружения элемента. Показаны особенности распределения полей перемещений и интенсивностей напряжений при различных скоростях нагружения двухслойных и однослойных элементов конструкций.

Ключевые слова: ударные нагрузки, трехмерные модели, метод конечных элементов, скоростное деформирование, локализация напряжений.

Введение

Элементы входных устройств, корпусов, выходных устройств ГТД могут подвергаться воздействию локальных ударных нагрузок. Причиной их могут быть как влетевшие в газовоздушный тракт частица так и фрагменты разрушения летательного аппарата и ротора [1 – 3]. Хотя элементы корпусов входных и выходных устройств являются тонкостенными, но при воздействии локальных ударных нагрузок в ограниченной зоне развиваются трехмерные упруго-пластические деформации и напряжения. Поэтому в этой зоне целесообразно использование трехмерных моделей, учитывающие конечные деформации и перемещения. При анализе скоростной деформации следует учитывать динамические свойства материалов [4, 5]. Задача становится существенно нелинейной и требует использования специальных модификаций метода конечных элементов.

Элементы конструкций корпусов и входных и выходных устройств современных ГТД могут выполняться с использованием как металлических так и полимерных и композитных материалов.

1. Постановка задачи

Рассматривается цилиндрическая конструкция, включающая слой металла и полимерного материала. Вектор перемещений $\vec{U} = U(u, w, v)$ рассматривается в цилиндрической системе координат x, r, φ . Толщина слоев в обоих случаях является переменной $h(x)$.

Хотя конструкция обладает осевой симметрией, задача не является осесимметричной из-за особенностей локальной нагрузки, которая приложена в ограниченной зоне (рис. 1).

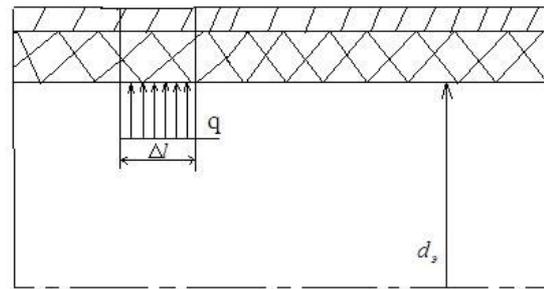


Рис. 1. Зона локального нагружения

Зона развития интенсивных напряжений является весьма ограниченной. Напряжения быстро затухают на расстоянии примерно в пять – десять раз превышающих размеры зоны приложения нагрузки [4].

Для этой области уравнения движения имеют вид

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \varepsilon + \mu \Delta U = \rho \frac{d^2 U}{dt^2}, \quad (1)$$

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

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} + \frac{dw}{dy} + \frac{dv}{dz}. \quad (2)$$

Учитываются известные зависимости для ко-

нечных деформаций [1, 4].

В случае упругой деформации используются зависимости закона Гука (3)

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_x; & \tau_{xy} &= \mu\gamma_{xy}; \\ \sigma_y &= \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_y; & \tau_{xz} &= \mu\gamma_{xz}; \\ \sigma_z &= \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_z; & \tau_{yz} &= \mu\gamma_{yz},\end{aligned}\quad (3)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненты тензора напряжений;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ и $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – компоненты тензора деформаций.

В случае пластической деформации используются зависимости динамической теории пластической деформации.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x - \frac{1}{3}\varepsilon &= \psi S_x; & \gamma_{xy} &= 2\psi\tau_{xy}; \\ \varepsilon_y - \frac{1}{3}\varepsilon &= \psi S_y; & \gamma_{xz} &= 2\psi\tau_{xz}; \\ \varepsilon_z - \frac{1}{3}\varepsilon &= \psi S_z; & \gamma_{yz} &= 2\psi\tau_{yz};\end{aligned}\quad (4)$$

В данных выражениях (4) коэффициент

$$\psi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}$$

содержит зависимость интенсивности напряжений от деформаций и скорости деформаций $\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$

Для учета динамических свойств материала используют физические зависимости типа Пэжины [6, 7].

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

где E – модуль упругости;

m и γ – коэффициенты чувствительности к скорости деформации;

$\dot{\varepsilon}^{pl}$ – скорость деформации в пластической стадии.

Для решения таких задач, необходимо использование конечных элементов, учитывающих динамические характеристики материала. В таких элементах функции форм должны позволять удовлетворить как геометрические, так и силовые граничные условия.

2. Результаты численного анализа

Проводится численный анализ динамического напряженно-деформированного состояния в области нагружения при воздействии на цилиндрический элемент ударника массой 0,1 кг с различными скоростями соударения. Модель материала наружного

слоя сталь 40ХНМА (30ХГСА), модель материала внутреннего слоя полимер.

На рис. 2 представлены поля перемещений в зоне удара для фрагмента цилиндрической конструкции при воздействии ударника со скоростью соударения 20 м/с. Видно что область интенсивных перемещений является ограниченной.

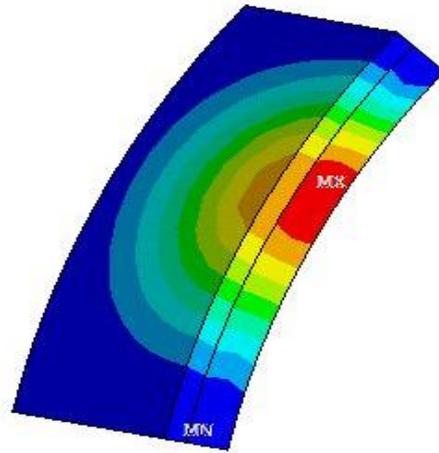


Рис. 2. Поля перемещений при скорости 20 м/с

На рис. 3 показано распределение интенсивностей напряжений (по Мизесу) по толщине конструкции в зоне локализации нагрузки.

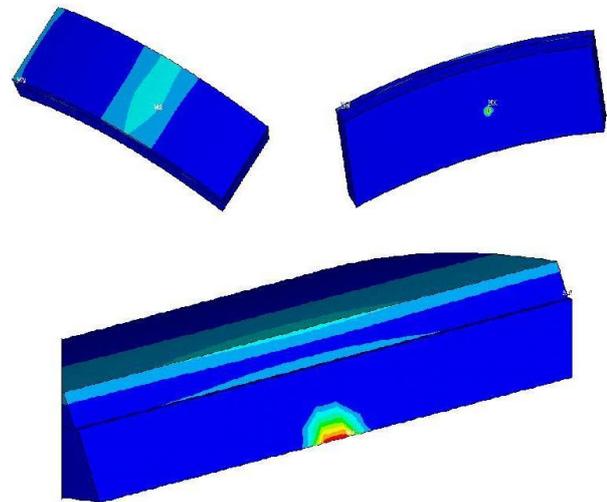


Рис. 3. Поля интенсивностей напряжений при скорости 20 м/с

В связи с тем, что напряжения в разных слоях элемента конструкции существенно различны по величине, то они изображаются на рис. 3 в различных масштабах. Так в левом верхнем углу показано распределение напряжений в металлическом слое. В правом верхнем углу показана локализация напряжений в полимерном слое. Более подробно распределение динамических напряжений в полимерном

слое показано внизу. При этом максимальные интенсивности напряжений не достигают 21 МПа и остаются в упругой области. Хорошо видно, что распределение напряжений не соответствует представлениям о распределении напряжений согласно теории оболочек.

При увеличении скорости соударения до 100 м/с деформации переходят в пластическую стадию для полимера, так как максимальные напряжения достигают 80 МПа рис. 4, 5.

На рис. 4 показана область локализации напряжений в плане.

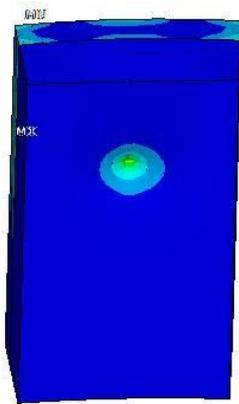


Рис. 4. Поля интенсивностей напряжений при скорости 100 м/с

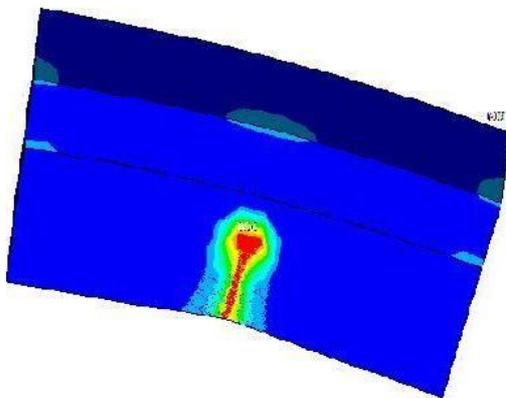


Рис. 5. Поля интенсивностей напряжений при скорости 100 м/с

На рис. 5 показано распределение интенсивности напряжений по толщине элемента.

В случае только металлического слоя характер распределения полей интенсивностей напряжений представлен на рис. 6.

Максимальные напряжения составили 1535 Па. Хотя уровень напряжений в металлическом слое значительно повышается, но деформирование происходит в упругой области. На рис. 7 показаны поля перемещений, максимальные значения перемещений составили $0,364 \cdot 10^{-5}$ м.

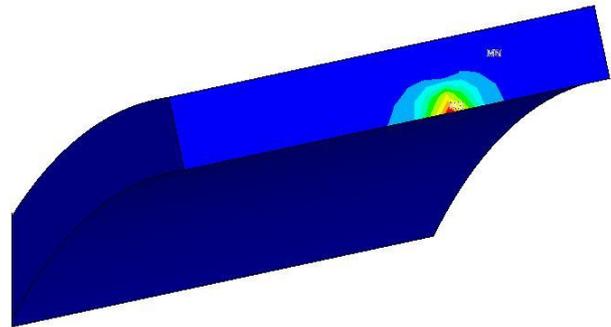


Рис. 6. Поля интенсивностей напряжений при скорости 100 м/с

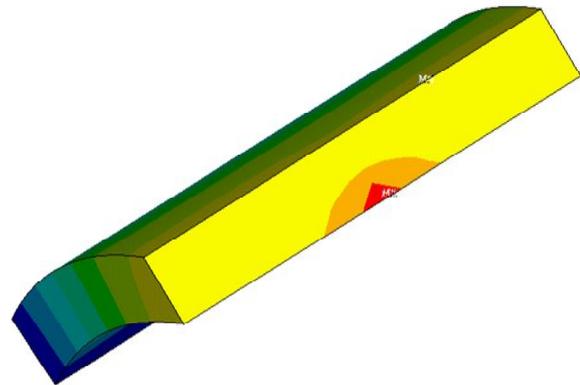


Рис. 7. Поля перемещений при скорости 100 м/с

Заключение

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием локальных ударных нагрузок на основе трехмерных конечно-элементных моделей, в процессе скоростного деформирования, учитывающий геометрическую нелинейность, упругопластическую деформацию и динамические свойства материала. При локальной ударной нагрузке область интенсивности напряжений весьма ограничена. Наличие полимерного слоя существенно снижает уровень деформаций и напряжений в металлическом слое. При скоростях соударения 20 м/с деформации в обоих слоях происходят в упругой области. При повышении скоростей соударения до 100 м/с в полимерном слое происходят пластические деформации. Однако, в металлическом слое деформирование во всех случаях остается в упругой области.

Литература

1. Воробьев, Ю.С. Локальное импульсное воздействие на оболочечные элементы конструкций [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9 (25). – С. 181 – 184.

2. Воробьев, Ю.С. Об особенностях моделирования ударно-импульсного нагружения оболочек и пластин [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко // *Механіка та машинобудування*. – 2006. – № 1. – С. 86 – 92.

3. Проблемы анализа скоростного деформирования элементов конструкций при импульсном нагружении [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, Н.Ю. Евченко и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 11/47. – С. 35 – 43

4. Скоростное деформирование элементов конструкций [Текст] / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодя-

жний, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К.: Наукова думка, 1989. – 148 с.

5. Воробьев, Ю.С. Скоростное деформирование элементов конструкций в упругопластической стадии [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко // *Проблеми обчислюваної механіки і міцності конструкцій*. – 2010. – № 14. – С. 87 – 93.

6. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения [Текст] / В.Т. Троценко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало и др. – К.: Логос, 2000, – 571 с.

7. Meyers, M.A. Dynamics behavior of materials [Text] / M.A. Meyers. – New York: Wiley, 1994. – 283 p.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.С. Гусев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

ЛОКАЛЬНЕ УДАРНИЙ ВПЛИВ НА ЦИЛІНДРИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЙ

Ю.С. Воробйов, Н.Ю. Овчарова

Аналіз динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій є достатньо актуальним. Розглядається поведінка циліндричних елементів газотурбін двигуна під дією локальної ударного навантаження. Використовуються тривимірні моделі і метод скінченних елементів. Враховуються скінченні деформації та динамічні властивості матеріалу. Розглядаються швидкісна деформація і напруження в зоні локального навантаження елемента. Показано особливості розподілення полів переміщень та інтенсивностей напружень при різних швидкостях навантаження двошарових та одношарових елементів конструкцій.

Ключові слова: ударні навантаження, тривимірні моделі, метод скінченних елементів, швидкісне деформування, локальне напруження.

LOCAL IMPACT ACTION ON CYLINDRICAL STRUCTURE ELEMENTS

Yu.S. Vorobiev, N.Yu. Ovcharova

An analysis of the dynamic tense-deformed state of elements of constructions is actual enough. Behavior of cylindrical gas-turbine engine components under the action of a local impact loading are considered. Three-dimensional model and the finite element method are used. The finite deformation and dynamic characteristics of the material take in account. High-rate deformation and stress in zone of the local loading of element are considered. Examined speed deformation and tension in the area of local loading of element. The features of distributing of the fields of moving and stress intensities are at the difference speeds of loading of double-layer and one-layer elements of constructions.

Key words: impact, three-dimensional models, finite element method, high-rate deformation, the local strain.

Воробьев Юрий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, зав. отделом института проблем машиностроения им. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: Vorobiev@ipmash.kharkov.ua.

Овчарова Наталья Юрьевна – аспирант кафедры «Газогидромеханики и теплообмена» Харьковского национального университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: Natka.Ovch@gmail.com.