

## ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК НА СКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСА ГТД

Рассматриваются особенности скоростного деформирования цилиндрических элементов корпуса газотурбинного двигателя при локальных ударных нагрузках. Трехмерные модели учитывают конечные упругопластические деформации и динамические свойства материалов. Метод конечных элементов используется для анализа динамического напряженно-деформированного состояния цилиндрических элементов конструкций. Показаны особенности распределения и локализации полей перемещений и интенсивностей напряжений при различных скоростях нагружения однослойных и двухслойных элементов корпусов газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** корпус ГТД, ударные нагрузки, трехмерные модели, скоростное деформирование, локализация напряжений.

### Введение

При работе газотурбинных двигателей возможны отрывы фрагментов лопаток и ротора под действием статических и вибрационных нагрузок и попавших в газоздушный тракт посторонних предметов. При этом возникают источники локальных ударных нагрузок на корпус двигателя в поле центробежных сил [1, 2]. Опыт эксплуатации газотурбинных двигателей показывает опасность повреждения и даже пробития корпуса ГТД под действием ударных нагрузок.

В местах воздействия локальных ударных нагрузок возникает трехмерное напряженно-деформированное состояние в ограниченной зоне. Вследствие этого необходимо рассматривать процесс скоростного деформирования даже сравнительно тонкостенных осесимметричных элементов корпуса на основе трехмерных моделей [2, 3]. Элементы корпуса могут быть однослойными или иметь накладки из стали или композитных материалов.

В результате возникает задача анализа упругопластического деформирования элементов корпуса с учетом конечных перемещений и деформаций. Результаты данной работы отражают развитие исследований, приведенных в публикациях [1, 2, 3].

### 1. Постановка задачи и модель системы

Осесимметричные элементы конструкции переменной толщины  $h(z)$  рассматриваются в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ , где  $z$  — ось симметрии. Возможно наличие одного или двух слоев. Компоненты вектора перемещений  $u, w, v$  направлены вдоль соответствующих

координат. На элемент конструкции действуют ударники кругового или прямоугольного сечения с различными массами и скоростями.

Для описания процесса скоростного деформирования используется известная система уравнений движения в цилиндрической системе координат [1, 2]. Модель отличается учетом конечных деформаций, которые описываются зависимостями

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right) \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right)^2 \right) \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (1) \\ \gamma_{r\varphi} &= \frac{\partial u}{r \partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \\ &+ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{r \partial \varphi} \frac{\partial u}{\partial r} + \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ \gamma_{z\varphi} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} + \\ &+ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right) + \left( \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{r \partial \varphi} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right) \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

Зависимости между напряжениями и деформациями описываются согласно динамическому варианту теории пластических деформаций:

$$\begin{aligned} \sigma_r - \sigma &= \frac{1}{\Psi} \left( \varepsilon_r - \frac{1}{3} \varepsilon \right) & \tau_{r\varphi} &= \frac{1}{\Psi} \gamma_{r\varphi} \\ \sigma_\varphi - \sigma &= \frac{1}{\Psi} \left( \varepsilon_\varphi - \frac{1}{3} \varepsilon \right) & \tau_{\varphi z} &= \frac{1}{\Psi} \gamma_{\varphi z} \\ \sigma_z - \sigma &= \frac{1}{\Psi} \left( \varepsilon_z - \frac{1}{3} \varepsilon \right) & \tau_{rz} &= \frac{1}{\Psi} \gamma_{rz} \\ \sigma &= \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z) \\ \varepsilon &= \varepsilon_r + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_z \end{aligned} \quad (2)$$

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

Динамическое упрочнение материалов отражает зависимости интенсивностей напряжений от интенсивностей деформаций и скоростей деформаций  $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$  [2]. В данном случае используются зависимости типа Пэжины.

$$\sigma_i = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] E \varepsilon_i \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости;

$m$  и  $r$  – коэффициенты чувствительности к скорости деформации;

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

Для численного анализа процесса скоростного деформирования строится конечно-элементная модель, которая отражает свойства физической модели. Используются трехмерные 20-узловые гексагональные элементы в цилиндрической системе координат. Каждый узел имеет 6 степеней свободы. Функции форм таких изопараметрических элементов позволяют описать непрерывное изменение напряжений и деформаций.

## 2. Результаты численного анализа

Некоторые элементы газотурбинных двигателей изготовлены из композитных материалов. Рассмотрен элемент с внутренним диаметром 800 мм, толщиной 30 мм, плотностью материала  $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ , модулем упругости  $E = 2660 \text{ МПа}$ , коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,45$ . Для такого элемента при воздействии ударника массой 0,1 кг со скоростью 400 м/с максимальные перемещения составили  $0,167 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , а максимальная интенсивность напряжений 54 МПа, что соответствует упругим деформациям. При локальных ударных нагрузках наибольшие перемещения и напряжения развиваются в ограниченных зонах и быстро убывают по пространственным координатам и во времени.

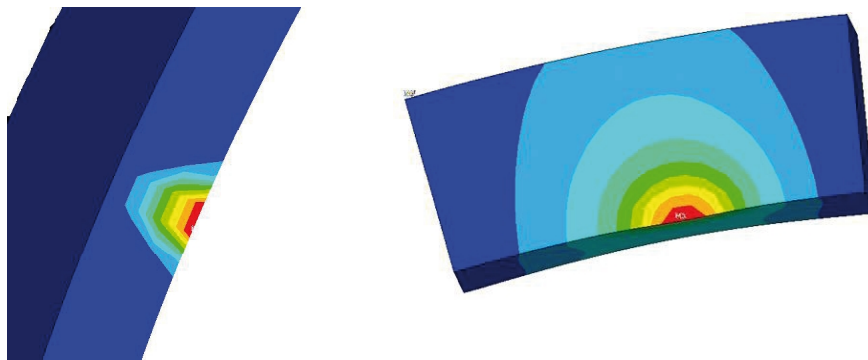


Рис. 1. Поля интенсивностей напряжений в поперечном сечении цилиндрического элемента при скорости соударения 400 м/с при использовании обычной (слева) и более густой сетки (справа)

Эти особенности динамического напряженно-деформированного состояния позволяют выделить соответствующую область элемента и провести для нее уточненные расчеты с использованием более густой

сетки. Результаты таких расчетов представлены на рис. 1. При скоростях ударника 1000 м/с и более возникают пластические деформации, а после разгрузки наблюдаются остаточные деформации (рис.2).

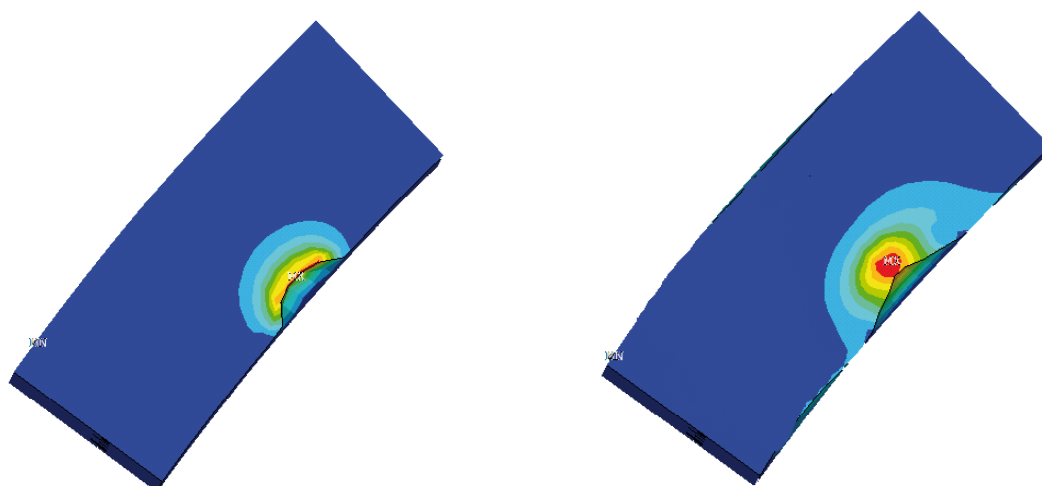


Рис. 2. Распределение максимальных перемещений и интенсивностей напряжений (слева) и остаточных после разгрузки (справа) в композитном материале при скоростях 1000 м/с

В наиболее ответственных местах корпуса используются накладки. Рассматривается воздействие фрагмента компрессорной лопатки на двухслойный элемент корпуса с толщинами  $h_1=1,4$  мм и  $h_2=2$  мм и внутренним диаметром 415 см. Материал корпуса сталь – 10ХСНД. При радиусе отрыва 330 мм фрагмента из титанового

сплава ВТЗ-1 скорость соударения составляет 350 м/с. Максимальное значение интенсивностей напряжений (150 МПа) не достигает предела упругости. При скоростях соударения 1000 м/с наблюдаются значительные пластические деформации (рис. 3). При увеличении скоростей ударника происходит пробитие элемента корпуса.

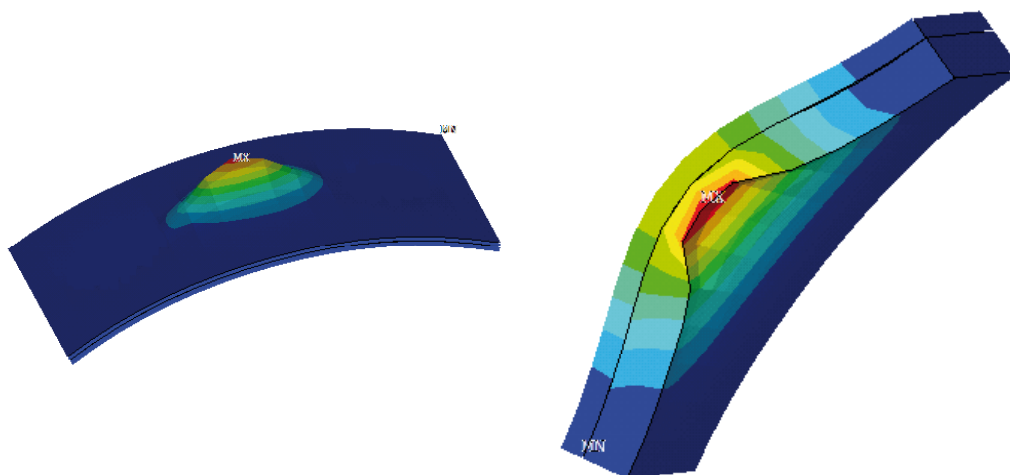


Рис. 3. Поля интенсивностей перемещений и напряжений при скорости соударения 1000 м/с при использовании обычной (слева) и более густой сетки (справа)

### Выводы

Под действием локальных ударных нагрузок в ограниченной области развивается трехмерное напряженно-деформированное состояние.

Максимальные напряжения и деформации резко убывают в пространстве и времени. Вследствие этого даже для сравнительно тонкостенных элементов задачу следует рассма-

тривать в трехмерной постановке. В зоне удара может быть использована более густая сетка.

При скоростях соударения 300 – 400 м/с скоростное деформирование элементов корпуса происходит в упругой стадии. Максимальные напряжения достигаются в течение  $2-4 \cdot 10^{10}$  сек после контакта с ударником.

При увеличении скорости соударения до 1000 м/с процесс деформирования происходит

в упругопластической стадии и при разгрузке возникают остаточные деформации. Использование двухслойных элементов конструкций приводит к существенному снижению перемещений и интенсивностей деформаций.

Авторы доклада выражают признательность Государственному фонду фундаментальных исследований Украины за финансовую поддержку работ.

#### Литература

1. Воробьев Ю.С. Локальное ударное воздействие на цилиндрические элементы конструкций [Текст]/ Ю.С. Воробьев, Н.Ю.Овчарова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. - №11/47. – С.35–43.
2. 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 .

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. Трощенко В.Т. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения [Текст]/ В.Т. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало и др. – К.: Логос, 2000. – 571 с.
5. Meyers M.A. Dynamics behavior of materials [text]/ M.A. Meyers. - New York: Wiley, 1994. – 283 p.

Поступила в редакцию 01.06.2013

#### **Н.Ю. Овчарова, Ю.С. Воробийов. Вплив ударних навантажень на швидкісне деформування елементів корпусу ГТД**

*Розглядаються особливості швидкісного деформування циліндричних елементів корпусу газотурбінного двигуна при локальних ударних навантаженнях. Тривимірні моделі враховують скінченні пружно-пластичні деформації та динамічні властивості матеріалів. Метод скінченних елементів використовується для аналізу динамічного напружено-деформованого стану циліндричних елементів конструкцій. Показані особливості розподілу та локалізації полів переміщень і інтенсивностей напружень при різних швидкостях навантажень одношарових і двошарових елементів корпусів газотурбінних двигунів.*

**Ключові слова:** корпус ГТД, ударні навантаження, тривимірні моделі, швидкісне деформування, локалізація напружень.

#### **N.Yu. Ovcharova, Iu.S. Vorobiov. Influence of high-rate deformation on the gas turbine case under impact loading**

*Peculiar of high-rate deformation of the cylindrical gas turbine case elements are considered. Three-dimensional models take into account finite elastic-plastic deformation and dynamic properties of materials. Finite element method is used for analysis the dynamic stress-strain state of cylindrical structural elements. Peculiarities of distributions and localization of movement and stresses intensities fields at difference speeds of loading one-layer and two-layer constructions element are showed.*

**Keywords:** gas turbine case, impact loading, three-dimensional models, the high-rate deformation, stress localization.