

УДК 539.3:621

**Ю.С. ВОРОБЬЕВ<sup>1</sup>, Л.Г. РОМАНЕНКО<sup>2</sup>, В.Н. РОМАНЕНКО<sup>2</sup>, В.А. ПОТАНИН<sup>3</sup>,  
В.А. КАСЬЯНОВ<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*<sup>2</sup>*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина*<sup>3</sup>*ОАО «Специальное конструкторское бюро турбоагрегатов», Пенза, Россия*

## РАСЧЕТ НДС ВРАЩАЮЩЕГОСЯ НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ТУРБОКОМПРЕССОРА

Рассматривается НДС вращающегося направляющего аппарата турбокомпрессора. Исследование проведено на основе трехмерной конечноэлементной модели. Особенностью расчета является учет пластических деформаций, возникающих вследствие нагружения объекта центробежными силами инерции. Целью исследования явилось снижение уровня напряжений путем изменения геометрических размеров конструкции.

**напряженно-деформированное состояние, локализация напряжений, детали турбокомпрессора, трехмерные модели, конечные элементы**

### Введение

Создание современных турбомашин идет по пути повышения удельных мощностей за счет увеличения скоростей вращения, температур и давлений. Такая тенденция ведет к понижению прочностных свойств материалов, увеличению воздействия целого спектра нагрузок на наиболее напряженные элементы турбин и компрессоров.

Эти обстоятельства привели к созданию новых типов конструкций. При проектировании и усовершенствовании машин необходимо проведение многовариантных расчетов, подтверждающих целесообразность изменения геометрии проекта. Быстрое развитие мощной вычислительной техники и наличие на рынке большого количества пакетов программ для расчета конструкций позволяют быстро проводить прочностной и вибрационный анализ проектируемых конструкций. Однако, как правило, такие пакеты программ являются универсальными и не нацелены на получение решения для конкретного класса конструкций. Построение геометрической и конечноэлементной моделей таких объектов

является весьма трудоемким.

Сложная конструктивная форма и особенности технологической обработки деталей компрессоров являются причиной возникновения зон повышенных напряжений при их эксплуатации. В процессе работы конструкция компрессора испытывает воздействие высоких температур и центробежных сил. Это приводит к появлению в конструкции зон повышенных напряжений и их концентрации, что в свою очередь со временем влечет разрушение конструкции. Для анализа этих явлений целесообразно использовать трехмерные модели, позволяющие проследить за изменениями напряжений в весьма ограниченных зонах. Одним из средств такого анализа является МКЭ.

**Постановка задачи.** Данная работа посвящена анализу изменения полей напряжений в компрессорах при работе его в области высоких температур и центробежных сил.

Вариационное уравнение решения статической задачи упругости в перемещениях имеет вид [1]:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dv - \int_V p_i \delta u_i dv - \int_S f_i \delta u_i ds = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и деформаций;  $u_i$  – компоненты вектора перемещений;  $p_i, f_i$  – компоненты объемных и поверхностных сил;  $v$  – объем;  $s$  – поверхность объекта. В качестве тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$  выбран тензор малых деформаций Коши.

Связь между тензором напряжений и тензором деформаций задается законом Гука

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

где  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ляме;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

В результате уравнение (1) с учетом зависимостей (2) и (3) приводится к системе уравнений относительно перемещений

$$Ku = F, \quad (3)$$

где  $K$  – глобальная матрица жесткости;  $F$  – вектор нагрузки.

Изопараметрическая концепция МКЭ предполагает, что искомая функция  $u_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  и геометрия элемента  $x_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  описываются с помощью одинаковых функций формы в криволинейной системе координат  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  [2]:

$$\begin{aligned} u_i &= \sum_m u_i^m N^m(\xi_1, \xi_2, \xi_3); \\ x_i &= \sum_m x_i^m N^m(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N^m(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  – функции формы;  $u_i^m, x_i^m$  – перемещение и координаты  $m$ -го узла в  $i$ -м направлении.

После конечноэлементной аппроксимации интегрирование по объему рассматриваемой конструкции сводится к интегрированию по объемам конечных элементов.

Эффективность методики решения задачи зависит от выбора рациональных способов формирования матриц и решения системы (4). Элементы мат-

рицы жесткости рационально вычислять с помощью специального способа, согласно которому выражение для их определения принимает вид [4]:

$$K_{ij}^{mn} = \int_v \left[ \lambda \frac{\partial N^m}{\partial x_i} \frac{\partial N^n}{\partial x_j} + \mu \left( \frac{\partial N^m}{\partial x_k} \frac{\partial N^n}{\partial x_k} \delta_{ij} + \frac{\partial N^m}{\partial x_j} \frac{\partial N^n}{\partial x_i} \right) \right] dv, \quad (i, j, k = 1, 2, 3; m, n = 1, 2, \dots, s), \quad (5)$$

После вычисления  $u_i^m$  поля напряжений находятся с помощью зависимостей (2), (4).

## Результаты численного анализа

Особенностью конструкции является сложность ее геометрии и необходимость расчета конструкции как единого целого, так как период повторения выемок на ободе не совпадает с периодом циклической симметрии расположения лопастей.

Конечноэлементная модель конструкции построена с использованием квадратичных тетраэдральных конечных элементов, которые сочетают высокую точность определения напряжений с возможностью автоматической генерации сеток в областях сложной формы.

На основании трехмерной модели был проведен численный анализ влияния изменения некоторых геометрических размеров конструкции компрессора для уменьшения уровня статических напряжений, вызванных центробежными силами и температурными полями.

Эти зоны могут представлять опасность с точки зрения появления пластических деформаций. На рис. 1 представлена конечно-элементная модель исследуемой конструкции с визуализацией полей интенсивностей напряжений, которые возникают в компрессоре при вращении с 26000 об/мин.

На этом рисунке также указаны уровни интенсивности напряжений. Путем изменения геометрических размеров конструкции было получено перераспределение полей интенсивностей напряжений.

Это привело к снижению также общего уровня напряжений. На примере проведенного расчета продемонстрированы возможности разработанной программы конечно-элементного исследования трехмерных тел сложной геометрической формы под действием различных нагрузок. Программа визуализации наглядно демонстрирует результаты проведенных расчетов.

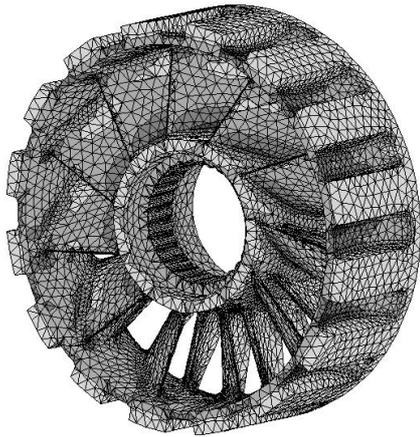


Рис. 1. Модель исследуемой конструкции

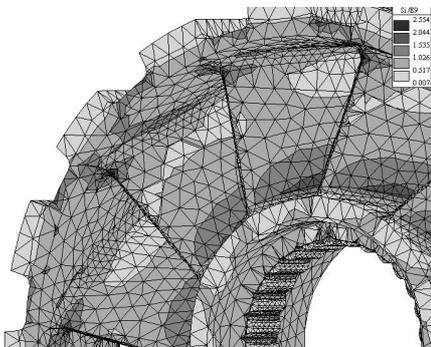


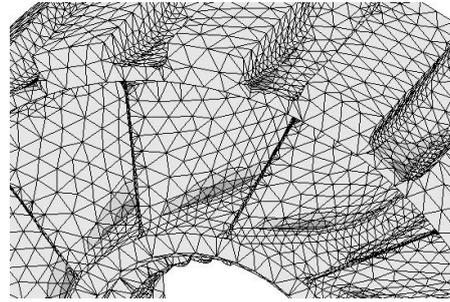
Рис. 2. Поля интенсивностей напряжений

### Заклучение

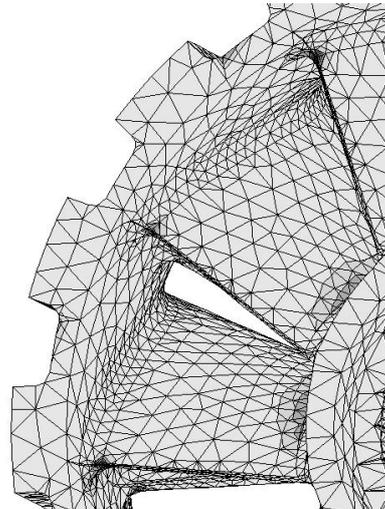
Известно, что появление пластических деформаций в дальнейшем приводит к разрушению конструкции. Проведенное исследование позволяет сделать предложения по изменению конструкции на этапе ее проектирования для снижения уровня максимальных напряжений.

### Литература

1. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М: Мир, 1987. – 542 с.



а



б

Рис. 3. Зоны концентрации напряжений

2. Зенкевич О.К., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

3. Конечноэлементный анализ собственных колебаний статически напряженных лопаток турбомашин / Ю.С. Воробьев, А.И. Шепель, Г.Г. Романенко и др. // Проблемы прочности. – 1990. – № 7. – С. 88-94.

4. Вибрации и статическая прочность лопаток турбокомпрессора / Ю.С. Воробьев, Е.В. Тишковец, В.А. Потанин, В.А. Касьянов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2003 – № 40/5. – С. 76-78.

Поступила в редакцию 30.05.2004

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