

нечные элементы. Пример такого разбиения представлен на (рис. 2).

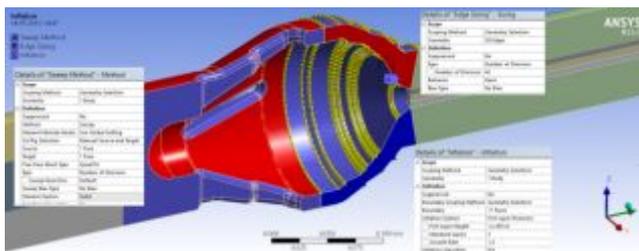


Рис. 2. Параметры разбиения сеткой модели твёрдого тела

Далее генерировалась сетка, и с помощью инструмента *Named Selection* задавались границы в соответствии с рис. 3.

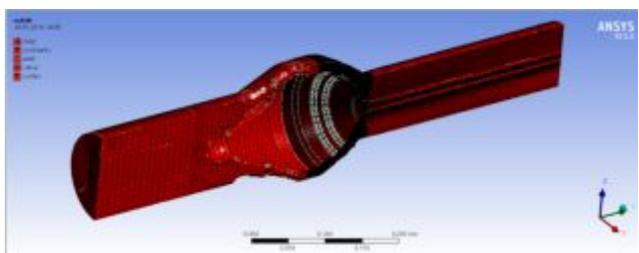


Рис. 3. Наименование границ

Далее задавались граничные условия в программе ANSYS CFX и моделировалось двухстороннее взаимодействие *Fluid Structure Interaction* (FSI) между клапаном и жидкостью при условии деформации сетки. Твёрдое тело (инструмент *Rigid Body*) явля-

ется недеформируемым объектом и описывается механическими параметрами, такими как масса, центр масс, момент инерции, начальная скорость и ускорение, а также ориентация.

Решатель ANSYS CFX учитывает суперпозицию сил инерции, упругости пружины и давления жидкости и вычисляет движение твёрдого тела на основании уравнений механики. Деформации элементов клапана не моделируются.

Таким образом, предложенный набор инструментов и последовательности действий можно рассмотреть как методику, позволяющую проводить моделирование клапанов и определение их характеристик.

#### Библиографические ссылки

1. Борисов В.А. Основы конструирования ракетных двигателей: Учебное пособие. – Самара: СГАУ, 2007. 98 с.
2. Пичугин Д.Ф. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1989. 244 с.
3. Пичугин Д.Ф. Конструкция и проектирование агрегатов двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. – Куйбышев: 1989. 244 с.

УДК 621.438:519.24

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ АНАЛИЗА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

©2016 А.С. Букатый<sup>1</sup>, С.А. Букатый<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

<sup>2</sup>Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва

### THE ANALYSIS CRITERIA DEVELOPMENT FOR THE STRESS-STRAIN STATE OF GAS TURBIN ENGINE PARTS IN THE ELASTOPLASTIC REGION

Bukaty A.S. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation),

Bukaty S.A. (Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyev, Rybinsk, Russian Federation)

*The presents the dimensionless criterion complex that is based on the ratio of stress state stiffness and energy criterion characterizing of the material tension in the elastoplastic region to use it for analysis of the stress-strain state with the purpose to diagnose the most vulnerable for damage regions of gas turbine engine parts. The efficiency of criterion is shown by the example of gas turbine disks improvement.*

Основные детали (диски, валы и др.), телей (ГТД), работают в условиях малоцикловой усталости и длительной прочности. определяющие ресурс газотурбинных двига-

При этом в наиболее нагруженных областях – зонах концентрации напряжений в каждом цикле нагружения возникают упругопластические деформации. Поэтому возникает необходимость расчётного диагностирования состояния деталей с учётом условий деформирования и типа напряжённо-деформированного состояния (НДС), которые существенно влияют на циклическую долговечность деталей. Известно, что увеличение составляющих всестороннего растяжения – шарового тензора напряжений существенно увеличивает жёсткость напряжённого состояния (НС) и уменьшает предельную пластичность материала. В работе предлагается учитывать тип НС коэффициентом жёсткости НС [1, 2]

$$K_{ж} = \frac{3\sigma_0}{\sigma_i} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – среднее или октаэдрическое напряжение;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Степень нагруженности деталей наилучшим образом характеризует удельная энергия, затраченная на упругопластическое деформирование материала, которую можно разделить на упругую и пластическую составляющие

$$U_0 = U_{0y} + U_{0пл}, \quad (2)$$

где

$$U_{0y} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (3)$$

$$U_{0пл} = (S_1\varepsilon_{1пл} + S_2\varepsilon_{2пл} + S_3\varepsilon_{3пл}), \quad (4)$$

где  $S_i$  – средняя величина главных напряжений, действующих в материале в процессе его пластического деформирования;  $\varepsilon_{iпл}$  – соответствующие пластические деформации;  $i = 1, 2, 3$ .

В задачах диагностики опасных мест или оптимизации конструкции деталей удобнее пользоваться безразмерными критериями. Поэтому энергетический критерий представим как отношение  $U_0$  к некоторой предельной величине  $U_{0пред}$ , которую также представим из двух слагаемых

$$U_{0пред} = U_{0y_пред} + U_{0пл_пред} = \frac{\sigma_T^2}{2E} + \sigma_{ср}e, \quad (5)$$

где  $\sigma_T$  – напряжение, равное физическому или условному пределу текучести материала;

$\sigma_{ср} = 0,5(\sigma_T + \sigma_{max})$  – среднее напряжение на участке упрочнения диаграммы растяжения;  $e = \ln(1 + \delta) - \ln(1 + \varepsilon_T)$  – натуральная (или истинная) деформация;  $\delta$  – относительное удлинение;  $\varepsilon_T = \sigma_T/E$  – предельная упругая деформация материала.

Тогда энергетический критерий будет иметь вид

$$K_U = \frac{U_0}{U_{0пред}} = \frac{U_{0y} + U_{0пл}}{U_{0y_пред} + U_{0пл_пред}}. \quad (6)$$

В результате получаем следующий комплексный критерий для анализа НДС деталей

$$K_{y-пл} = K_{ж} \cdot K_U. \quad (7)$$

В задачах диагностики конструкции и определения её «слабых» мест, где в процессе эксплуатации начинается зарождение микро- и макротрещин, при анализе НДС детали нужно искать области с максимальной величиной критерия

$$K_{y-пл} = \max K_{y-пл}. \quad (8)$$

Если расчёты на прочность показывают не одну, а несколько областей с наибольшими и близкими по величине эквивалентными напряжениями  $\sigma_{эkv}$  или критериями (6, 7), то наиболее опасными следует считать области с наибольшей положительной величиной критерия жёсткости НС  $K_{ж}$ .

На практике в ряде случаев величина  $U_{0пред}$  может превышать  $U_0$  более чем на порядок, что существенно уменьшает информативность критерия. В задачах диагностики это допустимо. Но в оптимизационных задачах величина критерия становится малочувствительной к изменению геометрических параметров исследуемых деталей. Поэтому в задачах оптимизации размеров и формы деталей для определения комплексного критерия в безразмерном виде предпочтительнее вместо предельной величины  $U_{0пред}$  использовать величину удельной энергии деформаций в исходном состоянии  $U_{0исх}$  в наиболее нагруженной области, существовавшую до начала процесса оптимизации конструкции детали. Тогда критерий (6) принимает следующий вид

$$K_U = \frac{U_0}{U_{0исх}} = \frac{U_{0y} + U_{0пл}}{(U_{0y} + U_{0пл})_{исх}}. \quad (9)$$

Оптимизацию конструкции деталей, работающих как в упругой, так и в упруго-пластической областях, следует проводить из условия

$$K_{y-пл\_опт} \rightarrow \min K_{y-пл\_опт} . \quad (10)$$

В качестве иллюстрации эффективности разработанных критериев анализа НДС приведены результаты исследования НДС дисков 11 ступени компрессора высокого давления газотурбинного двигателя Д-30КУ-154. Расчётно-экспериментальные доводочные работы [1] проводились с целью увеличения ресурса дисков. В связи с высокой концентрацией напряжений НДС в области концентраторов – шлиц было упруго-пластическим. В результате проведения ряда мероприятий по совершенствованию конструкции дисков их долговечность была увеличена с 2000 циклов до 16000 циклов без появления микротрещин. При этом величина комплексного параметра  $K_{y-пл}$  уменьшилась с 3,863 до 0,0698 – 0,0896 единиц.

УДК 65.011.4

## **ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА**

©2016 М.Д. Наумова, К.Т. Саттарова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### **PECULIARITIES OF THE MODERN MANUFACTURING ENGINEERING MANAGEMENT. MATHEMATICAL MODEL AS A TOOL OF THE INDUSTRIAL PRODUCTION**

Naumova M.D., Sattarova K.T. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*This article represents general concepts of mathematical modeling and the application of mathematical models in the organization of production in a non-deterministic execution orders. The model for calculating time parameters is using probability theory. The main problem is to get an option "just in time", i.e. to obtain products without departing from the prescribed timeframe.*

Математической моделью задачи называется совокупность математических соотношений, описывающих суть задачи. Математическое моделирование включает в себя: выбор переменных задач, составление системы ограничений, выбор целевой функции. В данном случае будет рассмотрена модель организации производства с учётом временных параметров.

## Библиографический список

1. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы. – Л.: Машиностроение, 1968. 272 с.
2. Агоджино А.М. Влияние надразов, напряжённое состояние и пластичность. – Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Пер. с англ. - М.: Мир, 1978. №4. С. 12–19.
3. Букатый А.С., Букатый С.А., Лёшин Д.П., Округин А.А. Совершенствование конструкции и технологии изготовления ответственных деталей ГТД на основе энергетического метода и исследования жёсткости напряженного состояния // Научно-технические проблемы в машиностроении и авиационной промышленности (ТМ-2012). Материалы IV международной научно-технической конференции. В 2-х частях. – Рыбинск: РГАТУ имени П.А.Соловьёва, 2012. – Ч. 1. 334 с. С. 308–312.

Основной задачей математического моделирования является возможность его прикладного использования на реальном предприятии. Разработка математической модели позволяет оптимизировать производство и выявить его слабые места.

В современной промышленности одной из основных проблем является нестыковка по срокам. Поэтому было необходимо разработать модель, которая отображает выпол-