УДК 621.452.001.57:681.54

А.В. ОЛЕЙНИК, Н.А. ШИМАНОВСКАЯ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УЧЕТА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА

По результатам конечно-элементных расчетов температурных напряжений и деформаций выявлено подобие деформированного состояния в критических точках ротора турбины высокого давления при различных сочетаниях температурных и конвективных граничных условий. Показано, что погрешность математической модели температурных напряжений, учитывающей подобие, относительно конечно-элементной модели высокого уровня – менее 1 МПа для основных стационарных режимов двигателя.

температурные напряжения, температурные деформации, газотурбинный двигатель

Введение

В настоящее время в состав систем учета выработки ресурса газотурбинных двигателей входят алгоритмы мониторинга напряжений в деталях от действия основных факторов силового и температурного нагружения. Так как доля температурных напряжений в деталях ГТД, как правило, значительна, то их учет в алгоритмах мониторинга считается обязательным [1].

В [1, 2] предложено для мониторинга температурных напряжений создавать специальные алгоритмы, диагностические модели, которые описывают влияние на напряженное состояние деталей наиболее значимых факторов. К таким моделям предъявляются достаточно противоречивые требования – точности и полноты учета факторов на уровне современных конечно-элементных моделей высокого уровня, а также алгоритмической надежности и системной совместимости, характерных для алгоритмов с простыми эмпирическими зависимостями. Для достижения необходимой точности предложено предварительно проводить идентификацию диагностических моделей по конечно-элементным моделям высокого уровня, учитывающим влияние максимального числа факторов. В [3] проведен анализ погрешности семи алгоритмов мониторинга температурных напряжений, отличающихся степенью учета различных факторов, характеризующих условия работы деталей. Наилучшие по точности рассчитывают напряжения с погрешностью порядка нескольких процентов, однако такая точность достигается за счет предварительного проведения достаточно громоздких вычислительных процедур, включающих:

– расчет по модели высокого уровня зависимости температурных напряжений от температуры при равномерном нагреве деталей;

– структурную идентификацию математической модели – выбор наилучшего набора параметров, характеризующих граничные условия теплообмена;

– идентификацию по конечно-элементным моделям высокого уровня полиномиальных функций этих параметров – оптимальное оценивание 12 коэффициентов полиномов.

Следует отметить, что на данном этапе разработок погрешность алгоритмов мониторинга температурных напряжений остается большей, чем погрешность мониторинга температурного состояния [4].

Цель настоящей работы – повышение точности и упрощение структуры математической модели температурных напряжений в критических точках термонапряженных узлов газотурбинных двигателей. Цель достигается за счет использования подобия напряженно-деформированного состояния на различных режимах.

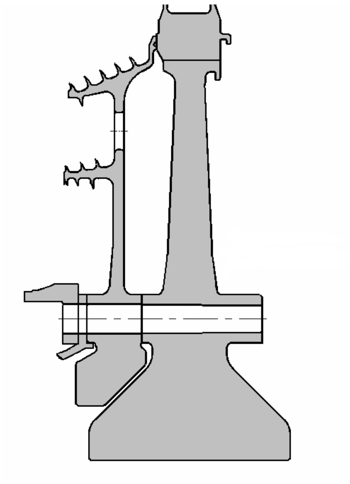

Рис. 1. Сечение ротора ТВД

1. Модель верхнего уровня

В проведенном исследовании модель верхнего уровня представляла собой последовательное решение методом конечных элементов осесимметричных задач стационарной теплопроводности и термоупругости для области, соответствующей шести деталям ротора турбины высокого давления (ТВД) с участком вала компрессора низкого давления (рис. 1). Свойства материалов деталей – коэффициенты теплопроводности, температурного расширения, модули упругости и их зависимости от температуры описывались участками прямых с шагом 100 °С и в различных деталях отличались на 20 ... 25 %. Использовалась осесимметричная конечно-элементная сетка с четырехугольными параболическими элементами.

Входящие в граничные условия теплообмена деталей локальные температуры среды (воздуха и газа) и коэффициенты теплоотдачи находились пересчетом условий базового режима на другие режимы по формулам [4], [5]:

$$T_{i,j} = T^*_{КВД_j} + \Theta_{i,б}\, k_{t_j}\left(T^*_{Гб} - T^*_{КВДб}\right);$$

$$\alpha_{i,j} = k_{\alpha_j} \cdot \alpha_{i,б},$$

где $T^*_{КВД}$, $T^*_{Г}$ – температуры торможения за компрессором высокого давления и перед рабочим колесом ТВД;

Θ_i – параметр, характеризующий локальное значение температуры среды;

$k_{t_j} = (T^*_{Г_j} - T^*_{КВД_j})/(T^*_{Гб} - T^*_{КВДб})$ – коэффициент, характеризующий изменение распределения температуры среды;

k_α – коэффициент, характеризующий изменение локальных значений коэффициентов теплоотдачи;

i, j – индексы, обозначающие точку поверхности детали и режим (сочетание граничных условий);

б – индекс, отмечающий значения величин на базовом режиме.

Граничные условия задачи термоупругости заключались в задании отсутствия осевых перемещений левого торца вала и обязательных условий теории упругости – исключения перемещений ротора как жесткого тела.

2. Подобие деформированного состояния при неравномерном нагреве

По модели верхнего уровня было просчитано более 1000 вариантов температурного и напряженно-деформированного состояний ротора ТВД от действия неравномерного нагрева. Действие силовых факторов не учитывалось. Коэффициенты, задающие граничные условия варьировались в пределах: $T^*_{КВД} = 0 ... 650$ ºС, $k_t = 0 ... 1{,}2$, $k_\alpha = 0 … 1{,}2$.

Традиционным уравнениям теории упругости, связывающим компоненты тензоров напряжений σ_x, σ_y, σ_z, σ_{xy} и деформаций ε_x, ε_y, ε_z, ε_{xy} :

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu-2\mu^2}\left[(1-\mu)\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y + \mu\varepsilon_z - (1+\mu)\,\beta\, t\right];$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu-2\mu^2}\left[\mu\varepsilon_x + (1-\mu)\varepsilon_y + \mu\varepsilon_z - (1+\mu)\,\beta\, t\right];$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\mu-2\mu^2}\left[\mu\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y + (1-\mu)\varepsilon_z - (1+\mu)\,\beta\, t\right];$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)}\varepsilon_{xy}$$

придадим вид, удобный для ведения мониторинга:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-2\mu}(\tilde{\varepsilon}_x - \beta\, t)\,; \qquad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-2\mu}(\tilde{\varepsilon}_y - \beta\, t)\,; \qquad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-2\mu}(\tilde{\varepsilon}_z - \beta\, t)\,; \qquad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)}\tilde{\gamma}_{xy}\,, \qquad (4)$$

где $t = t(T^*_{КВД}, k_t, k_\alpha)$ – температура точки детали;

E, μ, β – локальные значения модуля упругости и коэффициентов Пуассона и линейного расширения;

$\tilde{\varepsilon}_x, \tilde{\varepsilon}_y, \tilde{\varepsilon}_z, \tilde{\varepsilon}_{xy}$ – обобщенные деформации:

$$\tilde{\varepsilon}_x = (1-\mu)\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y + \mu\varepsilon_z\,;$$

$$\tilde{\varepsilon}_y = \mu\varepsilon_x + (1-\mu)\varepsilon_y + \mu\varepsilon_z\,;$$

$$\tilde{\varepsilon}_z = \mu\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y + (1-\mu)\varepsilon_z\,;$$

$$\tilde{\varepsilon}_{xy} = \varepsilon_{xy}\,.$$

Результаты расчетов по моделям высокого уровня температурного и деформированного состояний в критических точках деталей представлялись точками в пространстве $\tilde{\varepsilon} - t$. На рис. 2 в такой форме представлены результаты расчетов z-й компоненты обобщенной деформации в критической точке вала $\tilde{\varepsilon}(t) = \tilde{\varepsilon}_z(t(T^*_{КВД}, k_t, k_\alpha))$, а на рис. 3 часть этих результатов при $T^*_{КВД}$ = 500 °C.

При k_t<1, k_α<1 и постоянной температуре $T^*_{КВД}$ результаты $\tilde{\varepsilon}(t)$ находятся внутри треугольника **1-2-3** (рис. 3), у которого вершина **1** – точка $\tilde{\varepsilon}_1 = \tilde{\varepsilon}(t(T^*_{КВД}, 0, 0)) = \tilde{\varepsilon}_z(T^*_{КВД})$ соответствует равномерному нагреву деталей до температуры $t = T^*_{КВД}$, вершина **2** – точка $\tilde{\varepsilon}_2 = \tilde{\varepsilon}(t(T^*_{КВД}, 1, 0))$, вершина **3** точка $\tilde{\varepsilon}_3 = \tilde{\varepsilon}(t(T^*_{КВД}, 1, 1))$. Результаты расчетов при k_α=0, k_t=1, k_α=1 образуют стороны треугольника, соответственно, **1-2**, **2-3**, **3-1**.

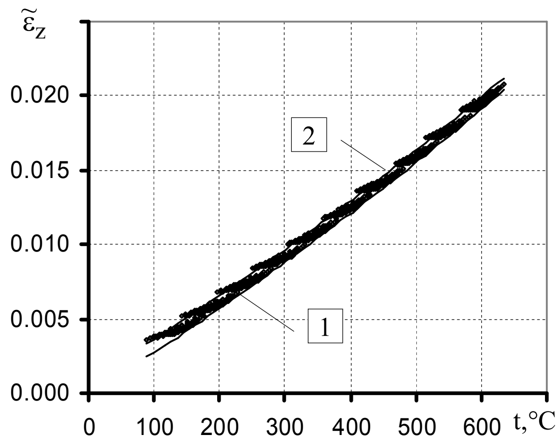

Рис. 2. Результаты расчетов компоненты $\tilde{\varepsilon}_z$ вала ТВД по конечно-элементной модели:
1 – равномерный нагрев;
2 – $\tilde{\varepsilon}(t) = \tilde{\varepsilon}_z(t(T^*_{КВД}, 1, 1))$

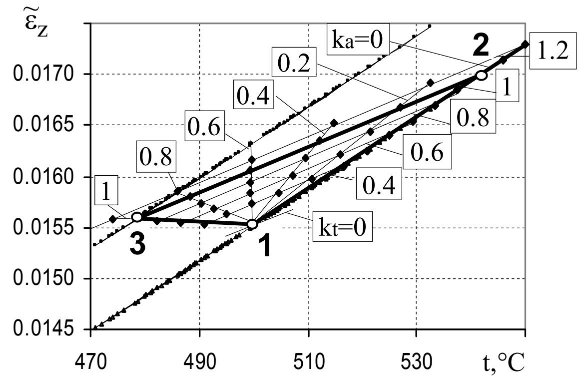

Рис. 3. Результаты расчетов по конечно-элементной модели (фрагмент рис. 2)

Результаты отражают известные общие закономерности – пропорциональное изменение температуры среды при постоянной теплоотдаче ведет к пропорциональному изменению полей температур, деформаций и напряжений, при этом коэффициенты пропорциональности, связывающие эти изменения, зависят от уровня теплоотдачи [6]. Проявлением этих закономерностей является параллельность линий k_t = const и лучевой характер линий k_α = const в треугольнике **1-2-3**.

Наличие такой закономерности позволяет компактно описать полученные результаты. Охарактеризуем точку $\tilde{\varepsilon}_j = \tilde{\varepsilon}(t_j)$, результат расчета деформации при j-м варианте задания граничных условий, относительной координатой, связанной с треугольником **1-2-3**:

$$L_j = h_j / H,$$

где h_j – расстояние от $\tilde{\varepsilon}_j = \tilde{\varepsilon}(t_j)$ до линии **2-3**;

H_j – расстояние от вершины **1** до линии **2-3** (высота треугольника **1-2-3**).

Выразим L_j через координаты $\tilde{\varepsilon}, t$ вершин треугольника и учтем в виде линейной зависимости от k_t то, что, в силу высказанных выше соображений о пропорциональности деформаций и температур, L_j должна равняться 1 при $k_t = 0$ и равняться 0 при $k_t = 1$:

$$L_j = \frac{(\tilde{\varepsilon}_2 - \tilde{\varepsilon}_3)t_j + (t_3 - t_2)\tilde{\varepsilon}_j + t_2\tilde{\varepsilon}_3 - t_3\tilde{\varepsilon}_2}{\tilde{\varepsilon}_1(t_3 - t_2) + \tilde{\varepsilon}_2(t_1 - t_3) + \tilde{\varepsilon}_3(t_2 - t_1)} = 1 - k_t, \quad (5)$$

где $\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \tilde{\varepsilon}_3$ – деформационные координаты;

$t_1 = T^*_{КВД}$, $t_2 = t(T^*_{КВД}, 1, 0)$, $t_3 = t(T^*_{КВД}, 1, 1)$ – температурные координаты вершин **1**, **2**, **3**.

Результаты всех проведенных расчетов (более 1 000) как для диска, так и для вала ТВД, при всех сочетаниях температурных и конвективных условий с отклонением менее 0,01 легли на прямую, описываемую уравнением (5). С таким же отклонением на эту прямую легли рассчитанные по модели высокого уровня контрольные расчеты 27 стационарных режимов двигателя (рис. 4).

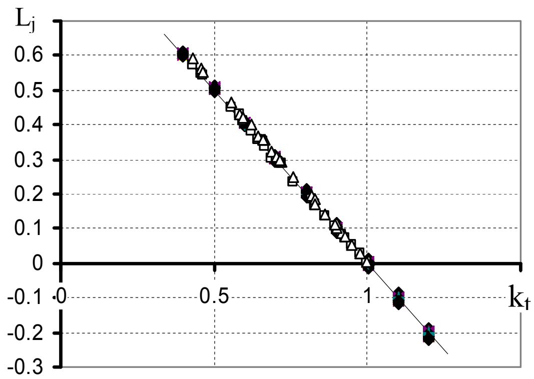

Рис. 4. Обобщение расчетов деформаций:
▲▼ – диска и вала при произвольных сочетаниях граничных условий;
□ – диска на рабочих режимах двигателя;
Δ – вала на рабочих режимах двигателя;
— – по формуле $L_j = 1 - k_t$

3. Математическая модель температурных напряжений

На основе подобия деформированного состояния в различных условиях нагрева (5), можно предложить достаточно простую и эффективную математическую модель температурных напряжений для ведения их мониторинга.

Предварительно по модели высокого уровня должны быть рассчитаны зависимости компонент обобщенных деформаций от температуры в критической точке при двух условиях нагрева, например:

$\tilde{\varepsilon}_р(t)$ – при равномерном нагреве;

$\tilde{\varepsilon}_н(t)$ – в условиях $k_t = 1$, $k_\alpha = 1$ при различных $T^*_{КВД}$ (неравномерный нагрев).

Входной информацией для проведения мониторинга температурных напряжений являются величины, характеризующие граничные условия: $T^*_{КВД}$, k_t, k_α и температура в критической точке детали t_j, определяемая по мониторинговой модели температурного состояния [5]. По той же модели должны быть определены температурные координаты вершин треугольника **1-2-3** для текущего режима двигателя:

$$t_1 = T^*_{КВД}, \; t_2 = t(T^*_{КВД}, 1, 0), \; t_3 = t(T^*_{КВД}, 1, 1).$$

По зависимостям $\tilde{\varepsilon}_р(t)$ и $\tilde{\varepsilon}_н(t)$ для каждой компоненты деформации определяются деформационные координаты вершин треугольника **1-2-3**. Например, для компоненты $\tilde{\varepsilon}_z(t)$:

$$\tilde{\varepsilon}_1 = \tilde{\varepsilon}_{z_р}(T^*_{КВД});$$

$$\tilde{\varepsilon}_2 = \tilde{\varepsilon}_{z_р}(t_2);$$

$$\tilde{\varepsilon}_3 = \tilde{\varepsilon}_{z_н}(t_3).$$

По формуле, полученной из выражения (5) находится обобщенная деформация:

$$\tilde{\varepsilon}_j = \frac{(1-k_t)S + \tilde{\varepsilon}_2(t_3 - t_j) + \tilde{\varepsilon}_3(t_j - t_2)}{t_3 - t_2},$$

где $S = \tilde{\varepsilon}_1(t_3 - t_2) + \tilde{\varepsilon}_2(t_1 - t_3) + \tilde{\varepsilon}_3(t_2 - t_1)$.

Каждая компонента $\tilde{\varepsilon}_x, \tilde{\varepsilon}_y, \tilde{\varepsilon}_z, \tilde{\varepsilon}_{xy}$ вычисляется по соответствующим ей деформационным координатам $\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \tilde{\varepsilon}_3$. Температурные координаты t_1, t_2, t_3 являются общими для всех компонент.

По заданному значению t_j и найденным значениям $\tilde{\varepsilon}_x, \tilde{\varepsilon}_y, \tilde{\varepsilon}_z, \tilde{\varepsilon}_{xy}$ по формулам (1) – (4) вычисляются компоненты напряжений σ_x, σ_y, σ_z, σ_{xy}.

Заключение

Оценка погрешности предложенной математической модели проводилась сравнением результатов расчетов по ней температурных деформаций и напряжений в критических точках диска и вала ТВД с результатами по конечно-элементной модели высокого уровня. Расчеты проводились при граничных условиях 27 стационарных режимов двигателя, включая режимы «малый газ» и «взлетный» при температуре воздуха от – 50 до + 50 ºС.

Необходимые зависимости $\tilde{\varepsilon}_p(t)$ и $\tilde{\varepsilon}_н(t)$ были получены путем конечно-элементного расчета в 12 точках интервала 0 ... 600 ºС и полиномиальной аппроксимации результатов.

Для устранения влияния на результаты погрешности модели температурного состояния использовалась входная температурная информация: t_j, t_2 и t_3, рассчитанная по модели высокого уровня.

Во всех случаях отличие результатов по деформации не превысило 0.1% от ее значения на максимальном режиме. Отличие результатов по температурным напряжениям – менее 1 МПа, т.е. менее 0,7% от значения максимальной компоненты температурного напряжения (150 МПа) на максимальном исследованном режиме.

Литература

1. Комплекс программно-методических средств для учета выработки ресурса авиационных ГТД в системах диагностической обработки его параметров / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, В.И. Колесников и др. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: НАКУ „ХАІ”. – 2001. – Вип. 26. Двигуни та енергоустановки. – С. 163 – 166.

2. Диагностические модели для контроля температурного и напряженного состояния турбин ГТД / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, В.А. Филяев, Д.В. Крикунов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: ХАІ, 1998. – Вип. 5. – С. 276 – 280.

3. Олейник А.В., Шимановская Н.А. Выбор алгоритмов мониторинга температурных напряжений в деталях на установившихся режимах для учета выработки ресурса газотурбинного двигателя // Вестник двигателестроения. – 2003. – Вып. 2. Двигуни та енергоустановки. – С. 78 – 81.

4. Модели температурного состояния деталей на установившихся режимах для систем учета выработки ресурса газотурбинных двигателей / А.В. Олейник, Д.В. Крикунов, Н.А. Шимановская, С.Б. Резник, Е.А. Бандурко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: НАКУ „ХАІ”, 2002. – Вип. 34. – С. 133 – 135.

5. Олейник А.В., Шимановская Н.А. Выбор алгоритмов мониторинга температуры деталей на установившихся режимах для учета выработки ресурса газотурбинного двигателя // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: НАКУ „ХАІ”, 2003. – Вип. 40. – С. 105 – 108.

6. Гейтвуд Б.Е. Температурные напряжения применительно к самолетам, снарядам, турбинам и ядерным реакторам. – М.: Ин.. лит., 1959. – 350 с.

Поступила в редакцию 25.05.2004

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