

Определение ресурса лопатки газовой турбины в условиях ползучести на основе континуальной механики разрушения

В. А. Баженов, А. И. Гулярь, С. О. Пискунов, А. А. Шкрыль

Научно-исследовательский институт строительной механики, Киев, Украина

На основе полуаналитического метода конечных элементов и соотношений континуальной механики разрушения проведено численное исследование ползучести и распространения зоны континуального разрушения в лопатке газотурбинной установки. Определена величина ресурса до образования трещиноподобного дефекта и пределы применимости соотношений континуальной механики разрушения.

Ключевые слова: ползучесть, континуальная механика разрушения, численное моделирование, метод конечных элементов, пространственная задача, лопатка газовой турбины.

Обеспечение безопасности газотурбинных установок (ГТУ) в течение длительных сроков эксплуатации требует наличия информации об изменении несущей способности их ответственных узлов и деталей. При нагружении под воздействием высоких температур ресурс лопаток ГТУ в существенной степени определяется накоплением деформаций ползучести, что обуславливает необходимость расчета на длительную прочность. Вопросы определения напряженно-деформированного состояния лопаток ГТУ с учетом деформаций ползучести рассмотрены авторами работ [1–3] и др. При этом в [4] отмечается, что моделирование процессов деформирования деталей стационарных ГТУ, расчетный ресурс которых составляет порядка 50...100 тыс. ч., требует использования физических уравнений, учитывающих сопутствующее ползучести накопление повреждений материала. Необходимость прогнозирования возникновения дефектов материала на начальной стадии их развития отмечается также в [5].

В работе [6] с использованием разработанной на основе полуаналитического метода конечных элементов (ПМКЭ) [7] методики численного моделирования напряженно-деформированного состояния, ползучести и континуального разрушения пространственных тел, проведено определение ресурса до начала разрушения, а также расположения макроскопического дефекта (начальной зоны разрушения) в лопатке ГТУ. Показано, что задачу об определении ресурса необходимо решать в пространственной постановке с учетом перераспределения напряжений в процессе ползучести и зависимости физико-механических свойств материала от температуры. Однако важным является вопрос о величине добавочного ресурса, связанного с распространением зоны континуального разрушения.

Целью данной работы является разработка методики моделирования распространения зон разрушения в пространственных телах, оценка величины дополнительного ресурса, связанного с распространением зоны разрушения и определение пределов применимости соотношений континуальной механики разрушения (КМР) для рассматриваемого типа объектов. Для

решения поставленной задачи требуется разработка конечно-элементной базы, позволяющей моделировать как переменную геометрию лопатки вдоль вертикальной оси, так и наличие зон разрушения, создания эффективных алгоритмов моделирования развития зон разрушения и решения систем нелинейных уравнений ПМКЭ.

Описание процесса ползучести выполнено на основе уравнений теории упрочнения с использованием параметра повреждаемости Качанова–Работнова.

Лопатка представляет собой пространственное тело сложной конфигурации, обусловленной переменной площадью поперечного сечения и наличием закручивания относительно вертикальной оси. Исходя из конструктивных особенностей лопатки и характера действующих нагрузок, для проведения расчета был выделен ее фрагмент [6]. Применение ПМКЭ предусматривает нанесение конечно-элементной сетки в плоскости поперечного сечения тела и использование одного конечного элемента (КЭ) в перпендикулярном направлении (вдоль образующей). В области поперечного сечения КЭ используется билинейный закон разложения перемещений, а вдоль образующей перемещения представляются в виде разложения по системе координатных функций (гармоник) [6, 7], число которых определяется неоднородностью напряженно-деформированного состояния и удовлетворением условий сходимости получаемых результатов при последовательном увеличении параметров дискретной модели.

Традиционно область применения ПМКЭ ограничена телами, геометрия которых не изменяется в направлении образующей. Для учета влияния закручивания фрагмента лопатки на напряженно-деформированное состояние был избран подход, основанный на изменении исходной плотности материала в различных точках поперечного сечения. Для учета переменной площади поперечного сечения использованы неоднородные призматические КЭ (рис. 1), компоненты вектора узловых реакций и матрицы жесткости которых определены согласно формулам, приведенным в [6] и включающим в данном случае следующие величины:

$$\{s\}_l^i = \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \sigma \end{matrix} \right\} \varphi^{(l)} \left(\sqrt{g} \right)_m dx^3 = \sum_{m=1}^M \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \sigma \end{matrix} \right\}_m \varphi_m^{(l)} \left(\sqrt{g} \right)_m H_m,$$

$$[T]_{00}^{ln} = \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \varphi_m^{(l)} \left[\begin{matrix} \sigma \\ D \end{matrix} \right] \varphi_m^{(n)} \left(\sqrt{g} \right) dx^3 = \sum_{m=1}^M \varphi_m^{(l)} \left[\begin{matrix} \sigma \\ D \end{matrix} \right] \varphi_m^{(n)} \left(\sqrt{g} \right)_m H_m,$$

где $g = g(x^3)$ – функция, учитывающая изменение площади поперечного сечения по длине КЭ.

Для проверки достоверности данного подхода решена тестовая задача о растяжении призматического стержня переменной площади поперечного сечения. Погрешность определения напряжений и перемещений по длине стержня, полученных с использованием традиционного и полуаналитического вариантов МКЭ, лежит в пределах 1%.

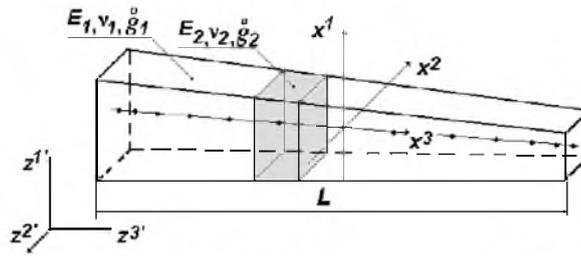


Рис. 1. Неоднородный призматический КЭ с переменной площадью поперечного сечения.

Момент времени, когда в некоторой точке тела с координатами (z^{1*}, z^{2*}, z^{3*}) параметр повреждаемости достигает критического значения ω^* , фиксируется как момент появления начальной зоны континуального разрушения (рис. 2,а). В окрестности данной точки вводится полость объемом V_0 (рис. 2,б). Значение V_0 в поперечном сечении тела определяется размером КЭ, а в направлении образующей – числом гармоник, используемых для аппроксимации напряженно-деформированного состояния. Далее задача ползучести решается в соответствии с изложенным в [6] алгоритмом при наличии полости объемом V_0 до достижения условия $\omega = \omega^*$ в других точках конструкции, к которым применяется процедура введения полости V_0 . Процесс заканчивается по достижении полостью объема V^* (рис. 2,в).

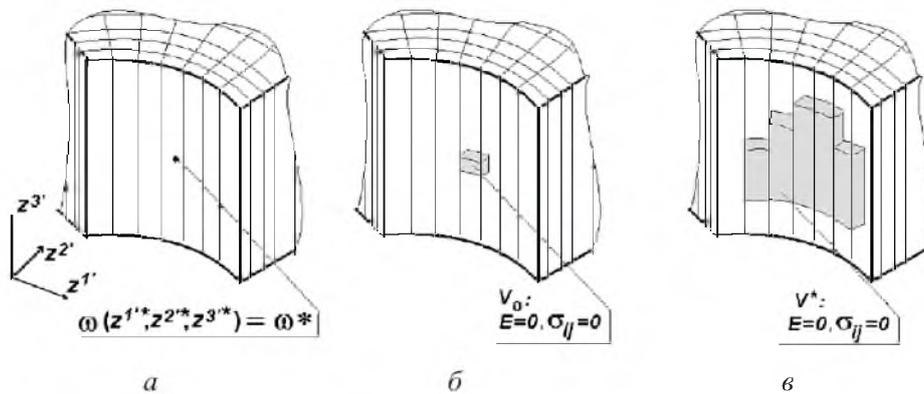


Рис. 2. Алгоритм моделирования зоны распространения континуального разрушения.

Моделирование полости выполняется с учетом условия $E_2 \rightarrow 0$ для используемого КЭ (рис. 1). Достоверность результатов ПМКЭ при наличии полостей различного размера подтверждена решением тестовой задачи о растяжении прямоугольной пластины с полостью (рис. 3). Распределения напряжений, полученные в характерных сечениях пластины при разных соотношениях характерных размеров пластины и полости, на основе МКЭ и ПМКЭ совпадают (рис. 3). Таким образом, ПМКЭ позволяет адекватно описывать напряженно-деформированное состояния не только для сплошных призматических тел [7], но и при наличии полостей различного размера и конфигурации.

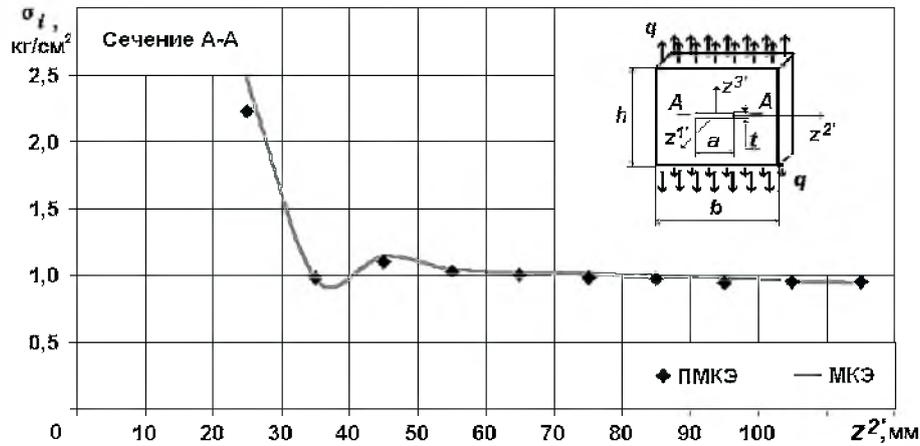


Рис. 3. Результаты решения тестовой задачи о растяжении пластины с полостью.

Достоверность алгоритма моделирования распространения зоны разрушения подтверждена решением приведенной в [8] задачи о разрушении толстостенной трубы.

Дискретная модель фрагмента лопатки, построенная с использованием неоднородных призматических КЭ переменной площади поперечного сечения приведена на рис. 4. Распределения напряжений по высоте фрагмента лопатки, полученные на основе ПМКЭ в предположении упругого деформирования материала, совпадают с результатами, рассчитанными на основе традиционного трехмерного метода КЭ с учетом реальной переменной геометрии фрагмента лопатки.

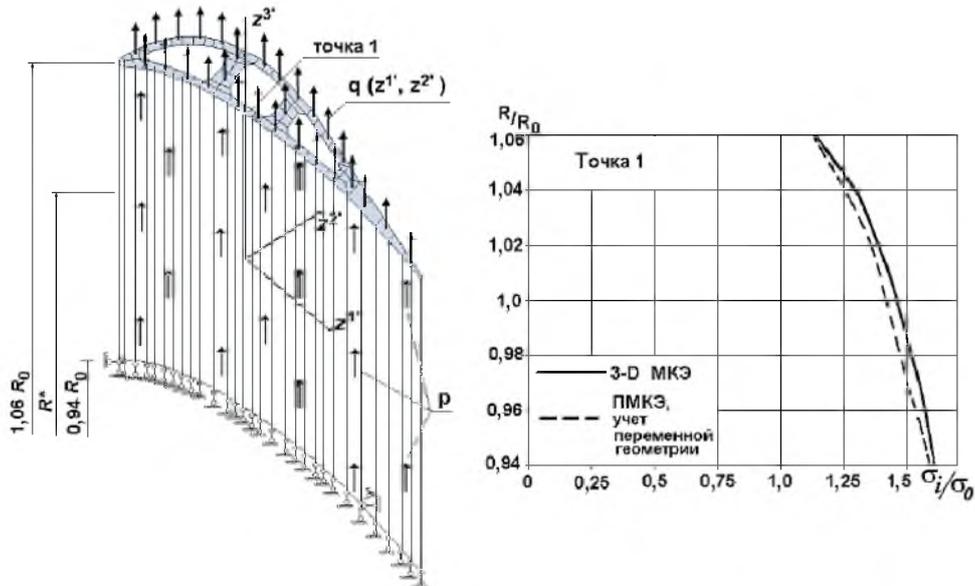


Рис. 4. Дискретная модель фрагмента лопатки и распределение напряжений по высоте фрагмента лопатки.

Для моделирования деформирования фрагмента лопатки в условиях ползучести и распространения зоны разрушения требуется проведение исследований сходимости результатов при последовательном увеличении параметров дискретной модели. Так, увеличение числа гармоник с 9 до 30 позволило уточнить время до начала разрушения t_0^* на 15%. В то же время последовательное сгущение исходной КЭ сетки в поперечном сечении (рис. 4) в два, четыре и восемь раз как по толщине, так и вдоль стенки лопатки (на рис. 5 эти сетки обозначены "2X", "4X", "8X", где число соответствует количеству КЭ по толщине стенки лопатки) мало повлияло на величину t^* . Такой результат объясняется существенной локализацией зоны максимальных значений повреждаемости по высоте лопатки. Начальная зона разрушения формируется в момент времени t^* в точке I поперечного сечения лопатки, расположенного на расстоянии R^* от оси вращения [6].

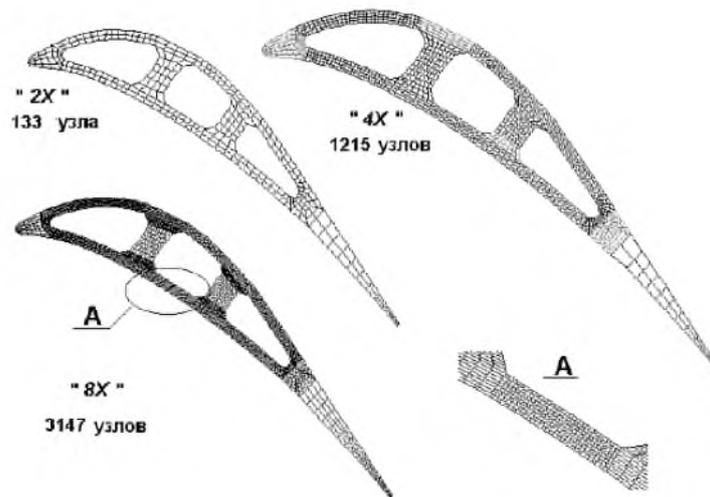


Рис. 5. Дискретные модели в поперечном сечении лопатки.

Введение в расчетную схему полости, размер которой намного меньше характерных размеров объекта, приводит к количественным и качественным изменениям в картине распределения напряжений, связанным с концентрацией напряжений в окрестности полости. Решение соответствующей задачи требует значительных вычислительных затрат, поскольку такие изменения происходят при каждой трансформации конфигурации зоны разрушения.

Результаты исследований показали, что распространение зоны разрушения происходит преимущественно в поперечном сечении лопатки: характерный размер зоны в плане l ощутимо превышает ее высоту h . Поскольку принятые допущения о размере начального объема разрушения V_0 обусловлены исключительно параметрами дискретной модели исследуемого объекта, обязательным является исследование сходимости получаемых результатов при последовательном уменьшении размера V_0 при сгущении сетки КЭ. Полученные результаты показали, что толщина зоны разрушения не стабилизируется, а стремится к нулю (рис. 6). При этом величина

добавочного ресурса, обусловленного развитием зоны разрушения весьма незначительна и составляет около 5% величины t^* .

Это позволило констатировать, что развитие зоны разрушения приводит к образованию в конструкции дефекта типа “трещина”, дальнейшее развитие которого не может быть описано с использованием соотношений КМР. Анализ сходимости величины добавочного ресурса, выполненный безотносительно к абсолютным размерам и конструктивным особенностям исследуемого объекта, а в зависимости от отношения длины образовавшегося трещиноподобного дефекта к его высоте l/h показал, что по достижении зоной разрушения отношения высоты к длине $l/h \approx 10$ дальнейшее распространение зоны разрушения происходит в течение малого промежутка времени (рис. 7).

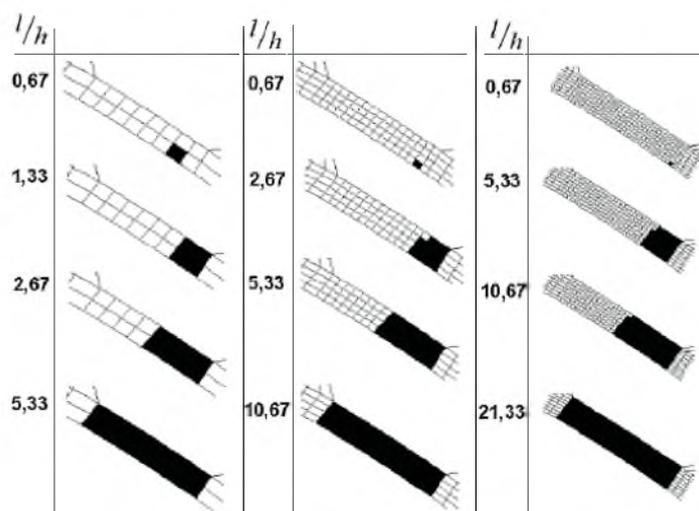


Рис. 6. Соотношения характерных размеров зон разрушения, полученных с использованием различных дискретных моделей.

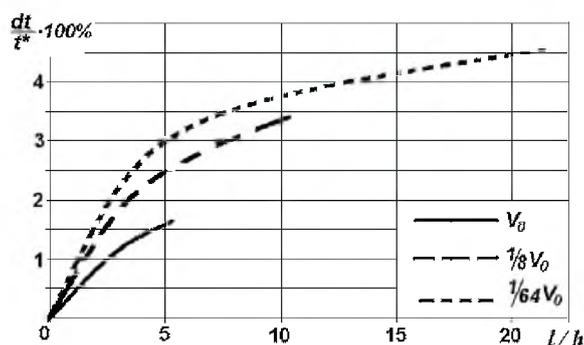


Рис. 7. Сходимость величин дополнительного ресурса до достижения зоной разрушения разных отношений размеров l/h .

Таким образом, время до достижения зоной разрушения размера, соответствующего $l/h \approx 10$, можно считать моментом образования дефекта типа “трещина”. Общая величина добавочного ресурса, связанного с развитием

зоны разрушения, моделирование которого осуществимо в рамках корректного применения соотношений КМР для рассматриваемого объекта не превышает 5% ресурса до формирования начальной зоны разрушения. Дальнейшее определение ресурса лопатки требует применения соотношений механики разрушения.

Резюме

На основі напіваналітичного методу кінцевих елементів і співвідношень континуальної механіки руйнувань проведено численні дослідження повзучості та розповсудження зони континуального руйнування у лопатці газотурбінної установки. Визначена величина ресурсу до утворення тріщиноподібного дефекта та межі застосування співвідношень континуальної механіки руйнування.

1. Симин Н. О., Лебедев А. С. Стратегия ресурсного проектирования стационарных газотурбинных установок на основе 3D анализа прочности основных узлов ГТД // Вибрації в техніці і технологіях. – 2004. – № 6 (38). – С. 5 – 9.
2. Кобельский С. В., Куриат Р. И., Кравченко В. И., Квитка А. Л. Численное моделирование термонапряженного состояния моделей лопаток ГТД с теплозащитными покрытиями и оценка их ресурса // Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій: Тр. Міжнар. конф. (Київ, 6–9 червня 2000 р.) / Відп. ред. В. Т. Трощенко. – Київ: Логос, 2000. – Т. 2. – С. 795 – 800.
3. Гецов Л. Б., Мельников Б. Е., Семенов А. С., Фокин Д. Ю. и др. Прочность рабочих лопаток ТВД турбины ГТК-25И и методы повышения ресурса // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Тр. VI Междунар. конф. (С.-Петербург, 14–17 июня 2005 г.). – СПб.: СПбГТУ, 2005. – С. 155 – 163.
4. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 591 с.
5. Муравченко Ф. М. Актуальные проблемы динамики, прочности и надежности авиадвигателей // Вибрації в техніці і технологіях. – 2004. – № 6 (38). – С. 2 – 4.
6. Баженов В. А., Гуляев А. И., Кучер Н. К., Пискунов С. О. Влияние пространственного напряженно-деформированного состояния на длительную прочность лопатки // Вибрації в техніці і технологіях. – № 6 (38). – 2004. – С. 31 – 35.
7. Баженов В. А., Гуляев А. И., Сахаров А. С., Топор А. Г. Полуаналитический метод конечных элементов в механике деформируемых тел. – Киев: НИИСМ, 1993. – 376 с.
8. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. – М.: Мир, 1976. – 360 с.

Поступила 04. 11. 2005