

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО РОСТА ТРЕЩИН МЦУ В ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЯХ АГТД ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рябов А. А.¹, Мохов К. Ю.¹, Воронков О. В.¹, Кудрявцев А. Ю.¹, Мусеев А. А.²

¹ООО «Саровский инженерный центр» (СИНЦ), г. Саров, alex.ryabov@saec.ru

²АО «ОДК-Климов», г. Санкт-Петербург, museev_aa@klimov.ru

Ключевые слова: АГТД, малоцикловая усталость, устойчивый рост трещины, МКЭ

Приводятся некоторые результаты моделирования процесса устойчивого роста трещин МЦУ в основных деталях авиационного газотурбинного двигателя (АГТД). Моделирование было выполнено в соответствии с применяемой в отрасли методикой, основные теоретические положения которой изложены в работах [1-3] и др. Также приводится описание привнесённых в методику моделирования новых особенностей, позволивших, по мнению авторов, повысить точность проводимых расчётов трещиностойкости и снизить их трудоёмкость.

Применяемая отраслевая методика моделирования устойчивого роста трещин в деталях АГТД имеет полуэмпирический характер, основывается на положениях линейной механики разрушения [4], эмпирическом уравнении Пэриса [5], данных фрактографического анализа поверхностей разрушения деталей АГТД [6], металловедческом представлении о фрагментированной структуре материала в окрестности фронта усталостной трещины [7]. Основные уравнения, позволяющие проводить имитационное моделирование устойчивого роста трещины от начального дефекта, имеют следующий вид:

$$\Delta l = B \cdot (\Delta K_I / E)^2 \cdot N; \quad \alpha = -\arccos\{(3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}) / (K_I^2 + 9K_{II}^2)\},$$

где Δl – смещение точки фронта трещины по нормали к фронту за N циклов нагружения; $B = 10$; K_I , K_{II} – КИН, соответствующие I-й и II-й моде смещения берегов трещины; ΔK_I – размах K_I в цикле нагружения; α – угол отклонения вектора смещения точки фронта от плоскости трещины на предыдущем шаге расчёта.

Новый фронт трещины описывается годографом векторов с координатами $(\Delta l, \alpha)$ в локальной полярной системе координат, отложенными от точек текущего фронта. Моделирование процесса устойчивого роста трещины осуществляется пошагово путём построения нового фронта трещины относительно предыдущего на каждом новом расчётном шаге. Величины K_I и K_{II} получаются расчётом НДС детали с трещиной по МКЭ.

Для получения точной конфигурации нового фронта трещины необходимо высокое разрешение текущего фронта и достаточно большое количество точек, для которых определяется вектор прироста трещины, что подразумевает автоматизацию данной процедуры. В противном случае высока вероятность упустить важные особенности развития трещины. Например, на рис. 1а показан график ΔK_I по длине фронта трещины в диске АГТД, на правом краю которого виден существенный прирост ΔK_I .

Моделирование развития усталостной трещины по указанной методике представляет собой явную схему, стабильную только при относительно малых приращениях Δl ($< 5 \dots 10\%$ от текущей длины трещины), в противном случае от фронта к фронту возникают значительные колебания K_I , K_{II} и получаемых на их основе величин. Увеличить Δl на расчётном шаге до $10 \dots 30\%$ от текущей длины трещины при сохранении

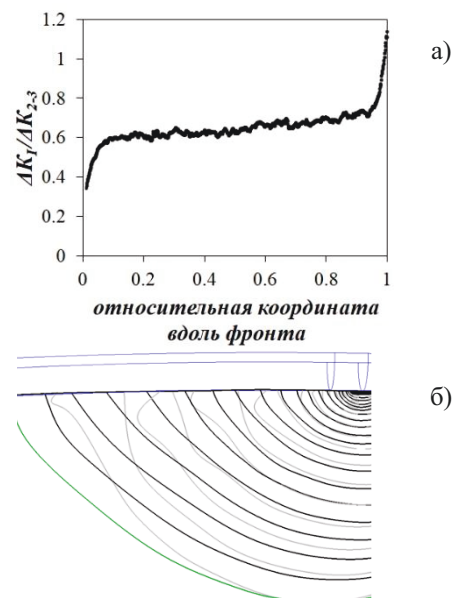


Рис. 1 – График ΔK_I по длине фронта трещины (а) и расчетные фронты трещины (б)

стабильности позволяет нижняя релаксация величин КИН, используемых для определения Δl и α :

$$K^{[u]} = K^{[i]} \cdot URF + K^{[i-1]} \cdot (1 - URF) ,$$

где $URF \in [0,1]$ – коэффициент нижней релаксации; верхние индексы означают: $[u]$ – релаксированное значение; $[i]$, $[i-1]$ – значение с текущего и предыдущего расчётного шага.

На рис. 1б показаны серыми линиями последовательные расчётные фронты трещины в диске АГТД, полученные без использования релаксации, чёрными – с использованием.

Список литературы

1. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А. Прогнозирование циклической долговечности дисков авиадвигателей на основе моделирования устойчивого роста трещин малоциклового усталости. *Авиационные двигатели*. 2019. № 1 (2). С. 37-48.

2. Туманов Н.В. Кинетическое уравнение устойчивого роста трещин малоциклового усталости. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (нац. исслед. универ.)*. 2014. № 5-1 (47). С. 18-26.

3. Туманов Н.В. Физико-механические аспекты устойчивого роста усталостных трещин. *Вестник Московского авиационного института*. 2011. Т. 18. № 2. С. 132-136.

4. Брок Д. Основы механики разрушения. Пер. с англ. М.: Выс. шк., 1980. 368 с.

5. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering (Trans. ASME)*, 1963. No. 12. P. 528-534.

6. Ножницкий Ю.А., Туманов Н.В., Черкасова С.А., Лаврентьева М.А. Фрактографические методы определения остаточного ресурса дисков авиационных газотурбинных двигателей. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011. Т. 15. № 4 (44). С. 39-45.

7. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. – 224 с.: ил.

Сведения об авторах

Рябов Александр Алексеевич, д.ф.-м.н., директор ООО СИНЦ. Область научных интересов: прочность материалов и конструкций, тепломассоперенос в сплошных средах.

Мохов Константин Юрьевич, начальник отдела «П» в ООО СИНЦ. Область научных интересов: прочность материалов и конструкций.

Воронков Олег Викторович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник. Область научных интересов: прочность материалов и конструкций.

Кудрявцев Андрей Юрьевич, к.ф.-м.н., начальник отдела «ТМП» в ООО СИНЦ. Область научных интересов: тепломассоперенос в сплошных средах.

Мусеев Александр Александрович, начальник КБ расчётов АО «ОДК-Климов». Область научных интересов: прочность деталей АГТД.

STABLE LOW CYCLE FATIGUE CRACK GROWTH IN MAIN PARTS OF AGTE FEM SIMULATION ASPECTS

Ryabov A.A.¹, Mokhov K.U.¹, Voronkov O.V.¹, Kudryavtsev A.U.¹, Museev A.A.²

¹«Sarov Engineering Center» Ltd., Sarov, Russia, alex.ryabov@saec.ru

²JSC «UEC-Klimov», Saint Petersburg, Russia, museev_aa@klimov.ru

Keywords: AGTE, low cycle fatigue, stable crack growth, FEM

Some results of finite element modeling (FEM) of stable crack growth in main parts of an aviation gas turbine engine (AGTE) are contained in the article. Crack growth simulation was implemented according to the industry used approach which main statements are described in the articles [1-3] and others. Also descriptions for new modeling aspects used in the current work are provided which in authors' opinion are essential for accuracy improvement and effort decrease of the simulation.

УДК 539.3+539.376