

Анализ трещиностойкости образцов из гранулированного сплава ЭП741НП в условиях малоциклового усталости с применением метода конечных элементов

А. В. Высотский, А. В. Иванов, М. Е. Колотников

ФГУП ММПП “Салют”, Москва, Россия

Анализируются возможности применения методик расчета трещиностойкости, базирующихся на методе конечных элементов и зависимостях механики разрушения, на основании экспериментальных данных, полученных при испытаниях образцов на малоцикловую усталость. Оценивается влияние имеющихся в гранулированном материале дефектов на долговечность образцов. Получено хорошее совпадение расчетных результатов с экспериментальными, что подтвердило обоснованность применения данных расчетных методик, а также возможность их использования для анализа трещиностойкости и установления ресурса реальных деталей газотурбинных двигателей. Обнаруженные в процессе исследования особенности разрушения гранулированного материала могут быть учтены при проектировании новых образцов авиационной техники.

Ключевые слова: трещина, трещиностойкость, метод конечных элементов, газотурбинный двигатель, испытание образцов, малоцикловая усталость.

В современных условиях развития авиационного двигателестроения одним из важных способов увеличения ресурса двигателя может быть реализация возможности безопасной эксплуатации деталей с трещиной. Для работы в этом направлении необходимо иметь экспериментально подтвержденные методики расчета трещиностойкости деталей. Учитывая то что детали газотурбинного двигателя (ГТД) работают в условиях высоких напряжений и температур, традиционный расчет трещины с применением линейной механики разрушения может быть не совсем корректным [1–3]. В данной работе рассматривается возможность определения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и критериев нелинейной механики разрушения (δ -раскрытия трещины (РТ) у вершины и энергетического J -интеграла) для расчета реальных трещин в разрушившихся образцах из гранулированного материала ЭП741НП при испытаниях на малоцикловую усталость (МЦУ). Фрактографический анализ показывает, что разрушение образцов всегда начинается от различных внутренних дефектов в материале (поры, включения, окисленные гранулы и пр.). Поэтому с помощью результатов испытаний образцов можно проанализировать процесс зарождения и развития трещины до момента разрушения, а следовательно, оценить влияние имеющихся в материале дефектов на трещиностойкость уже реальных деталей, изготовленных из данного материала.

Цель настоящей работы заключается в следующем:

- 1) оценить влияние дефектов, имеющихся в материале ЭП741НП (их тип, размеры и расположение), на долговечность испытываемых образцов;
- 2) с помощью различных методик на основе МКЭ и зависимостей механики разрушения рассчитать трещины в образцах, провести сравнение

полученных результатов с экспериментальными и сделать вывод о возможности применения методик к оценке характеристик трещиностойкости реальных деталей ГТД.

Для решения поставленных задач были проведены специальные испытания на МЦУ стандартных цилиндрических образцов диаметром 5 мм и длиной рабочей части 25 мм в условиях отнулевого осевого циклического нагружения с уровнем максимальных напряжений 1000 МПа при температуре 650°C и частотой нагружения 1 Гц.

Общее количество испытанных образцов составляет 19. Образцы вырезали из различных зон реальных заготовок дисков компрессора и турбины ГТД в радиальном и тангенциальном направлениях. При испытаниях все образцы разрушались от трещины, развившейся от внутреннего дефекта. Типы выявленных дефектов: окислы алюминия (Al); оксикарбонитриды титана (Ti); поры; нерасплавленные гранулы; примеси гафния; шлаки.

Результаты испытаний образцов приведены в таблице.

Результаты испытаний образцов на МЦУ

№ образца	Вырезка	Тип дефекта	A, мм	B, мм	L, мм	N, цикл
1	2	3	4	5	6	7
1	Тангенциальная	Нерасплавленные гранулы	0,011	0,008	(1,640)	84541
2	»	Окислы Al	0,028	0,016	(2,500)	71117
3	»	Нерасплавленные гранулы	0,070	0,050	0,430	56041
4	»	Окислы Al	0,100	0,100	0,109	51100
5	Радиальная	»	0,320	0,110	(1,760)	50851
6	Тангенциальная	Примесь гафния	0,130	0,050	0,660	47050
7	Радиальная	Окислы Al	0,185	0,060	0,105	37389
8	Тангенциальная	Шлаки	0,150	0,130	(0,940)	31704
9	»	»	0,100	0,070	(1,030)	28320
10	»	Окислы Al	0,150	0,150	(1,500)	25906
11	»	Нерасплавленные гранулы	0,160	1,130	0,110	25669
12	»	Окислы Al	0,340	0,090	0,050	24481
13	»	Окисные включения	0,150	0,050	0,130	22352
14	Радиальная	Примесь гафния	0,080	0,060	0,120	18645
15	»	Оксикарбонитриды Ti	0,220	0,050	(0,800)	18089
16	»	Пористость	0,100	0,100	0,077	8017

1	2	3	4	5	6	7
17	Тангенциальная	Окисленные гранулы	0,080	0,080	0	8015
18	Радиальная	Нерасплавленные гранулы	0,330	0,110	(2,500)	50042
19	»	Окислы Al	0,020	0,015	0,010	8589

Примечания: 1. A и B – максимальный и минимальный габаритные размеры дефекта в сечении разрыва образца (измерения проводились на электронном микроскопе); L – расстояние от дефекта до поверхности образца в сечении. 2. В скобках представлены данные для образцов с дефектами, находящимися на глубине более 0,8 мм от поверхности.

Фрактографические исследования изломов показывают, что при развитии трещины от внутреннего дефекта, расположенного на расстоянии L примерно 0,8–1,0 мм и более от поверхности образца, она имеет форму круга (рис. 1), при меньшей величине L трещина выходит на поверхность, и ее форма становится полуэллиптической. Кроме того, большой разброс по долговечности образцов (N от 8 до 85 тыс. цикл), вероятно, свидетельствует о существенном влиянии на эту характеристику направления вырезки образца, типа его дефекта, формы и расстояния от поверхности.

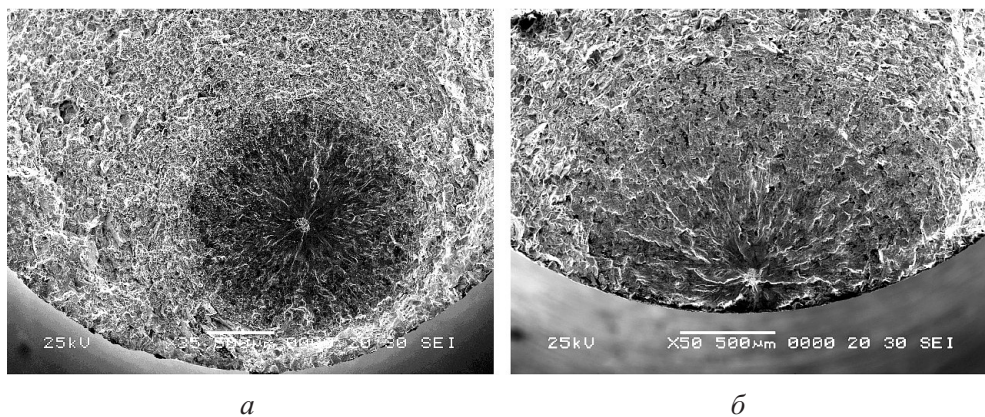


Рис. 1. Круговая (а) и полуэллиптическая (б) формы трещин в образцах.

В целом прослеживается тенденция максимального влияния величины L на долговечность. По имеющимся данным испытаний образцов нельзя сделать однозначное заключение о влиянии других факторов на количество циклов до разрушения N , для этого необходимо проводить дополнительные испытания.

Во всех проведенных испытаниях размеры трещин при разрушении образцов практически одинаковы, а именно: для круговых внутренних трещин диаметр D составляет около 1,6 мм, для полуэллиптических трещин радиус R достигает 1,3 мм. Такая стабильность результатов испытаний свидетельствует о возможности их математического анализа.

При проведении дальнейших расчетов данные размеры трещин принимаются как *критические*, соответствующие предельному состоянию образцов для рассматриваемого уровня номинальных напряжений 1000 МПа.

Для выполнения расчетов был создан ряд конечноэлементных моделей образцов с различным размером трещины (для круговой трещины диаметром от 0,2 до 1,6 мм с шагом 0,2 мм, для полуэллиптической трещины радиусом от 0,1 до 1,3 мм с шагом 0,1 мм). В моделях используются четырехузловые конечные элементы (TETRA). Область вокруг трещины моделируется с применением восьмиузловых элементов правильной формы (HEXA). Расчеты проводятся в нелинейной постановке в системе MSC.Marc с учетом кривой деформирования материала ЭП741НП при температуре 650°C. Точность конечноэлементных расчетов проверялась на моделях с различной плотностью сетки.

На рис. 2 и 3 представлены конечноэлементные модели рабочей части образцов с полуэллиптической и круговой трещиной с указанием на поверхностях граничных условий: T_Y , T_Z – ограничение степени свободы перемещения в направлении осей Y и Z соответственно.

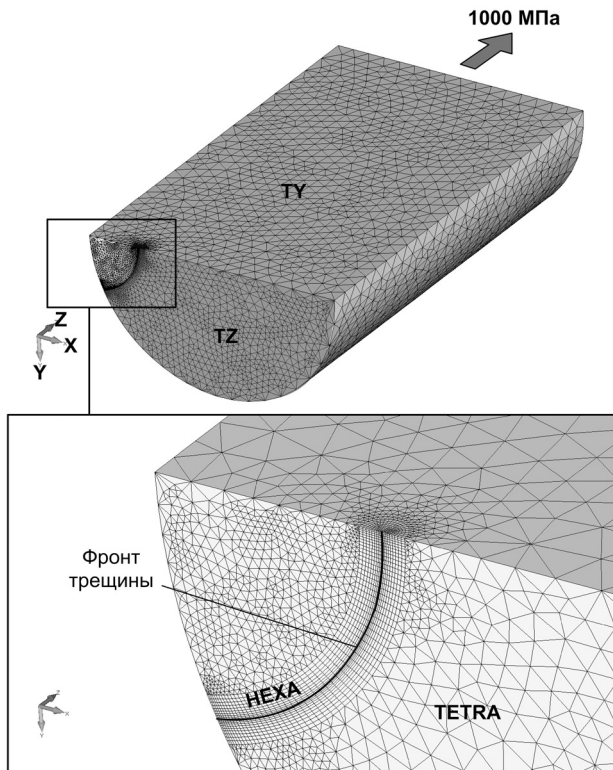


Рис. 2. Модель образца с полуэллиптической трещиной радиусом 1 мм.

Все дальнейшие расчеты выполнялись в следующей последовательности: 1) расчет КИН для каждого размера трещины с определением критического размера; 2) нахождение скорости роста трещины всех размеров по кинетической диаграмме материала; 3) определение суммарной расчетной долговечности трещины; 4) сравнение расчетных данных с экспериментальными.

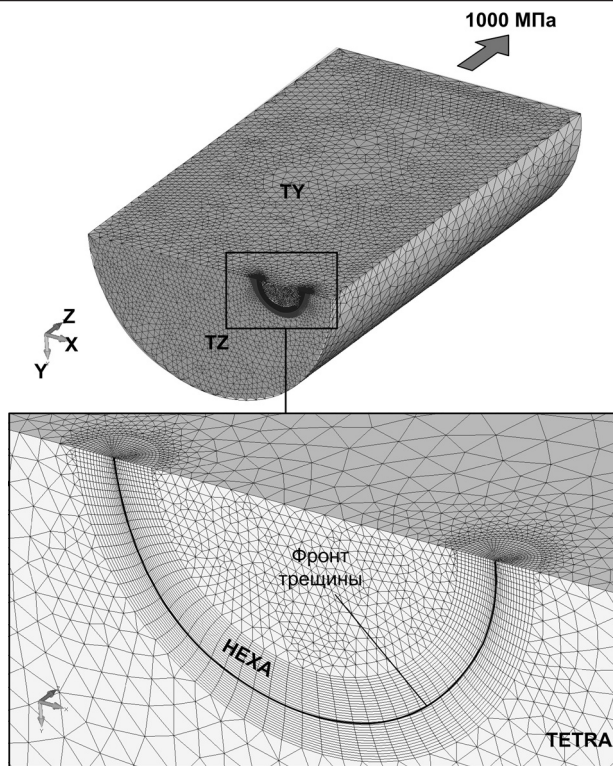


Рис. 3. Модель образца с круговой трещиной диаметром 1 мм.

Анализ применимости методик главным образом относится к возможности использования критериев механики разрушения РТ и J -интеграла для расчета трещин в условиях высоких напряжений, превышающих предел текучести, в пластичном материале.

При расчете КИН на основе РТ использовались выражения, полученные Ирвином [1, 3]:

$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{K_I}{E\sigma_T} \Rightarrow K_I = \sqrt{\frac{\pi\delta}{4} E\sigma_T} = 0,866 \sqrt{\delta E\sigma_T} \quad (1)$$

(для плосконапряженного состояния);

$$K_I = 1,29 \sqrt{\delta E\sigma_T} \quad (2)$$

(для плоскодеформированного состояния); K_I – КИН; E – модуль упругости; σ_T – предел текучести; δ – раскрытие в вершине трещины.

Раскрытие трещины определяется непосредственно по деформации конечных элементов вблизи вершины. При расчете КИН на основании J -интеграла используются зависимости (3), (4) [1, 4]. Для случая плоскодеформированного состояния величина КИН будет

$$K_I = \sqrt{JE/(1-\nu^2)}, \quad (3)$$

для случая плосконапряженного состояния –

$$K_I = \sqrt{JE}. \quad (4)$$

Величина J -интеграла определяется по стандартной процедуре расчета в MSC.Marc. Результаты расчета КИН по РТ и J -интегралу для круговой и полуэллиптической трещин всех рассматриваемых размеров приведены на рис. 4, 5.

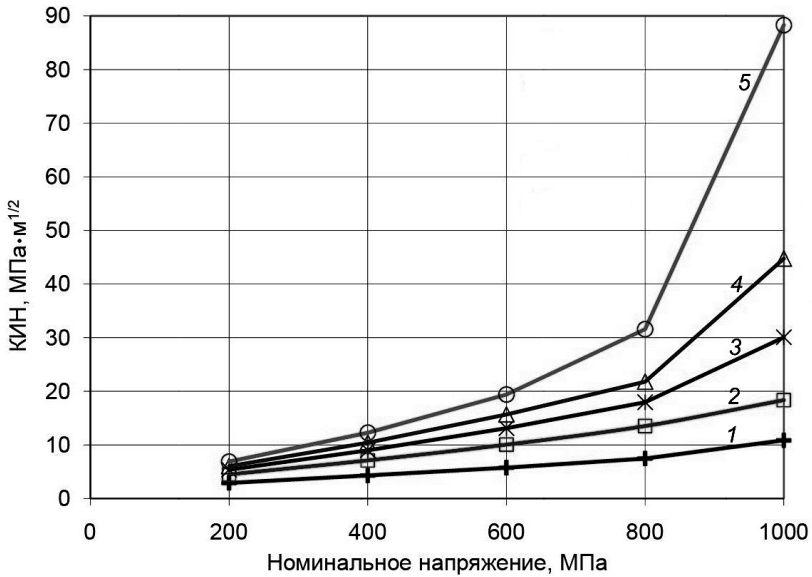


Рис. 4. Зависимость КИН от нагрузки для разных размеров круговых внутренних трещин: 1 – $D = 0,1$ мм; 2 – $D = 0,4$ мм; 3 – $D = 0,8$ мм; 4 – $D = 1,2$ мм; 5 – $D = 1,6$ мм.

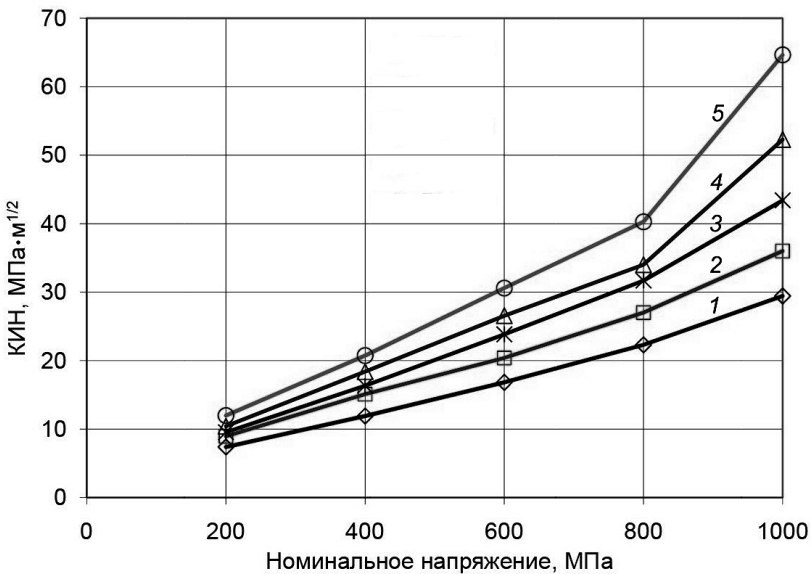


Рис. 5. Зависимость КИН от нагрузки для разных размеров поверхностных полуэллиптических трещин: 1 – $R = 0,4$ мм; 2 – $R = 0,6$ мм; 3 – $R = 0,8$ мм; 4 – $R = 1,2$ мм; 5 – $R = 1,6$ мм.

Полученные КИН для внутренней круговой и поверхностной полуэллиптической трещин разных размеров сравнивались с величиной ΔK_{\max} (максимальный размах КИН в цикле нагружения, соответствующий окончанию второго участка стабильного роста трещины на кинетической диаграмме материала ЭП741НП). При равенстве расчетного КИН величине ΔK_{\max} критический размер трещины считался достигнутым. Результаты расчета показывают, что теоретический критический диаметр круговой трещины составляет около 1,6 мм, а критический размер поверхностной трещины близок к радиусу 1,3 мм. Хорошее их совпадение с данными эксперимента свидетельствует о возможности применения методик расчета к оценке трещиностойкости реальных деталей ГТД, работающих в условиях высоких напряжений, которые превышают предел текучести.

Дальнейшая оценка долговечности рассматриваемых трещин проводилась на основе кинетической диаграммы материала ЭП741НП при температуре 650°C с использованием степенного уравнения Париса [1].

Таким образом, расчетное суммарное количество циклов, необходимое для роста внутренней круговой трещины с 0,2 до 1,6 мм, составляет 8200 цикл. Согласно данным экспериментов, количество циклов до разрушения образцов с такими дефектами находится в диапазоне 18089...8451 цикл, что существенно превышает величину 8200 цикл. Такая большая разница, по-видимому, связана с длительным периодом зарождения трещин.

Расчетное количество циклов, необходимое для роста поверхностной полуэллиптической трещины с 0,1 до 1,3 мм, составляет 2660 цикл. Долговечность трех образцов с такими дефектами находится в диапазоне 8015...8589 цикл, что существенно превышает расчетную величину 2660 цикл. Следовательно, расчетный период зарождения трещин также довольно существен и может составлять большую часть долговечности образца. Несмотря на то что рассмотренные образцы имели различную природу дефектов, расположенных у поверхности (пористость, окисленная гранула, окислы Al), тем не менее, по данным эксперимента, они обладают практически одинаковой долговечностью.

Выводы

1. Период зарождения трещин в образцах, по-видимому, составляет большую часть их долговечности. При этом прослеживается тенденция, что наиболее явное влияние на долговечность трещин оказывает расстояние дефекта от поверхности образца L .

2. Результаты расчета КИН по представленным методикам показывают хорошее (в пределах 15%) их совпадение, при этом полученный критический размер рассмотренных трещин для данного уровня напряжений практически совпадает с экспериментальным. Это позволяет говорить о возможности применения этих методик для расчета трещиностойкости деталей ГТД в условиях действия высоких номинальных циклических напряжений, превышающих предел текучести.

3. Для более подробного исследования и анализа развития трещин в образцах из материала ЭП741НП необходимо проводить их дальнейшие испытания при других уровнях температуры и номинальных напряжений в цикле.

Резюме

Аналізуються можливості використання методик розрахунку тріщиностійкості, що базуються на методі скінченних елементів та залежностях механіки руйнування, на основі експериментальних даних, отриманих при випробуваннях зразків на малоциклову втому. Оцінюється вплив дефектів, що мають місце в гранульованому матеріалі, на довговічність зразків. Отримано добрий збіг розрахункових результатів з експериментальними, що підтверджує обґрунтованість використання даних розрахункових методик та можливість з їхньою допомогою аналізувати тріщиностійкість і встановлювати ресурс реальних деталей газотурбінних двигунів. Виявлені у процесі випробувань особливості руйнування гранульованого матеріалу можуть бути враховані при проектуванні нових зразків авіаційної техніки.

1. *Пестриков В. М., Морозов Е. М.* Механика разрушения твердых тел. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.
2. *Херцберг Р. В.* Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1989. – 575 с.
3. *Хеллан К.* Введение в механику разрушения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
4. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 356 с.

Поступила 04. 03. 2009