

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПРИМЕРЕ ДЕФЛЕКТОРА ДИСКА ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2018

Е. Е. Кочерова аспирант кафедры сопротивления материалов;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
kocherova_2020@mail.ru

Рассмотрено решение задачи расчёта долговечности реальной детали газотурбинного двигателя, имевшей в эксплуатации проблемы, связанные с появлением трещин, истощением несущей способности и нелокализованным разрушением вследствие развития трещины, возникшей по механизму малоциклового усталости материала в межлабиринтной зоне детали. Проектный анализ детали, выполненный инженерными методами, соответствующими нормативной методологии, принятой на момент проектирования, не предполагал проблем с прочностью, связанных с малоциклового усталостью. Массовые проявления дефекта «трещины в радиусе перехода центрирующего пояса фланца дефлектора» привели к необходимости проведения оценки безопасности дальнейшей эксплуатации изделий с данными деталями до выработки назначенного ресурса. По результатам металлургических исследований сделан вывод о причинах возникновения и введён комплекс технологических мероприятий по предотвращению данных дефектов в будущем. Приведено несколько методик оценки малоциклового усталости, используемых в процессах проектирования и разработки двигателей в условиях отсутствия банка данных по свойствам материалов при «жёстком» цикле нагружения.

Газотурбинный двигатель; турбина; циклическая долговечность; малоцикловая усталость; дефект; ресурс; усталостные трещины; напряжённо-деформированное состояние; эквивалентные циклические испытания.

Цитирование: Кочерова Е.Е. Сравнительный анализ методик оценки малоциклового усталости деталей газотурбинного двигателя на примере дефлектора диска турбины высокого давления // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 61-71. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-61-71

Введение

При стендовых эквивалентно-циклических испытаниях одного из опытных двигателей серии НК было получено нелокализованное разрушение дефлектора с началом по полотно в зоне между первым и вторым лабиринтами. Аналогичный дефект на серийном двигателе стал причиной катастрофы самолёта. На ряде серийных дефлекторов после соответствующих циклических наработок были обнаружены трещины различной протяжённости и глубины в той же зоне. Разрушения во всех случаях квалифицировались как малоцикловая усталость (МЦУ) [1;2] и связывались как с повышенной циклической нагруженностью, так и с неблагоприятной технологической наследственностью материала [3], привнесённой при механической обработке межлабиринтной зоны (повышенный уровень наклёпа, низкая чистота обработки поверхности).

По результатам металлургических исследований был реализован комплекс мероприятий по снижению уровня технологического повреждения материала в труднообрабатываемых (межлабиринтных) зонах дефлекторов. Он включал в себя: перевод механической обработки на станки с числовым программным управлением для исключения рисков, связанных с человеческим фактором; удаление слоя материала с грубым наклёпом от лезвийной обработки посредством абразивно-жидкостной обработки; коррекцию направления обработки микрошариками межлабиринтной зоны для улучшения исходного состояния поверхности детали, в том числе и зоны проявления дефекта [4].

В целях предотвращения появления подобного дефекта на вновь изготавливаемых двигателях конструкция дефлектора принципиально изменена посредством снятия нижнего лабиринта, что исключило наличие наиболее опасной зоны детали.

В то же время в эксплуатации остаётся свыше сорока двигателей с дефлекторами прежней конструкции и поэтому необходимо оценить безопасность эксплуатации данных изделий в рамках установленного ресурса [5;6].

В настоящий момент требуемые согласно [5] результаты натурных испытаний образцов, вырезанных из соответствующих деталей (или заготовок), при «жёстком» цикле нагружения при различных коэффициентах асимметрии цикла зачастую отсутствуют. Поэтому возникает необходимость в разработке методик оценки МЦУ на основе имеющихся результатов испытаний образцов при «мягком» цикле нагружения. В данной работе проводится сравнительный анализ известных методик и разработанной методики оценки МЦУ с учётом влияния коэффициента асимметрии цикла.

Методики оценка циклической долговечности

Приведём четыре методики оценки циклической долговечности дефлектора по малоцикловой усталости.

Методика расчётной оценки по уравнению Мэнсона-Коффина (методика 1). В соответствии с нормами прочности расчёт циклической долговечности может быть выполнен с использованием модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина, методика расчёта приведена в нормах прочности [5].

Методика расчётно-экспериментальной оценки с использованием кривых МЦУ, полученных на гладких образцах при симметричном цикле (методика 2). В инженерной практике для предварительных оценок часто используется упрощённый подход, при котором оценка циклической долговечности производится с использованием кривых МЦУ материала, полученных на гладких образцах по максимальному значению σ_i – максимального главного напряжения в цикле [7-10]. Такая оценка предполагает отнулевой цикл изменения напряжения в расчётной точке конструкции, что при наличии пластической деформации в первом цикле нагружения реальной конструкции не соответствует действительности. Кривые МЦУ для гладких образцов из сплава ЭК79 приведены на рис. 1.

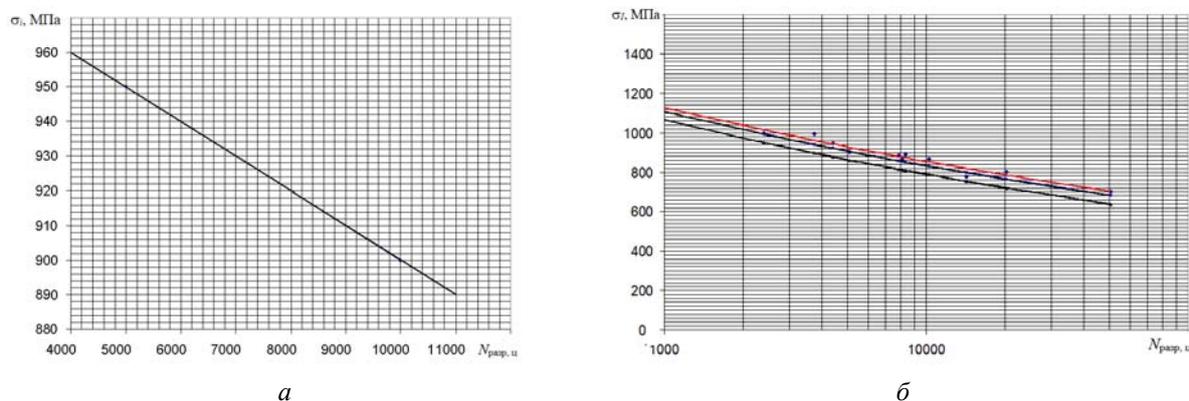


Рис. 1. Кривые МЦУ для сплава ЭК79, гладкие образцы:
 а – $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, данные из справочника ВИАМ; б – $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, данные ПАО «Кузнецов»
 (верхняя кривая для $P = 0,5$; средняя – для $P = 0,95$; нижняя – для $P = 0,995$)

Методика расчётно-экспериментальной оценки с использованием кривых МЦУ, полученных на образцах с концентратором при симметричном цикле (методика 3). Методика строится на моделировании процесса испытаний образцов в программном комплексе Ansys с учётом кривых деформирования сплава ЭК79 для получения зависимости $\Delta\varepsilon_i = f(\lg N_{разр})$, где $\Delta\varepsilon_i$ – эквивалентные размахи полной деформации, $N_{разр}$ – число циклов до разрушения. Зависимости $\Delta\varepsilon_i$ от $N_{разр}$ строятся по трём точкам аппроксимирующих линейных зависимостей амплитуды напряжений от числа циклов нагружения до разрушения $\sigma = f(\lg N_{разр})$ для доверительных вероятностей $P = 0,5; 0,95; 0,995$ следующим образом:

– значения амплитуды напряжений в нетто-сечении пересчитываются в соответствующие амплитуды растягивающей нагрузки, прикладываемой по торцам моделей образцов;

– производится несколько циклов упругопластического анализа процесса нагрузка – разгрузка – нагрузка – разгрузка (имитация последовательных циклов нагружения образцов при испытаниях) для диапазона нагрузок с пластическими деформациями в первом цикле (получение установившегося цикла деформирования);

– после установления факта получения установившегося цикла деформирования в вершине надреза определяются упругие и пластические компоненты деформаций для моментов разгрузки и нагрузки, размахи компонентов упругой и пластической деформаций и эквивалентный размах (интенсивность размахов) деформаций, так же как и при использовании уравнения Мэнсона-Коффина [5];

– по полученным значениям строятся кривые МЦУ в форме зависимости $\Delta\varepsilon_i = f(\lg N_{разр})$, показанные на рис. 2;

– полученные кривые МЦУ в размахах деформации используются для расчёта долговечности.

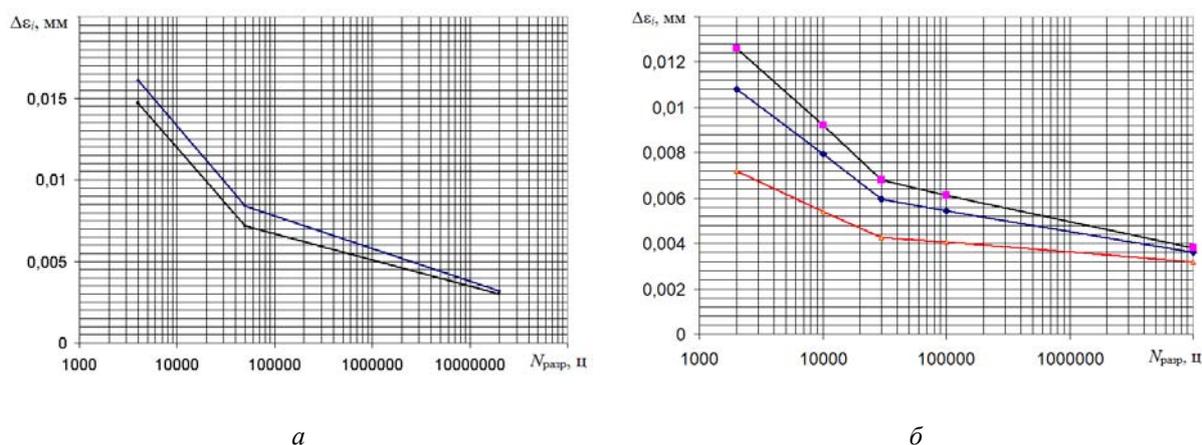


Рис. 2. Кривые МЦУ сплава ЭК79 в деформационном представлении:

а – $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (верхняя кривая для $P = 0,5$; нижняя – для $P = 0,95$);

б – $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ (верхняя кривая для $P = 0,5$; средняя – для $P = 0,95$; нижняя – для $P = 0,995$)

Методика расчётно-экспериментальной оценки с учётом влияния коэффициента асимметрии цикла (методика 4). Наличие достаточно большого объёма экспериментальных данных по МЦУ образцов с различными концентраторами напряжений позволяет построить поле характеристик малоциклового усталости для материала с учётом асимметрии цикла [4;10].

Предлагается следующая методика построения поля характеристик МЦУ, которая заключается:

- в построении аппроксимирующих зависимостей $\sigma_p = f(N_u)$, где σ_p – разрушающие напряжения, N_u – число циклов до разрушения для гладких образцов и образцов с концентраторами радиусов $r = 0,1$ мм и $r = 0,3$ мм для температур 20°C , 550°C , 650°C по результатам имеющейся серии испытаний с $P = 0,995$;

- определении циклов нагружения всех типов образцов на каждом уровне температуры, соответствующих разрушению для некоторого принятого набора долговечностей, например 1000, 2500, 5000, 10 000 циклов;

- анализе по методике расчётно-экспериментальной оценки циклической долговечности с использованием кривых МЦУ, полученных на образцах с концентраторами напряжений установившегося цикла напряжённо-деформированного состояния (НДС) всех типов образцов на каждом уровне температуры для каждой долговечности;

- выборе характерной характеристики НДС для использования в анализе циклической долговечности исходя из НДС в расчётной точке рассчитываемой детали. При сложном трёхмерном НДС оптимальным будет выбор эффективных размахов (амплитуд) и эквивалентного среднего значения интенсивности полной деформации в цикле; при близком к одномерному НДС – амплитуды и среднего значения максимального компонента напряжения в цикле;

- построении поля характеристик постоянной разрушающей долговечности в координатах σ_a – амплитудные напряжения цикла, σ_m – средние напряжения цикла или $\Delta\varepsilon_i$ – размах деформаций цикла, ε_m – средние деформации цикла для набора значений разрушающей наработки;

- определении разрушающей наработки по полученным из анализа НДС детали значениям σ_a , σ_m или $\Delta\varepsilon_i$, ε_m .

На рис. 3 приведено поле характеристик МЦУ сплава ЭК79 при 650°C , полученных по такой методике в координатах σ_a , σ_m с линейной (по типу диаграммы Гудмана) аппроксимацией [11].

Вариант построения характеристик в напряжениях был выбран исходя из анализа НДС дефлектора в зоне проявления дефекта.

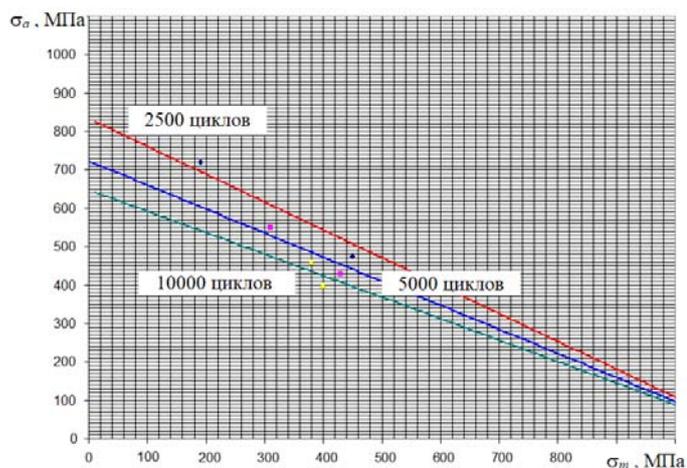


Рис. 3. Поле характеристик МЦУ сплава ЭК79 при 650°C с учётом формы цикла нагружения

При получении поля характеристик не учитывались данные для образцов с надразом радиусом 0,1 мм в связи с большим разбросом полученных значений разрушающих долговечностей и трудностями, возникшими при обработке результатов и связанными, по-видимому, с некорректностью упругопластической модели материала при больших пластических деформациях.

Оценка напряжённо-деформированного состояния

Для использования методики 1 необходимо иметь оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) критической зоны дефлектора по результатам структурного анализа [10] модели в характерные моменты расчётного типового полётного цикла (ТПЦ) и испытательного цикла эквивалентно-циклических испытаний (ИЦ ЭЦИ). Результаты оценки НДС приведены на рис. 4.

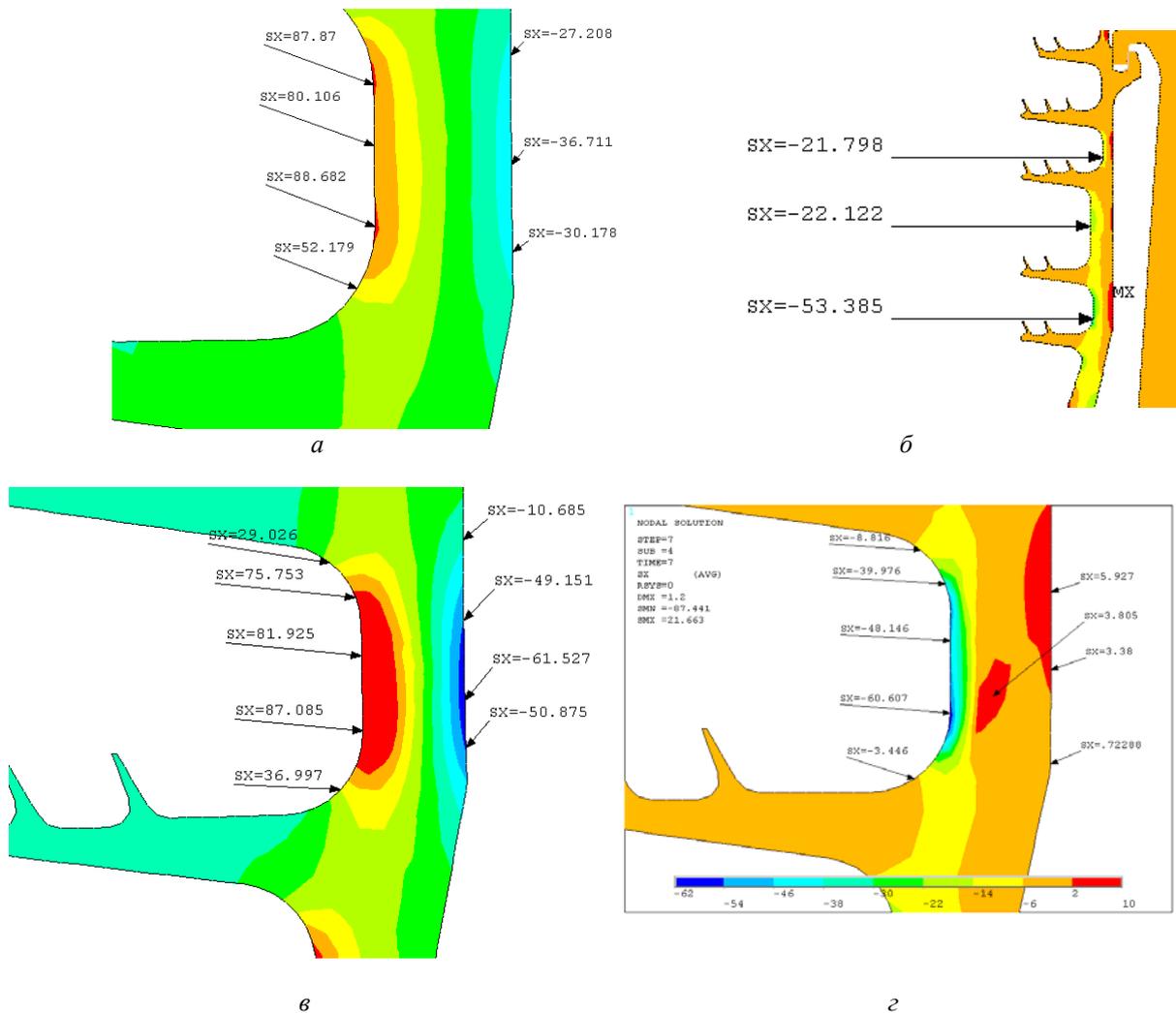


Рис. 4. НДС критической зоны дефлектора

(значения представлены в условных единицах, $\times 10$ для перевода в МПа):

- а – максимальное радиальное напряжение в ПЦ (начало тах режима);
- б – радиальное напряжение в дефлекторе после остановки двигателя (разгрузка);
- в – максимальное радиальное напряжение в ИЦ «нагрузка» (начало первой площадки тах режима);
- г – минимальное радиальное напряжение в ИЦ «разгрузка» (остановка двигателя между испытательными циклами)

Реверс упругой деформации в зоне дефекта практически полностью обусловлен наличием пластической деформации при нагружении. Пластические деформации приведены на рис. 5.

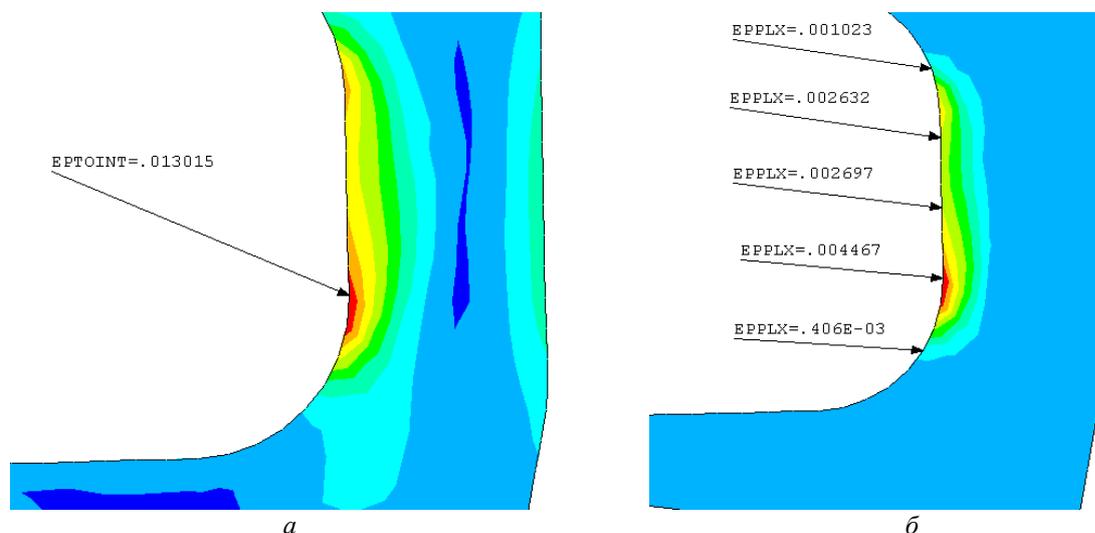


Рис. 5. Установившиеся пластические деформации:
 а – максимальная интенсивность полной деформации в ИЦ;
 б – максимальная радиальная пластическая деформация в ИЦ

Результаты оценки малоциклового усталости

Ниже приведены результаты оценки малоциклового усталости по четырём методикам.

Методика 1 (уравнение Мэнсона-Коффина). Исходные данные и результаты анализа для ТПЦ приведены в табл. 1. Исходные данные, а именно линейные деформации $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ и угловые деформации $\epsilon_{xy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{zy}$, для определения размаха полной пластической деформации $\Delta\epsilon_i$ получены из расчёта НДС.

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчёта эффективного размаха деформаций полного цикла нагружения

Компоненты	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_{xy}	ϵ_{xz}	ϵ_{zy}	$\Delta\epsilon_i$
max	0,528	0,034	0,197	0,09	0	0	0,62
min	-0,319	-0,015	0,168	0,0513	0	0	

Разрушающее количество полных (0-мах-0) циклов при ЭЦИ $N_{разр} = 2900$ ц.

Разрушающее количество элементарных (малый газ-мах-малый газ) циклов при ЭЦИ $N_{разр} = 125\ 500$ ц.

Коэффициент соответствия элементарных (малый газ-мах-малый газ) циклов $K_{эл} = 0,023$.

По результатам анализа расчётное значение допустимой наработки в полных циклах (запуск с выходом на максимальный режим с последующей остановкой и охлаждением) для дефлекторов составляет 580 циклов (запусков), коэффициент приведения элементарных циклов составляет $K_{эл} = 0,023$.

Методика 2 (гладкие образцы, симметричный цикл). Результаты приведены на рис. 6, где K_N – коэффициент запаса.

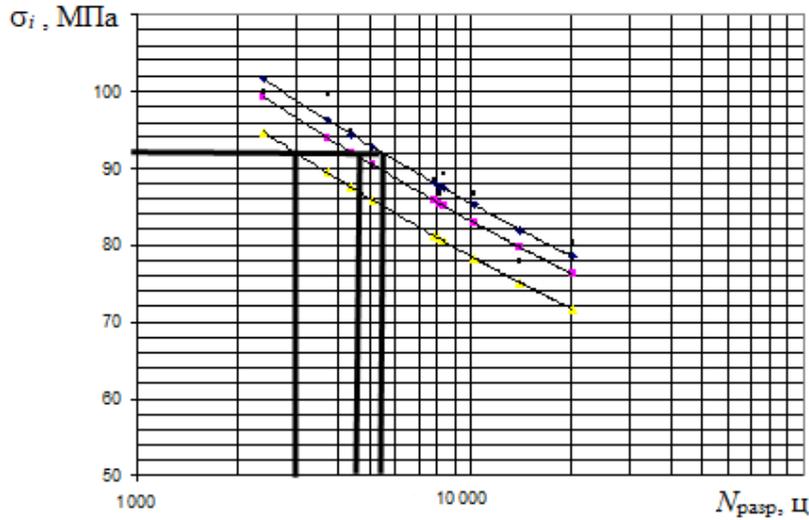


Рис. 6. Результаты анализа по кривым МЦУ для гладких образцов:
 $N_{разр} \approx 4600$ циклов, $N_{дон} \approx 920$ циклов (-1σ , $K_N = 5$)
 или $N_{разр} \approx 3000$ циклов, $N_{дон} \approx 600$ циклов (-3σ , $K_N = 5$)

При использовании «грубой» оценки циклической долговечности по кривым МЦУ гладких образцов и максимальному напряжению цикла расчётное значение допустимой наработки $N_{дон}$ в полных циклах (количестве запусков с выходом на максимальный режим) для дефлекторов составляет 600 циклов при $P = 0,995$.

Методика 3 (образцы с концентраторами, симметричный цикл). Результаты анализа с использованием кривых МЦУ в размахах эффективной деформации $\Delta\epsilon_i$ в зависимости от количества разрушающих циклов $N_{разр}$ при коэффициенте запаса $K_N = 5$ приведены на рис. 7.

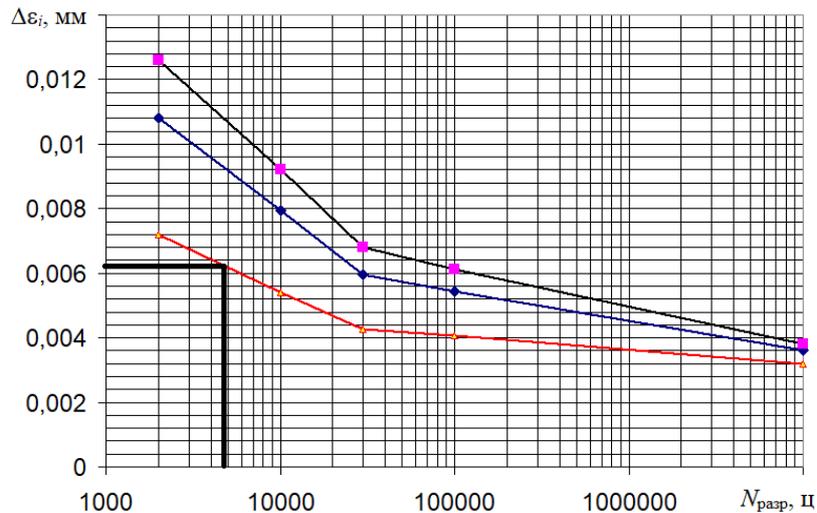


Рис. 7. Результаты анализа по кривым МЦУ в эффективных размахах деформации:
 $N_{разр} \approx 4800$ циклов, $N_{дон} \approx 960$ циклов ($P = 0,995$, $K_N = 5$)

По результатам анализа расчётное значение допустимой наработки $N_{доп}$ в полных циклах (количестве запусков с выходом на максимальный режим) для дефлекторов составляет 960 циклов (запусков).

Методика 4. Результаты анализа МЦУ с учётом асимметрии цикла напряжений приведены на рис. 8.

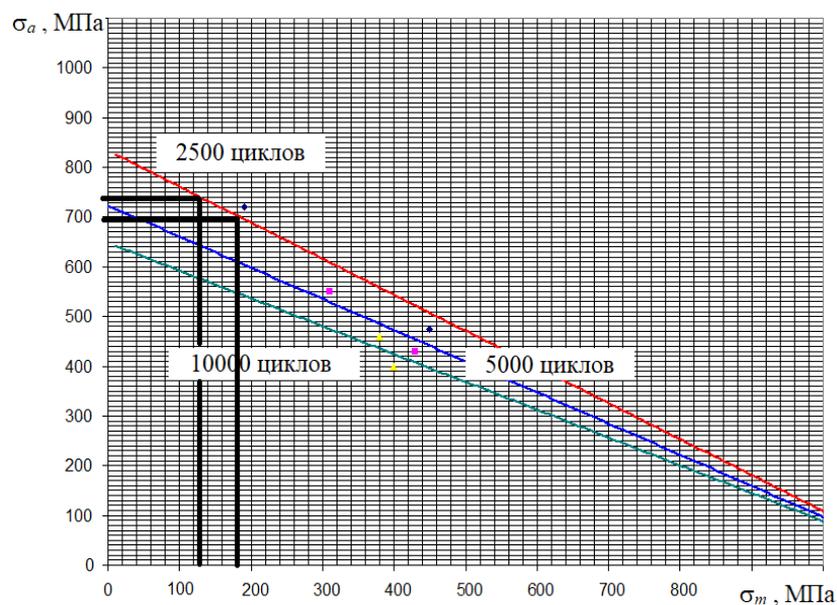


Рис. 8. Результаты анализа МЦУ с учётом асимметрии цикла:

$N_{разр} \approx 2600$ циклов, $N_{доп} \approx 520$ циклов ($P = 0,995$, $K_N = 5$) для полётного цикла;

$N_{разр} \approx 2500$ циклов, $N_{доп} \approx 500$ циклов ($P = 0,995$, $K_N = 5$) для испытательного цикла

При использовании поля характеристик постоянной разрушающей долговечности в координатах $\sigma_a \sigma_m$, построенного по результатам обработки данных МЦУ образцов с концентраторами напряжений, расчётное значение допустимой наработки $N_{доп}$ в полных циклах (количество запусков с выходом на максимальный режим) для дефлекторов составляет 520 циклов (запусков) при анализе по ТПЦ и 500 полных циклов при анализе испытательного цикла. Коэффициент соответствия испытательного цикла полётному составляет $k_c = 0,93$ (испытательный цикл «жестче» полётного).

Выводы

По результатам расчётного анализа при $P = 0,995$ и $K_N = 5$ в зависимости от метода оценки расчётная долговечность дефлектора без учёта технологического повреждения составила 580 полных циклов при использовании уравнения Мэнсона-Коффина (методика 1) и 520–960 полных циклов нагружения для трёх вариантов использования данных испытаний стандартных образцов (методики 2–4).

Оценка циклической долговечности на основе использования уравнения Мэнсона-Коффина (методика 1) для эксплуатируемой детали может быть использована только на этапе проектных работ, как и указано в [5].

Первые две расчётно-экспериментальные методики (методики 2, 3) могут применяться для «грубой» оценки циклической долговечности. Это связано со следующим.

В методике 2 используются кривые МЦУ, полученные на гладких образцах, и используются максимальные главные напряжения при отнулевом цикле изменения напряжений, что при наличии пластической деформации в первом цикле нагружения приводит к приближённым результатам. В методике 3 используются кривые МЦУ, полученные на образцах с концентратором, но отсутствует учёт изменения коэффициента асимметрии цикла деформирования в расчётном узле.

Методика оценки циклической долговечности с учётом влияния коэффициента асимметрии цикла (методика 4) даёт возможность определить разрушающую долговечность с наибольшей точностью, так как учитываются практически все факторы, влияющие на образец в процессе испытаний.

Библиографический список

1. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН-ЦИАМ, 2013. 515 с.
2. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
3. Иванов С.И. Определение остаточных напряжений в пластинках методом полосок // Сб. трудов «Вопросы прочности элементов авиационных конструкций». Вып. 48. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1971. С. 139-152.
4. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Бурак М.И., Даунис М.А., Зацаринный В.В., Злочевский А.Б., Каган В.А., Ларионов В.В., Левин О.А., Новиков В.А., Покровский В.В., Романов А.Н., Трощенко В.Т., Филатов В.М. Механика малоциклового разрушения. М.: Наука, 1986. 264 с.
5. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации. М.: ЦИАМ, 2004. 260 с.
6. Ануров Ю.М., Федорченко Д.Г. Основы обеспечения прочностной надёжности авиационных двигателей и силовых установок. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет, 2004. 390 с.
7. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
8. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982. 174 с.
9. ГОСТ 25.502-79. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Стандартиформ, 1983. 50 с.
10. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
11. Кудрявцев И.В., Наумченко Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.

METHODS OF EVALUATING LOW-CYCLE FATIGUE OF GAS TURBINE ENGINE PARTS EXEMPLIFIED BY A HIGH-PRESSURE TURBINE COVER PLATE

© 2018

E. E. Kocherova Postgraduate Student of the Department of Strength of Materials, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, kocherova_2020@mail.ru

This article presents an example of calculating the durability of a real part of a gas turbine engine. The part under examination had problems in its operation due to origination of cracks, exhaustion of load bearing capacity and non-localized fracture owing to crack development arising as a result of low-cyclic fatigue of material in the inter-labyrinth zone of the part. The part design analysis carried out with the use of engineering methods in conformity with the standard procedure accepted at the time of design did not presuppose any strength problems owing to low-cyclic fatigue. Mass manifestations of the defect “crack in the radius of the deflector flange center pilot transition” called for the necessity of evaluating the safety of subsequent use of products containing these parts before they reach the end of their assigned service life. Based on the results of metallurgical studies, a conclusion of the causes of defects was made and a complex of technological measures to prevent these defects in the future was proposed. Some methods of evaluating low-cyclic fatigue are presented in the article. They are widely used in engine design and development at the present time (in the absence of a data bank on the properties of materials under the “hard” loading cycle).

Gas turbine engine; turbine; cycle life; low-cycle fatigue; defect; life; design and development; fatigue cracks; stress-strained state; equivalent cyclic tests.

Citation: Kocherova E.E. Methods of evaluating low-cycle fatigue of gas turbine engine parts exemplified by a high-pressure turbine cover plate. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 61-71. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-61-71

References

1. Teren't'ev V.F., Petukhov A.N. *Ustalost' vysokoprochnykh metallicheskih materialov* [Fatigue of high-strength metallic materials]. Moscow: CIAM Publ., 2013. 515 p.
2. Parton V.Z., Borisovskiy V.G. *Dinamika khrupkogo razrusheniya* [Dynamics of brittle fracture]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 240 p.
3. Ivanov S.I. Opredelenie ostatochnykh napryazheniy v plastinkakh metodom polosok. *Sb. trudov «Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy»*. Vyp.48. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1971. P. 139-152. (In Russ.)
4. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Burak M.I., Daunis M.A., Zatsarini V.V., Zlochevsky A.B., Kagan V.A., Larionov V.V., Levin O.A., Novikov V.A., Pokrovsky V.V., Romanov A.N., Troschenko V.T., Filatov V.M. *Mekhanika malotsiklovogo razrusheniya* [Mechanics of Low-Cycle Fracture]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 264 p.
5. *Normy prochnosti aviatsionnykh gazoturbinykh dvigateley grazhdanskoj aviatsii* [Strength standards of aviation gas turbine engines of civil aviation]. Moscow: CIAM Publ., 2004. 260 p. (In Russ.)
6. Anurov U.M., Fedorchenko D.G. *Osnovy obespecheniya prochnostnoy nadezhnosti aviatsionnykh dvigateley i silovykh ustanovok* [The principles of ensuring the strength reliability of aircraft engines and power units]. St.-Peterburg: Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University Publ., 2004. 390 p.
7. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya, deformatsii, razrushenie* [Stresses, deformations, destruction]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1970. 229 p.
8. Kudryavtsev P.I. *Nerasprostranyayushchiesya ustalostnye treshchiny* [Nonpropagating fatigue cracks]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. 174 p.

9. GOST 25.502-79. Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing. Moscow: Standartinform Publ., 1983. 50 p. (In Russ.)

10. Makhutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost'* [Deformation fracture criteria and strength calculation of structural components]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 272 p.

11. Kudryavtsev I.V., Naumchenko N.E., Savvina N.M. *Ustalost' krupnykh detaley mashin* [Fatigue of large machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 240 p.