

УДК 004.65

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АВТОФРЕТИРОВАНИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДИСКА ТВД

К. Д. КАРИМБАЕВ<sup>1</sup>, А. Р. ЛЕПЕШКИН<sup>2</sup>, А. В. САЛЬНИКОВ<sup>3</sup>

<sup>2</sup>lepeshkin.ar@gmail.com, <sup>3</sup>salnikov@ciam.ru

<sup>1-3</sup> ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова»  
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

*Поступила в редакцию 30 июня 2015 г.*

**Аннотация.** Представлены результаты расчетных исследований операции автофретирования диска турбины высокого давления (ТВД) авиационного двигателя. Определено изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки по циклам во время автофретирования и при последующей эксплуатации и изменение НДС при эксплуатации без автофретирования. Сделан сравнительный анализ расчетной циклической долговечности заготовки в рабочих условиях с учетом предварительного автофретирования и без него. Результаты расчетных исследований показали, что операция автофретирования заготовки диска ТВД повышает его циклическую долговечность.

**Ключевые слова:** автофретирование; напряженно-деформированное состояние; циклическая долговечность; диск турбины; разгонный стенд.

### ВВЕДЕНИЕ

В результате необратимых процессов пластичности и ползучести деформация дисков может быть значительной и приводить к нежелательным явлениям – изменению зазоров в лабиринтных уплотнениях, задеванию лопаток за корпус и т.д. [1, 2]. Для того, чтобы при работе не менялись посадки и зазоры, а материал деформировался упруго, а также для повышения циклической долговечности дисков применяют технологические операции предварительной раскрутки заготовки диска – автофретирование.

В большинстве дисков современных турбин высокого давления материал в процессе эксплуатации испытывает пластические деформации. Чтобы во время эксплуатации материал деформировался упруго, в наиболее напряженных местах наводят остаточные деформации сжатия. Для этого заготовка диска раскручивается (обычно без лопаток) на разгонном стенде.

Если диск подвергнуть однократному воздействию центробежных сил при частоте вращения, несколько превышающей рабочую, то в наиболее нагруженной зоне диска вблизи внутренней поверхности ступицы напряжения превысят предел текучести материала и возникнут пластические деформации. Периферийная часть диска при этом остается упругой. Чем

больше частота вращения при автофретировании, тем больше зона и величина пластической деформации. После остановки диска напряжения снижаются, но не до нуля, как это было бы при упругом поведении материала. В диске возникают остаточные напряжения. После исчезновения центробежных сил оставшаяся упругой периферийная часть диска стремится вернуться к исходному размеру и сжимает ступичную часть. В результате после разгрузки в пластической зоне остаются окружные напряжения сжатия, а в прилегающих к ней слоях упругой части диска напряжения растяжения. Созданное таким образом благоприятное поле остаточных напряжений приводит к тому, что при последующем эксплуатационном нагружении диска его материал пластически больше не деформируется. Возникающие при нагружении в эксплуатации окружные напряжения растяжения суммируются с остаточными напряжениями сжатия, и суммарные напряжения уже не превосходят предел текучести.

### РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НДС В ПРОЦЕССЕ АВТОФРЕТИРОВАНИЯ ДИСКА ТВД

В данной работе диск раскручивался до частот вращения, превышающих на 10–25 % эксплуатационную. При этом в наиболее нагру-

женной зоне диска вблизи внутренней поверхности ступицы возникают напряжения, превышающие предел текучести материала, приводящие к пластической деформации. При останове наличие этих пластических деформаций приводит к появлению остаточных сжимающих напряжений, которые снижают значение коэффициента асимметрии цикла нагружения диска

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

в процессе эксплуатации. В наиболее опасной точке диска (там, где циклическая долговечность минимальна) рабочий цикл вместо пульсирующего ( $r = 0$ ) приближается к симметричному ( $r = -1$ ), что при постоянном размахе напряжений цикла  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  приводит к более высокой долговечности по малоцикловой усталости.

Автофретированию подвергаются заготовки дисков турбин высокого давления, которые при эксплуатации должны выдерживать нагрузку от лопаток при высоких скоростях вращения и при повышенных температурах.

Приводится расчетная оценка повышения малоцикловой долговечности первой ступени диска ТВД авиационного двигателя за счет автофретирования, проведенного на разгонном стенде ЦИАМ. Диск имеет рабочую частоту вращения 14000 об/мин. Расчетное сопровождение эксперимента проводилось с использованием конечно-элементного пакета программ ANSYS.

На рис. 1 изображена бронекamera стенда с горизонтальной осью вращения, на котором проводилось нагружение заготовки диска турбины высокого давления авиационного ГТД в процессе операции автофретирования.

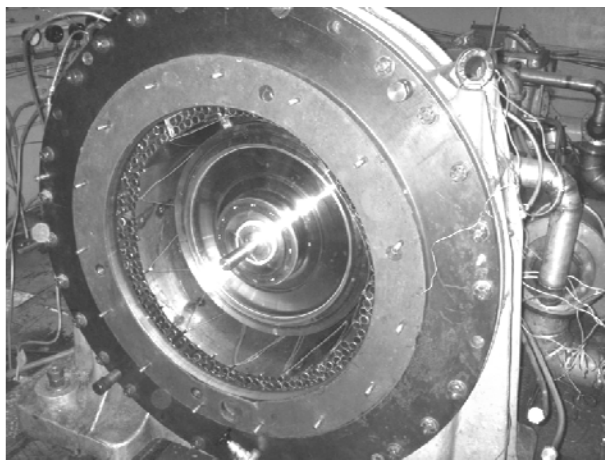


Рис. 1. Заготовка диска в бронекамере разгонного стенда, на котором проводилось автофретирование

Программа автофретирования состояла из 5 циклов нагружений с разгонами до максималь-

ных частот вращения до 14000, 15500, 16800, 17600 и 17600 об/мин в условиях пониженного давления воздуха в бронекамере на разгонном стенде. В процессе разгона заготовка диска нагревалась за счет трения о воздух в бронекамере. В связи с этим, после каждого нагружения и остановки диска замерялись значения температуры в области обода и полотна диска, которые составляли соответственно 43, 52, 78, 58 и 82 °С (на ободе) и 40, 44, 66, 54 и 76 °С (в зоне полотна). После окончания каждого нагружения заготовка снималась со стенда для замеров остаточных удлинений. После пятого цикла нагружения остаточное удлинение составляло 0,1 мм вблизи ступичной части диска.

Расчетная модель заготовки диска выбиралась следующим образом. В реальной заготовке отсутствовали пазы для установки лопаток, поэтому в районе выступов диск представляет из себя сплошное целое. В связи с этим, можно не использовать 3D-модель, а рассчитывать диск в 2D-осесимметричной постановке.

На рис. 2 представлена конечно-элементная модель испытываемой заготовки диска.

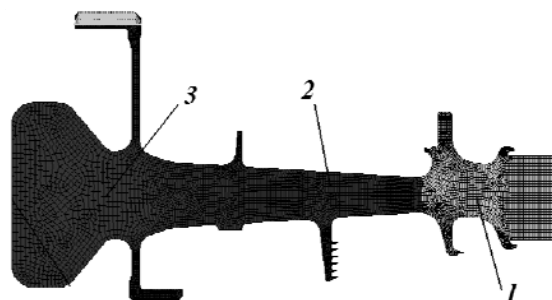


Рис. 2. Конечно-элементная модель диска: 1 – обод; 2 – полотно; 3 – ступица

Кривые деформирования материала заготовки получены из экспериментов на образцах, вырезанных из заготовки диска первой ступени ТВД данной партии. Эксперименты проводились отдельно для трех групп образцов: из обода (1), полотна (2) и ступицы (3) диска (рис. 2). Испытания образцов проводили Вильтер Н. П. и Волков М. Е. На основе полученных экспериментальных данных в используемой расчетной модели учитывалось неравномерное распределение свойств материалов по телу диска. Кривые деформирования материала получены при температурах 20, 300 и 500 °С. Расчеты проводились в упруго-пластической постановке с использованием теории деформационной пластичности.

Были проведены расчеты с предварительным автофретированием и без автофретирования

ния. В расчете с предварительным автофретированием моделировалось 5 этапов нагружений в процессе автофретирования, с дальнейшим циклированием по эксплуатационному циклу. Устойчивый цикл определен после получения результатов при 3-х последовательных циклах.

В расчете без автофретирования моделировался выход на максимальную частоту вращения без предварительного нагружения по программе автофретирования. Устойчивый цикл определен после получения результатов на 3-х циклах. Разница результатов по напряжениям и деформациям после 2-го цикла и 3-го меньше 1,5 %. В расчете принимались следующие предположения о тепловом состоянии детали. Перед выходом (начало нагружения) на рабочую частоту вращения и при остановке температура заготовки приравнивалась к 20 °С. На максимальной частоте вращения значение температуры в центре диска на двигателе принималась равной 350 °С, в ободке – 550 °С. Изменение температуры по радиусу диска при нагружении/разгрузке задавалось по линейному закону.

По результатам расчетов определено изменение напряженно-деформированного состояния диска по циклам во время автофретирования и при последующей эксплуатации и изменение НДС в условиях эксплуатации без автофретирования.

На рис. 3–5 показаны некоторые примеры расчетов. На рис. 3 представлены распределения окружных напряжений (а) и деформаций после 5-го цикла нагружения (соответствующему циклу на разгонном стенде) в процессе автофретирования. На рис. 4, 5 приведено распределение эквивалентных по Мизесу напряжений (на рабочей частоте вращения в условиях эксплуатации) с учетом (а) и без учета (б) автофретирования после 5 циклов нагружения.

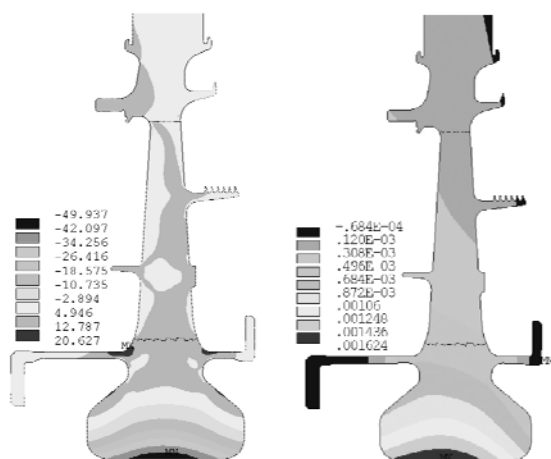


Рис. 3. Распределение окружных напряжений (а) и деформаций после 5-го цикла нагружения (остановки) при автофретировании

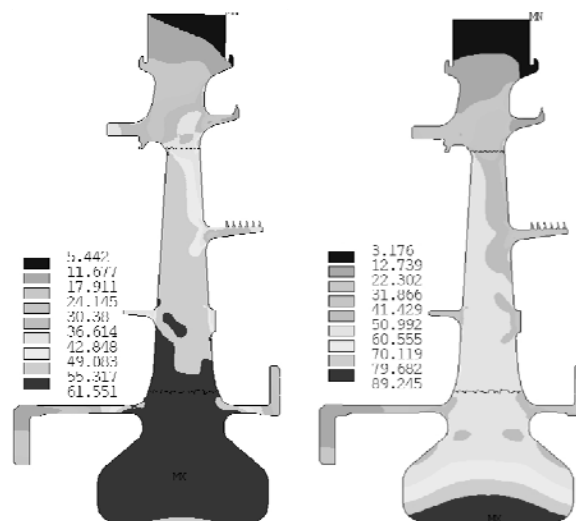


Рис. 4. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений (кгс/мм<sup>2</sup>) в условиях максимальной частоте вращения при эксплуатации в дисках, прошедших операцию автофретирования (а), и не подвергавшихся автофретированию (б)

Из анализа рис. 4 следует, что операция автофретирования значительно снизила напряжения в диске в условиях эксплуатации.

Проведен также сравнительный анализ расчетной циклической долговечности заготовки в рабочих условиях с учетом автофретирования и без него с использованием формулы Мэнсона.

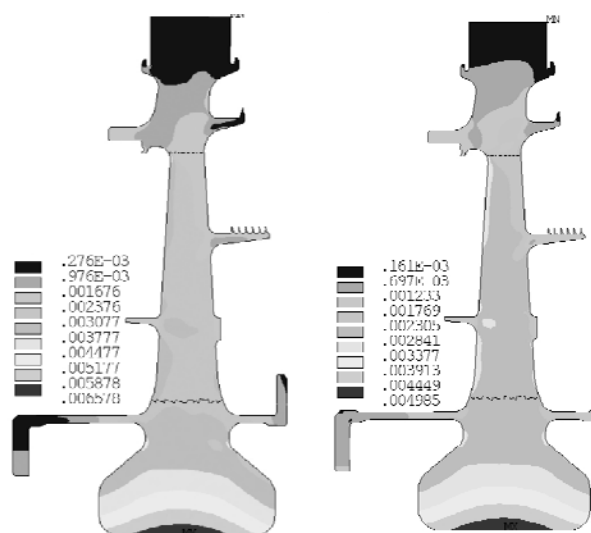


Рис. 5. Распределение эквивалентных по Мизесу деформаций с учетом (а) и без учета (б) автофретирования

Проведение автофретирования в диске ТВД приводит к тому, что при эксплуатации этот диск работает по устойчивому циклу с коэффициентом асимметрии  $r = -0,81$ . Без проведения автофретирования в диске ТВД изделия при эксплуатации этот диск работает по устойчивому циклу с коэффициентом  $r = -0,16$ .

Эффективность автофретирования оценивалась по точке с максимальным размахом деформаций в цикле. Автофретирование, проведенное по описанной выше программе, увеличивает расчетное значение долговечности по малоцикловой усталости рассматриваемого диска ТВД в 2,5 раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты расчетных исследований влияния автофретирования заготовки диска на циклическую долговечность диска ТВД авиационного двигателя.

Определено изменение напряженно-деформированного состояния диска по циклам во время автофретирования и при последующей эксплуатации и изменение НДС диска в процессе эксплуатации без предварительного автофретирования.

Проведен сравнительный анализ расчетной циклической долговечности диска в рабочих условиях с учетом предварительного автофретирования и без него.

Результаты расчетных исследований показали, что операция автофретирования заготовки диска ТВД повышает его циклическую долговечность в 2,5 раза.

Следует отметить, что частота вращения при автофретировании должна выбираться для каждого конкретного диска в зависимости от его материала и условий эксплуатации. На разгонном стенде рекомендуется проводить несколько нагружений заготовки диска для контроля ее остаточных удлинений в процессе автофретирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьянушко И. В., Биргер И. А. Расчет на прочность вращающихся дисков. М.: Машиностроение. 1978. 247 с. [ I. V. Demyanushko, I. A. Birger, *Strength analysis of rotating disks*, (in Russian), Moscow: Mashinostroyeniye. 1978. ]

2. Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. Газотурбинные двигатели. Т. 4. Пермь: ОАО «Авиадвигатель». 2006. [ A. A. Inozemtsev, V. L. Sandratsky, *Gas turbine engines*, (in Russian), Perm: Aviadvigatel OJSC. V. 4. 2006. ]

### ОБ АВТОРАХ

**КАРИМБАЕВ Камалиддин Джамолдинович**, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. механик (МГУ им. М. В. Ломоносова, 1977). Канд. техн. наук по динамике и прочности деталей авиационных двигателей (1985). Иссл. в области прочностной надежности турбомашин.

**ЛЕПЕШКИН Александр Роальдович**, нач. сектора ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. инженер энергетик (МЭИ, 1982). Д-р техн. наук (МЭИ, 2007). Иссл. в обл. проч-

ности дисков и др. деталей авиационных двигателей на разгонных и специальных стендах.

**САЛЬНИКОВ Антон Владелинович**, аспирант, ведущий инженер отделения прочности ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. инженер-исследователь (МЭИ (ТУ), 2008). Готовит дисс. о проблемах конструктивно-прочностной оптимизации деталей рабочих колес ГТД.

### METADATA

**Title:** The calculated investigation of influence of autofrettage on the cycle durability of HPT disc

**Authors:** K. D. Karimbaev<sup>1</sup>, A. R. Lepeshkin<sup>2</sup>, A. V. Salnikov<sup>3</sup>.

**Affiliation:**

<sup>1-3</sup>Central Institute of Aviation Engines (CIAM), Russia.

**Email:** <sup>2</sup>lepeskin@rtc.ciam.ru, <sup>3</sup>salnikov@ciam.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 3 (69), pp. 33-36, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The results of computational investigations of the autofrettage operation of the high pressure turbine disk (HPT) aircraft engine. The change in the stress-strain state (SSS) of the blank in cycles during autofrettage and subsequent operation and change at the operation without autofrettage. The comparative analysis of the calculated cycle life of a blank in working conditions taking into account prior autofrettage and without it. The results of computational investigations have shown that the autofrettage operation of the HPT disc blank increases its cycle durability.

**Key words:** autofrettage; stress-strain state, cycle durability; turbine disk; spin rig.

**About authors:**

**KARIMBAYEV, Kamaliddin Dzhamaldinovich**, Head of the FSUE "CIAM named after P.I. Baranov". Dipl. mechanic (Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 1977). Candidate of tehn. sciences on the dynamics and strength of aircraft engine parts (1985). Investigations of the integrity reliability of turbomachinery.

**LEPESHKIN, Alexander Roaldovich**, Chief of a sector of the FSUE "CIAM named after P.I. Baranov". Dipl. engineer power industry (MPEI, 1982). Dr. of tehn. sciences (MPEI, 2007). Investigations of the integrity of the disks and aircraft engine parts on the spin and special rigs.

**SALNIKOV, Anton Vladelinovich**, Postgrad. (PhD), Lead engineer of the FSUE "CIAM named after P.I. Baranov". Stress analyst Optimized solutions. Engineer-researcher (MPEI, 2008).