

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРИ НАТЯГА ПО КОНТАКТНЫМ ГРЯНЯМ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК И ОСТАТОЧНОГО РАЗВОРОТА ЛОПАТОК С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

*Р.П. Придорожный, инженер-конструктор,*

*ГП ЗМКБ “Прогресс” им. А.Г. Ивченко, г. Запорожье, Украина*

Проектирование газотурбинных двигателей с расчетом на высокие температуры потребовало разработки новых материалов, обладающих высоким сопротивлением статическим и динамическим нагрузкам при высоких температурах, тщательного изучения влияния повышенной температуры на физико-механические свойства материалов и разработки новых методов расчета и оценки прочности горячих деталей двигателя, учитывающих такое специфическое явление, как ползучесть.

Непосредственным следствием действия повышенных температур (1173...1373 К) является ползучесть материала, развивающаяся даже при умеренных напряжениях, которые при кратковременном деформировании вызывают лишь упругую деформацию. Сопротивление материалов ползучести может во многих случаях являться наиболее полной и удобной характеристикой их работоспособности. Развивающаяся во времени ползучесть материала приводит с течением времени к значительному перераспределению напряжений как от внешних, так и от термических нагрузок. При этом температурные напряжения, как внутренне уравновешенные, уменьшаются во всем объеме, стремясь постепенно к полному исчезновению, а напряжения от внешних нагрузок уменьшаются в наиболее нагретых объемах и по условиям равновесия возрастают в менее нагретых.

Следствием этого явления является уменьшение натяга по контактными граням бандажных полок турбинных лопаток, остаточный разворот лопаток, что в конечном итоге может привести к увеличению вибраций и преждевременному износу контактных граней бандажных полок. Поэтому целью данной работы является попытка спрогнозировать потерю натяга, величину остаточного разворота лопатки в соответствии с накоп-

ленной остаточной деформацией ползучести.

Нужно отметить, что на двигателе мы имеем дело с циклической ползучестью и изменение скорости ползучести при циклических нагревах и нагрузках зависит от частоты циклов и относительного времени действия максимальной нагрузки и температуры. В значительной мере сопротивление материалов действию циклических нагревов и нагрузок в большей степени зависит от пластических свойств материала: чем выше пластичность, тем меньше повреждающее действие циклов [1]. Данные проведенных исследований [2] процесса ползучести для материала ЖС26 в пределах исследуемого диапазона температур говорят о том, что действие повторных нагрузок не приводит к ускорению ползучести. Исходя из этого дальнейшие расчеты проводились на основании данных о процессе ползучести при стационарном нагружении.

Обычно различают три стадии ползучести: начальную стадию с уменьшающейся скоростью ползучести, последующую стадию с постоянной скоростью и конечную область с возрастающей до разрушения скоростью ползучести [31]. Поскольку работа лопаток на третьей стадии ползучести не допускается, а продолжительность первой неустановившейся стадии ползучести пренебрежимо мала по сравнению с общей продолжительностью работы конструкции, то при постоянных внешних нагрузках и температуре, начиная с некоторого момента, деформация ползучести протекает с постоянной скоростью (установившаяся стадия ползучести). В данной работе для описания процесса ползучести согласно многим исследованиям [4, 5] было использовано уравнение, описывающее скорость установившейся ползучести в зависимости от напряжений и температуры:

$$\dot{\epsilon}_c = a \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{c}{T}\right),$$

где  $\sigma$  - напряжение;

$T$  – температура;

$a, n, c$  – коэффициенты, определяемые при обработке результатов испытаний.

В качестве тестового примера был проведен расчет на ползучесть стандартного образца (рис. 1), предназначенного для проведения испытаний по определению предела ползучести (согласно ГОСТ 3248-81), в трехмерной постановке с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

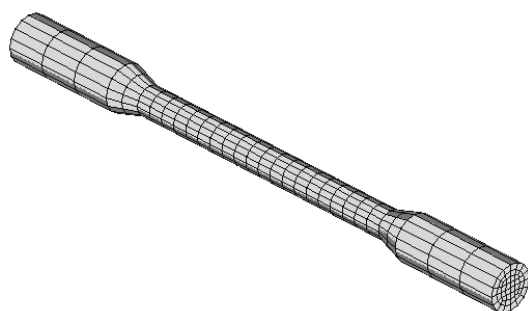


Рис. 1. Стандартный образец

Физико-механические свойства взяты из сертификата на материал ЖС-26 для  $\sigma_{0,5/t}$  (где  $t$  – время испытаний). Данные расчетов и накопленная деформация ползучести представлены в табл. 1.

Расхождение между испытаниями и расчетом не превышает 3% для данного промежутка времени и температур. Данный диапазон напряжений, времени, температуры и накопленной деформации ползучести соответствует рабочему диапазону рабочей лопатки турбины низкого давления на режиме “взлет”.

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{ч}$	$\sigma, \text{МПа}$	Метод	$\epsilon_c$
900	100	330	испытание	0,005
			расчет	0,005135
	500	260	испытание	0,005
			расчет	0,005116
1000	100	155	испытание	0,005
			расчет	0,005049
	500	95	испытание	0,005
			расчет	0,005045

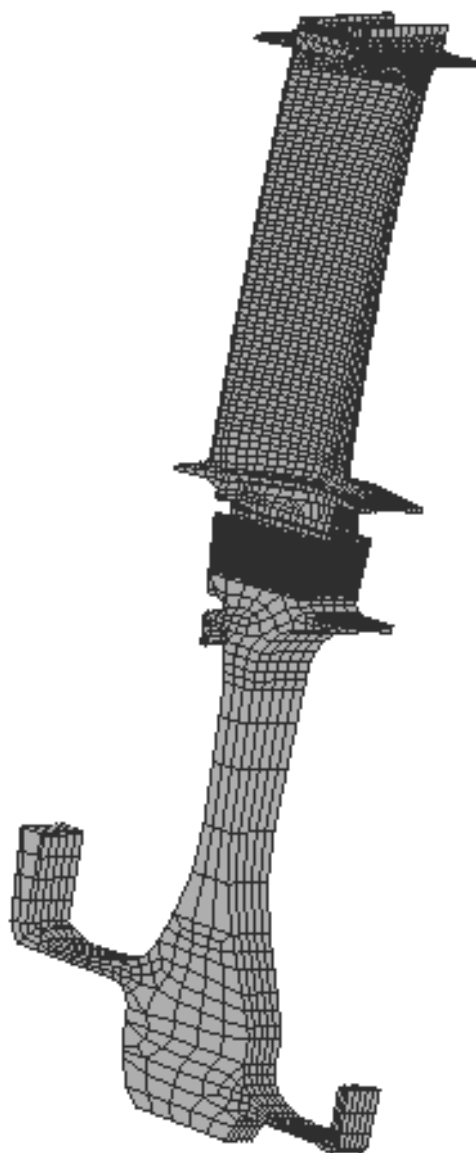


Рис. 2. Объемная конечно-элементная модель

В настоящей работе объектом исследования послужила неохлаждаемая рабочая лопатка турбины низкого давления. Трехмерная модель и МКЭ позволяют моделировать контактное взаимодействие бандажных полок между собой (с учетом предварительного натяга) и в замковом соединении, рассчитывать усилия в зонах контакта и определять напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции в любой момент времени. Поскольку конструкция циклосимметрична, моделировалась только одна контактная пара – трехмерная модель лопатки с сектором диска (рис. 2), а зоны контактов моделировались с помощью контактных элементов. Закрепление в осевом направлении проводилось по заднему фланцу.

Расчеты проводились с учетом распределения температур, газовых и центробежных сил. Построенная модель позволяет проводить расчеты с учетом пластичности и ползучести материала. Учитывая, что накопление деформаций ползучести происходит главным образом на взлетном режиме, расчеты проводились на режиме “взлет”.

Для того чтобы оценить влияние температуры и времени на НДС лопатки, величину натяга по контактным граням бандажных полок и величину остаточного разворота, проведены расчеты с различной температурой газа перед турбиной и на различную длительность взлетного режима.

На рис. 3 представлено распределение деформаций ползучести при температуре газа перед турбиной  $T_r=1540$  К и времени  $t=500$  ч. Из рисунка видно, что наибольшие деформации ползучести наблюдаются в районе среднего сечения, где температура лопатки максимальна.

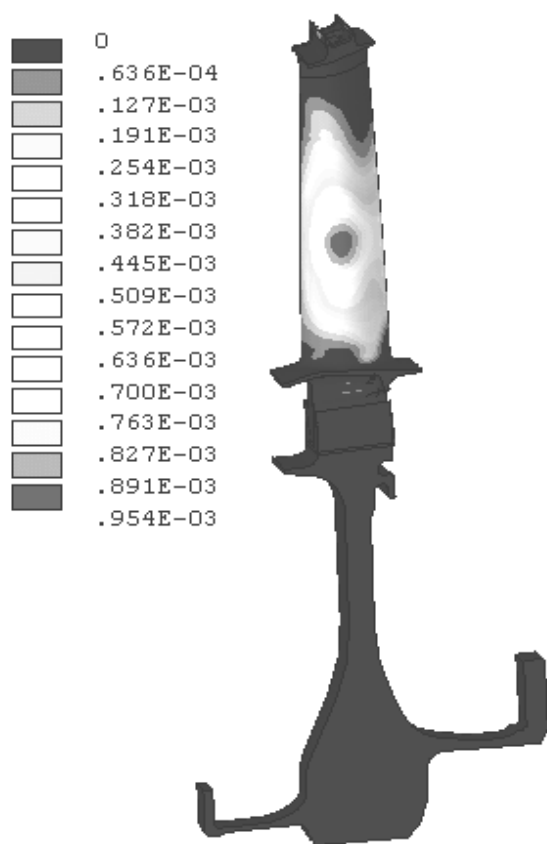


Рис. 3. Распределение деформаций ползучести

Изменение максимального значения деформации ползучести в зависимости от температуры газа и времени показано на рис. 4.

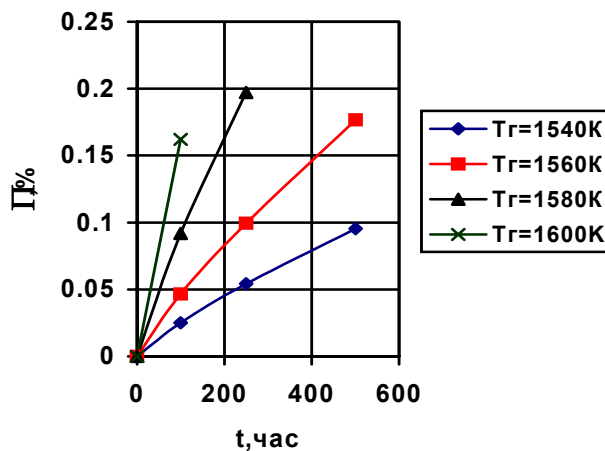


Рис. 4. Изменение максимального значения деформации ползучести в зависимости от температуры газа и времени

Увеличение температуры газа с 1540 до 1600 К приведет к увеличению скорости деформации ползучести в 6.5 раза. Аналогичным образом происходит изменение величины остаточного разворота (рис. 5).

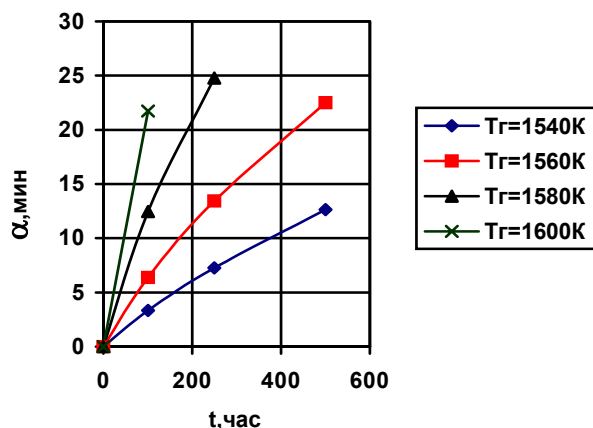


Рис. 5. Изменение величины остаточного разворота

Так, если при температуре газа 1540 К за 500 часов взлетного режима остаточный разворот достигает 12.7 минут, то при температуре газа 1600 К эта величина остаточного разворота будет достигнута за

50 часов. Характер падения натяга по контактным граням бандажных полок в результате ползучести материала представлена на рис. 6.

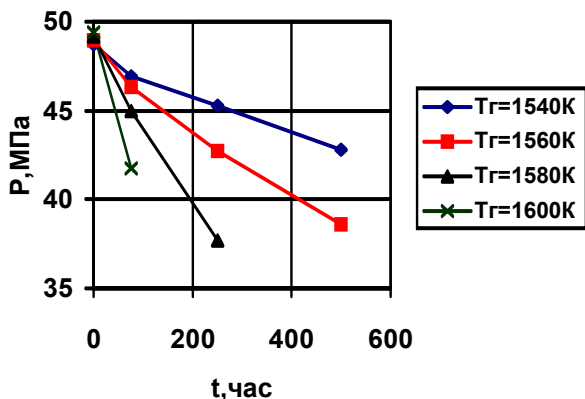


Рис. 6. Падения натяга по контактным граням бандажных полок

Как уже отмечалось, скорость падения натяга в значительной мере зависит от температуры лопатки.

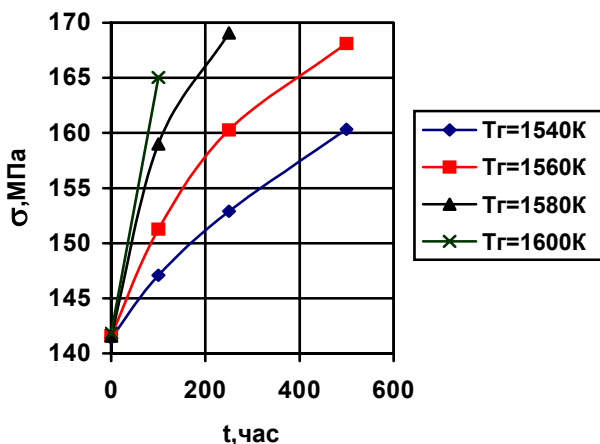


Рис. 7. Изменение напряжений на входной кромке среднего сечения

Далее представлены результаты влияния процесса ползучести материала на напряженность пера лопатки (в характерных точках) в зависимости от температуры и времени. На рис. 7, 8 показано, как изменяется уровень напряжений на входной и выходной кромке среднего сечения.

В процессе развития пластической деформации наблюдается перераспределение напряжений по сечению – на входной кромке происходит увеличение напряжений, а на выходной - уменьшение. Для корыта

(рис. 9) и спинки корневого сечения характерно уменьшение напряженности.

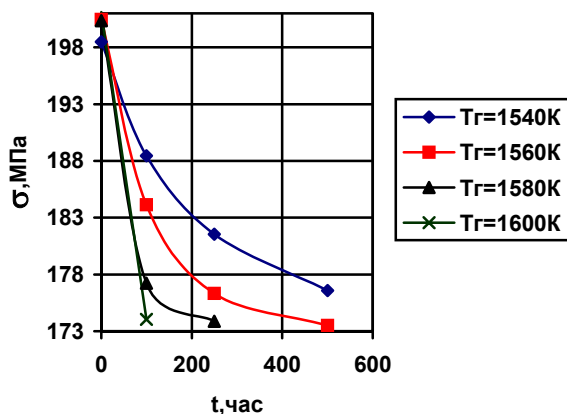


Рис. 8. Изменение напряжений на выходной кромке среднего сечения

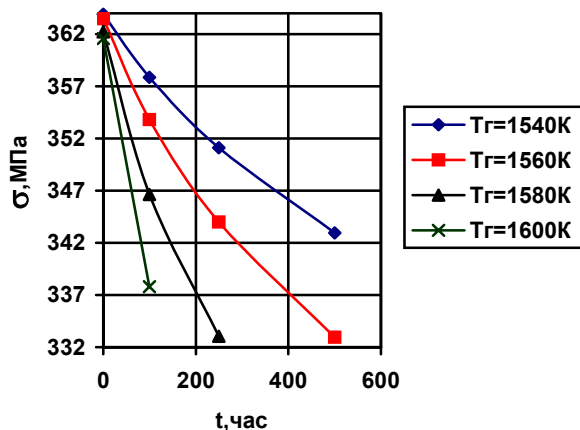


Рис. 9. Изменение напряжений на корыте корневого сечения

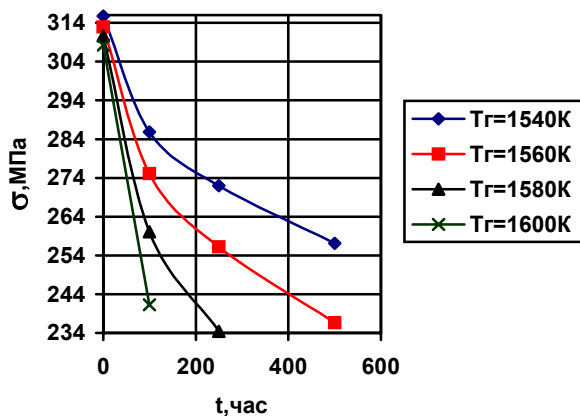


Рис. 10. Изменение напряжений на входной кромке периферийного сечения

Особенно велико влияние ползучести на входную кромку периферийного сечения (рис. 10), там происходит значительное изменение напряжений при температуре газа 1540 К, которое составляет до 23% за 500 ч взлетного режима.

Аналогично происходит изменение остаточных напряжений в лопатке. На входной кромке среднего сечения – это остаточные напряжения растяжения. А на выходной кромке среднего сечения, корыте и спинке среднего и корневого сечения, входной кромке периферийного сечения – это остаточные напряжения сжатия. Их величина в исследуемом диапазоне температур и времени в пере лопатки не превышает 50 МПа.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что возникновение остаточного разворота в рабочих лопатках турбины в условиях эксплуатации вызвано действием повышенных температур и высоких статических нагрузок.

2. Причиной возникновения остаточного разворота являются возникающие в процессе эксплуатации деформации ползучести.

3. Наибольшие деформации ползучести наблюдаются в районе среднего сечения, где действуют максимальные температуры.

4. Увеличение температуры газа приводит к значительному увеличению скорости деформации ползучести и как следствие увеличению значения накопленной деформации ползучести, увеличению величины остаточного разворота и падению натяга по контактными граням бандажных полок. Кроме того увеличивается область, где возникают деформации ползучести, но качественный характер распределения деформаций ползучести не изменяется.

5. Закономерности изменения максимального значения деформации ползучести, остаточного разворота, натяга по контактными граням бандажных

полок в зависимости от изменения температуры газа и времени носят аналогичный характер.

6. В рамках построенной модели показано, как возникающие в процессе эксплуатации деформации ползучести приводят к значительному перераспределению и изменению уровня напряжений в лопатке.

7. Показана возможность прогнозирования величины остаточного разворота и потери натяга по контактными граням бандажных полок в зависимости от изменения температуры газа и времени.

### Литература

1. Биргер И.А., Шор Б.Ф., Демьянушко И.В. Термопрочность деталей машин.- М.: Машиностроение, 1975.– 455 с.

2. Сизова Р.Н., Демидов А.Г., Минова Н.И. Длительная прочность и ползучесть сплавов для лопаток и дисков турбин при сжатии и реверсивном нагружении.– М.: ЦИАМ, 1989.- 55 с. (Тр. ЦИАМ.- Вып. 11401).

3. Шорр Б.Ф., Дульнев Р.А. Несущая способность элементов машин, работающих при повышенных температурах.- М.: Машиностроение, 1968.– 104 с.

4. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Г. Троценко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало, Г.В. Степанов, В.В. Кривенюк.– К.: Логос, 2000.– 571 с.

5. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов.- М.: Машиностроение, 1998.– 464 с.

*Поступила в редакцию 22.05.03*

**Рецензенты:** Гл. констр. Л.И. Мартыненко, ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, г. Запорожье; д-р. техн. наук. профессор С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.