МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского

«Харьковский авиационный институт»

С.В. Епифанов, Д.Ф. Симбирский, Е.В. Марценюк

ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС ДЕТАЛЕЙ  
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Лабораторный практикум

Харьков «ХАИ» 2017

# УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

***ГТД*** – газотурбинный двигатель;

***МЦУ*** – малоцикловая усталость;

***НДС*** – напряженно-деформированное состояние;

***ПЦ*** – полетный цикл

***ДП*** – длительная прочность;

***ОПЦ*** – обобщенный полетный цикл;

***max*** – максимальный;

***min*** – минимальный;

***вибр*** – вибрации;

***взл*** – взлетный;

***крейс*** – крейсерский;

***МГ*** – малый газ;

***расч*** – расчетное значение;

**Δ** – прирост, или размах;

***ασ*** – коэффициент концентрации напряжений;

***δ*** – относительное удлинение;

***ε*** – деформация;

***ε0*** – начальная деформация;

***εс*** – деформация ползучести;

***εp*** – пластическая деформация;

***εа*** – амплитуда деформаций при циклическом нагружении;

***εэ*** – эквивалентная деформация;

***εост*** – остаточная деформация;

***εк*** – истинная деформация в момент разрушения;

***εу*** – упругая деформация;

***εусл*** – условная упругая деформация;

***θ*** – угловая координата точек границ трещины;

***μ*** – коэффициент Пуассона;

***μ\**** – коэффициент Пуассона, соответствующий упругопластическому деформированию несжимаемого материала;

***σ*** – напряжение;

***σ0*** – начальное напряжение;

***σ0,2*** – условный предел текучести;

***σ–1*** – предел выносливости для базового числа циклов ***N0***;

***σθ*** – нормальное окружное напряжение;

***σi*** – интенсивность напряжений;

***σm*** – среднее напряжение в цикле нагружения;

***σr*** – нормальное радиальное напряжение;

***σа*** – амплитуда напряжения при циклическом нагружении;

***σв*** – предел прочности;

***σэ*** – эквивалентное напряжение;

***σлин*** – условное упругое эквивалентное напряжение;

***σу*** – предел упругости;

***σпц*** – предел пропорциональности;

***σрл*** – контурная нагрузка на диск от лопаточного венца;

***σТ*** – предел текучести;

***σдл*** – предел длительной прочности;

***τ*** – касательное напряжение;

***ψ*** – относительное сужение поперечного сечения;

***А***, ***m*** – параметры модели длительной прочности;

***a*** – полудлина трещины;

***a0*** – начальный размер трещины;

***ai*** – коэффициенты полинома;

***aкр*** – критическая полудлины трещины;

***B***, ***n*** – параметры модели Нортона;

***С*** – коэффициент модели Ларсона-Миллера;

***С0***, ***n*** – параметры уравнения Пэриса;

***С2***, ***т2*** – параметры модели малоцикловой усталости;

***D*** – среднеквадратическое отклонение;

***E*** – модуль упругости;

***Ес*** – секущий модуль;

***F0*** – начальная площадь сечения;

***Fк*** – конечная площадь сечения;

***f*** – собственная частота колебаний;

***K*** – коэффициент интенсивности напряжений;

 – вязкость разрушения при температуре ***Т*** или предельное значение коэффициента интенсивности напряжений ***K1***

[***K***] – нормированное значение коэффициента запаса прочности;

***KΔε*** – коэффициент запаса прочности по критерию малоцикловой усталости;

***Kσ*** – коэффициент запаса прочности по критерию длительной прочности;

***KN*** – коэффициент запаса долговечности по критерию малоцикловой усталости;

***Kt*** – коэффициент запаса долговечности по критерию длительной прочности;

***l*** – длина;

***l0*** – длина до деформации;

***lк*** – суммарная (конечная) длина;

***М*** – функция формы и расположения трещины;

***N*** – количество циклов нагружения;

***N0*** – базовое число циклов на кривой выносливости материала;

***Nэ*** – количество эквивалентных циклов нагружения;

***Nэ р*** – количество эквивалентных циклов нагружения до разрушения;

***Nкр вибр***– количество виброциклов до появления трещины критического размера;

***Nр*** – количество циклов нагружения до разрушения;

***nвзл***, ***nкрейс***, ***nМГ*** – частота вращения ротора ГТД на соответствующем режиме его работы;

***Р*** – сила;

***Pл–м*** – параметр Ларсона-Миллера;

***R0***, ***Rк*** – внутренний радиус ступицы и внешний радиус обода диска соответственно;

***RМЦУ Δε*** – ресурс по малоцикловой усталости, установленный по нормированному запасу прочности;

***RМЦУ N*** – ресурс по малоцикловой усталости, установленный по нормированному запасу долговечности;

***RДП σ*** – ресурс по длительной прочности, установленный по нормированному запасу длительной прочности;

***RДП t*** – ресурс по длительной прочности, установленный по нормированному запасу долговечности;

***r*** – коэффициент асимметрии цикла нагружения;

***Sк*** – истинный предел прочности;

***Т*** – температура;

 – относительное время до разрушения;

***t*** – время;

***tэ*** – время эквивалентного установившегося режима нагружения;

***tр*** – время до разрушения;

***tр э*** – время до разрушения на эквивалентном установившемся режиме нагружения;

***tОПЦ*** – длительность обобщенного полетного цикла;

***Vc*** – скорость ползучести;

***ПМЦУ*** – повреждение по малоцикловой усталости;

***ПМЦУ Σ*** – суммарное повреждение по малоцикловой усталости, накопленное за весь ресурс;

***ПМЦУ ОПЦ*** – повреждение по малоцикловой усталости, накопленное за один обобщенный полетный цикл;

***ПДП*** – повреждение по длительной прочности;

***ПДП Σ*** – суммарное повреждение по длительной прочности, накопленное за весь ресурс;

***ПДП ОПЦ*** – повреждение по длительной прочности, накопленное за один обобщенный полетный цикл;

# ВВЕДЕНИЕ

Ответственные элементы многих современных машин и аппаратов подвергаются при эксплуатации интенсивным воздействиям переменных (часто циклических) температурных и механических нагрузок. Число циклов за срок службы может быть невелико (до 5·104), и тогда долговечность лимитируется условиями малоциклового разрушения. При чередовании переходных режимов работы, для которых характерно быстрое изменение нагрузок и температур, со стационарными режимами, для которых характерно длительное статическое нагружение деталей, существенное влияние на процессы деформирования и разрушения оказывает ползучесть. В таких условиях работает разнообразное технологическое оборудование металлургической и химической промышленности (засыпные устройства и колосники печей, кристаллизаторы, валки прокатных станов и машин для непрерывного литья заготовок, чаши, химические реакторы и др.), а также элементы газовых и паровых турбин (диски, лопатки, камеры сгорания), космических аппаратов и сверхзвуковых самолетов, активной зоны ядерных реакторов. Обеспечение их прочности и долговечности — сложная научно-техническая проблема, актуальность которой возрастает в связи с непрерывным повышением требований к технико-экономическим показателям и надежности машин и аппаратов.

В данном учебном пособии представлен цикл лабораторных работ, предназначенных для усвоения основ анализа ресурса деталей, работающих в условиях длительного статического нагружения и переменных нагрузок, действие которых в условиях высоких температур и приводит к образованию и росту трещин, вызывает пластическое деформирование и развитие малоцикловой усталости.

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

***Цель работы***

Целью настоящей работы является получение навыков построения моделей длительной прочности высокотемпературных конструкционных материалов по экспериментальным данным, а также использование этих моделей для оценки запасов прочности и долговечности.

* 1. **Основные теоретические положения**

С повышением температуры механические свойства материалов изменяются: пределы прочности, пропорциональности и текучести, а также модуль упругости убывают; пластичность обычно увеличивается, но при некоторых температурах она может и понижаться.

Для большинства конструкционных материалов при нормальной температуре статическая прочность практически не зависит от времени приложения нагрузки. При повышенных температурах, а для некоторых материалов (например, полимеров) даже при нормальной, статическая прочность зависит от длительности нагружения, так как с течением времени могут меняться механические свойства материала, размеры детали и распределение в ней напряжений. Поэтому при высоких температурах определяют не только обычные механические характеристики материала при кратковременных испытаниях, но и характеристики при продолжительной работе. Прочность материала в этом случае называют **длительной прочностью**.

Напряжение, при котором образец, нагретый до температуры ***Т***, разрушается не ранее заданного времени ***tр***, называют **пределом длительной прочности *σдл***.

Длительная прочность проявляется у углеродистых сталей при ***Т***>300°С, у легированных сталей при ***Т***>350°С, у алюминиевых сплавов — при ***Т***>100°С.

В основу определения количественных связей между пределом длительной прочности материала ***σдл***, температурой ***Т*** и временем до разрушения ***tp*** положены экспериментальные данные испытаний образцов материала при одноосном растяжении или сжатии. Эти данные обобщаются путем построения моделей длительной прочности, из которых наиболее используемыми являются так называемые «кривые длительной прочности» и модели Ларсона-Миллера.

* + 1. **Модель «кривые длительной прочности»**

При достаточном количестве экспериментальных точек {***σдл***; ***T***; ***tр***} может быть построена модель **«кривые длительной прочности»,** которая описывается следующей зависимостью:

,

где  и  – определяемые по экспериментальным данным параметры, существенно зависящие от температуры ***T***.

При неизменной температуре материала параметры модели остаются постоянными, т.е. ***m(T) =* const**, ***A(T) =* const** при ***T =* const**. Чем выше температура, тем меньше показатель степени ***m*** и тем быстрее убывает по времени предел длительной прочности.

Зависимость может быть преобразована к виду

.

В двойных логарифмических координатах (**lg*tр***; **lg*σдл***) зависимость в определенных пределах имеет вид отрезка прямой линии (рис. 1.1). Чем выше температура, тем меньше показатель степени ***m*** и тем быстрее убывает по времени предел длительной прочности.

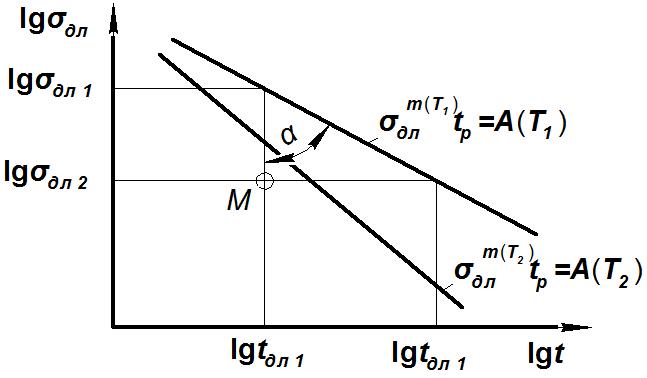


Рис 1.1. Кривые длительной прочности при различных   
постоянных температурах (**Т2 > Т1**)

Из уравнения можно определить величину предела прочности ***σдл(T, tр)***, если задать значения ***T*** и ***tр***, или же найти время до разрушения ***tр(σ,*** ***T)*** при известных уровнях напряжений ***σ*** и температуры ***T***.

Каждому из двух отрезков кривых длительной прочности при постоянной температуре ***T*** соответствуют свои значения параметров ***m(T)*** и ***A(T)***.

* + 1. **Оценка параметров кривых длительной прочности**

Из построенной указанным выше образом модели Ларсона-Миллера , задаваясь значениями температуры ***T***, можно получить графическую форму **модели «кривые длительной прочности»** (рис. 1.1) любой степени дискретности по ***T***.

Однако, как указано выше, область ее существования не должна выходить за экспериментально реализованные диапазоны значений ***Т*** и ***tp***.

Из модели «кривые длительной прочности» можно определить параметры ***m(T)*** и **lg*A(T)*** ее алгебраической формы , если задаться значениями температуры ***T***. Тогда в практически актуальном диапазоне изменения **lg*tр*** от 1 до 4 (то есть времени работы ***tр*** от 10 до 10000 часов) модель выражается прямой линией, проходящей через две точки с координатами **(lg*tр 1***; **lg*σдл 1*)** и **(lg*tр 2***; **lg*σдл 2*)**. Таким образом, при условии постоянства параметра ***А*** при заданной постоянной температуре ***Т*** можно найти значения постоянных ***m*** и **lg*А***:

.

откуда

 .



* + 1. **Связь между запасами прочности и долговечности**

Из двух параметров, входящих в рассмотренную модель длительной прочности, особо важную роль играет параметр ***m*(*T*)**:

– во-первых, ***m*(*T*)** вместе с ***A*(*T*)** определяет кривые длительной прочности для заданных ***T***;

– во-вторых, ***m*(*T*)** позволяет, как это указано в курсе лекций, установить важную для практики связь между запасами длительной прочности  и долговечности , которая выражается зависимостью

 .

В графической форме смысл коэффициентов запасов прочности и долговечности и связи между ними поясняется на рис. 1.2.

Рис. 1.2. Связь между пределом длительной прочности и временем до разрушения

**lg*σдл***

***T=const***

**lg*t***

**lg*tр***

***t***

***σ***

**lg*σ***

* + 1. **Модель Ларсона-Миллера**

Модель «кривые длительной прочности» является функцией двух аргументов (времени ***t*** и температуры ***Т***). Попытки исследователей сформировать модель с одним аргументом, таким, чтобы его связь с температурой и временем до разрушения имела универсальный характер для всех материалов, привели к использованию таких параметров, как параметр Ларсона-Миллера, Шерби-Дорна, Мэнсона-Саккопа (или Клауса), Мэнсона-Хеферда. Все эти параметры включают в себя время до разрушения и температуру, а также некоторые постоянные. Анализ показал, что отклонения предложенных критериев от опытных данных составляют от ±5 до ±10,5%, при этом наибольшую точность имеет критерий Мэнсона-Саккопа.

Широкое применение на практике получила модель Ларсона-Миллера

,

где параметр Ларсона-Миллера ***PЛ–М*** определяется выражением

.

Здесь ***С*** – постоянная величина, зависящая от материала и определяемая из эксперимента, а размерности температуры ***Т*** и времени до разрушения ***tр*** принимаются в виде *К* и *час* соответственно.

Из технической литературы известно, что для большинства конструкционных материалов 15<***C***<30. В частности, для материалов турбин и камер сгорания авиационных ГТД параметр ***С*** обычно изменяется в пределах от 15 до 20.

Следует иметь в виду, что приведенные модели длительной прочности с уверенностью могут быть использованы только в экспериментально реализованном диапазоне ***σдл***, ***Т*** и ***tp***. Лишь в отдельных случаях допускается экстраполяция по ***tp*** на ±1 порядок.

Вид зависимости предела длительной прочности от параметра Ларсона-Миллера представлен на рис. 1.3.

Рис. 1.3. Графическая форма модели Ларсона-Миллера:   
точки – экспериментальные данные; сплошная линия – результат аппроксимации

Модель Ларсона-Миллера может быть аппроксимирована полиномом второй (при необходимости третьей) степени и представлена в следующей алгебраической форме:

 ,

где ***ai*** – коэффициенты полинома, рассчитываемые по экспериментальным данным.

* 1. **Задачи работы**

К выполнению предлагаются следующие задачи:

1. Построение модели Ларсона-Миллера для длительной прочности в графической (рис. 1.3) и алгебраической форме по экспериментальным данным.
2. Графическое отображение модели «кривые длительной прочности» в форме, представленной на рис 1.1. Определение ее параметров ***m(T)*** и **lg*A(T)*** в уравнении с использованием модели Ларсона-Миллера, полученной на предыдущем этапе.
3. Определение коэффициентов запасов длительной прочности и долговечности детали из исследуемого материала по заданным условиям нагружения ***σ***, ***T*** вкритической области и заданному ресурсу детали ***tр***.
   1. **Исходные данные к работе**
4. Основными исходными данными к задачам 1…2 являются приведенные в приложении 1 экспериментальные данные, полученные при испытаниях высокотемпературных конструкционных материалов.
5. Выбор материала согласовывается с преподавателем.
6. Величину константы ***C*** в формуле принять ***C***=20.
7. Исходные данные к задаче 3 (величины ***σ***, ***T3*** в критической точке детали и время ее работы ***t***) задаются преподавателем.
   1. **Порядок выполнения работы**

Студент после изучения методического пособия к работе и установочного собеседования согласовывает с преподавателем вид материала и приступает к выполнению указанных в разделе 2 задач работы в следующей последовательности.

* + 1. **Задача 1. Построение модели Ларсона-Миллера**

Полученные исходные данные необходимо занести в таблицу 1.1.

1. выполнить расчет параметров модели Ларсона-Миллера   
   **(*Pл-м i*; lg*σдл i*)** по формуле ) и занести их в столбцы 5 и 6 таблицы 1.1;
2. для всего массива рассчитанных экспериментальных точек:

* построить графическую модель Ларсона-Миллера (см. рис. 1.3 и приложение 2);
* представить (аппроксимировать) ее в алгебраической форме (см. приложение 3);

Таблица 1.1

Исходные данные к построению модели длительной прочности

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | ***Тi***, К | ***σдл i***, МПа | ***tр i***, ч | ***Рл-м(Т, tр)*** | **lg*σдл*** |  |  |
| *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | *8* |
| 1  2  3  ⁞ |  |  |  |  |  |  |  |

Далее необходимо:

1. провести статистическую оценку разброса экспериментальных данных, для чего:

* используя построенную модель типа , рассчитать значения предела длительной прочности  для исходных данных ***Ti*** и ***tр**i*** и занести в столбец *7* Таблицы 1.1;
* рассчитать значения  и математическое ожидание ;
* найти значение дисперсии по формуле

;

* определить среднеквадратичное отклонение  и коэффициент вариации **var**() по формуле

.

* + 1. **Задача 2. Построение модели «кривые длительной прочности»**

Используя полученную аналитическую модель Ларсона-Миллера , построить график модели «кривые длительной прочности» в логарифмических координатах для заданных преподавателем трех значений температур ***T1***, ***Т2***, ***Т3***. Из них два значения ***T1*** и ***Т2*** должны соответствовать экспериментальным данным, а одно – ***Т3*** – произвольное в диапазоне между ***T1*** и ***Т2***.

Вычисления рекомендуется выполнять в форме таблицы 1.2. Строки 1, 2, 3 данной таблицы следует повторить для каждой из заданных температур.

Таблица 1.2

Расчет параметров модели «кривые длительной прочности»

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №№ | ***tp***, час | 10 | 102 | 103 | 104 |
| **lg*tp*** |  |  |  |  |
| 1 | ***T1*** |  |  |  |  |
| 2 | ***Pл-м*** |  |  |  |  |
| 3 | **lg*σдлрасч*** |  |  |  |  |
| ⁞ | ⁞ |  |  |  |  |

Используя полученную модель «кривые длительной прочности», определить параметры ***m*(*T*)** и **lg*A*(*T*)** модели по формулам и для заданных температур ***Т1***, ***Т2***, ***Т3*** в диапазоне времени до разрушения ***tp*** от ***10*** до ***104*** часов. Ход расчетов и их конечные результаты отразить в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Расчет коэффициентов модели длительной прочности

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №№ | ***Тi***, К | **lg*t1*** | **lg*σ1*** | **lg*t2*** | **lg*σ2*** | **lg*t2*** - **lg*t1*** | **lg*σ1*** - **lg*σ2*** | ***m***(***Т***) | **lg*A***(***T***) |
| *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | *8* | *9* | *10* |
| 1 |  | 1 |  | 4 |  |  |  |  |  |
| 2 |  | 1 |  | 4 |  |  |  |  |  |
| 3 |  | 1 |  | 4 |  |  |  |  |  |

* + 1. **Задача 3. Определение коэффициентов запаса длительной прочности и долговечности**

На графике «кривые длительной прочности», полученном в задаче 2, изобразить положение расчетной точки детали, соответствующей параметрам ***σ***, ***T3*** и длительности нагружения ***t*** (***σ***, ***t*** согласовываются с преподавателем).

Определить графически и с использованием полученной модели Ларсона-Миллера :

1. Значения запасов длительной прочности ***Kσ***(***T3***) и долговечности ***Kt***(***T3***).
2. Отношения указанных запасов по данным п. 4.1 и согласно зависимости с использованием полученного в задаче 2 значения ***m***(***T3***).
3. Сделать вывод о точности и возможности практического использования зависимости .
   1. **Отчет по работе**

Составить индивидуальные для каждого студента отчеты по выполнению всех задач работы с обязательным представлением:

1. Исходных экспериментальных данных по выбранному материалу (столбцы 2 – 4 таблицы 1.1);
2. Полученных аналогов рисунков 1.1 1.3;
3. Полученной аналитической модели Ларсона-Миллера и значение ее коэффициента вариации ;
4. Расчетных таблиц 1.1, 1.2 и 1.3;
5. Выводов по решению задач 1…3;

Форма отчета – рукописная. В нем возможны ссылки на отдельно распечатанные и приложенные рисунки и таблицы.

* 1. **Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое длительная прочность?
2. В чем отличие между пределом временной и длительной прочности?
3. Назовите известные модели длительной прочности и их параметры.
4. Как построить эти модели по экспериментальным данным?
5. В чем заключается преимущество модели Ларсона-Миллера над моделями «кривые длительной прочности»?
6. Как влияет температура на зависимость предела длительной прочности от времени работы?
7. Как определить время работы детали до разрушения при заданных значениях температуры и напряжения?
8. Как определить запас прочности при длительном статическом нагружении?
9. Как определить запас долговечности при длительном статическом нагружении?
10. Как связаны запасы прочности и долговечности при длительном статическом нагружении?

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОБУСЛОВЛЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ДЕТАЛИ С ЖЕСТКИМИ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

***Цели работы***

1. приобретение навыков реализации и использования наиболее распространенных моделей ползучести и длительной прочности;
2. количественные исследования обусловленной ползучестью релаксации напряжений в критической точке сопловой лопатки турбины в условиях жестких деформационных ограничений.
   1. **Основные положения**
      1. **Явление ползучести и его модели**

Детали многих машин, в особенности паровых и газовых турбин, дизелей, реакторов и др., длительно работают под нагрузкой при повышенных температурах. Этим условиям свойственны некоторые особенности пластического деформирования и разрушения деталей. В результате ползучести деформации с течением времени могут достигать предельных величин, при которых происходит нарушение работы машины; в результате релаксации возможно постепенное ослабление упругого натяга в соединениях деталей; за счет уменьшения предельных напряжений во времени возможно разрушение деталей после определенного срока эксплуатации.

**Ползучестью** называют медленное накопление остаточных (пластических) деформаций ***εс*(*t*)** за текущее время ***t*** под действием постоянных напряжений ***σ*** при повышенных температурах ***T***.

Таким образом, процесс ползучести описывается набором из четырех параметров ***εс(t)***, ***σ***, ***T*** и ***t****.*

На рис. 4. показаны типовые зависимости деформации ползучести материала от времени при действии постоянных напряжений и температуры.

Процесс ползучести условно подразделяют на три стадии (рис. 4,*а*):

1. первая стадия (участок ***ОА***) характеризуется убывающей скоростью накопления деформации ползучести, и ее принято называть ***неустановившейся ползучестью***;
2. вторая стадия (участок ***АВ***) характеризуется постоянной скоростью и называется ***установившейся ползучестью***;
3. третья стадия (участок ***ВС***) характеризуется увеличением скорости деформации и заканчивается разрушением образца; она называется ***ускоренной ползучестью***.

В условиях высоких температур и нагрузок стадия установившейся ползучести может отсутствовать (рис. 4, б, кривая 1), а при малых нагрузках и умеренных температурах может наблюдаться разрушение образцов без заметного увеличения скорости ползучести (кривая 3, рис. 4-*б*).

0

**I**

**II**

**III**

***tp* (*σi*,*Tj*)**

***t***

***t***

***tp* (*σ*1,*Tj*)**

***tp* (*σ2*,*Tj*)**

***tp* (*σi*,*Tj*)**

*i*=1,2,3,…

*j*=1,2,3,…

***Tj***=const

***σi***=const

***Tj***=const

***εc, %***

***σ1***

***σ2***

***σi***

***εc, %***

***εo***

*a*

*б*

0

**I**

**A**

**II**

**III**

**B**

**C**

Рис. 2.1. Кривые ползучести

Набор приведенных на рис. 4 кривых, построенных для различных температур ***Tj*** (*j* = 1, 2, 3, 4, …) и напряжений ***σi*** (*i* = 1, 2, 3, 4, …), составляет базовую модель данного явления и называется **кривыми ползучести**. Они получаются путем проведения достаточно сложных и объемных экспериментов – до 10 образцов на каждую комбинацию ***Tj*** и ***σi***.

Уменьшить объем экспериментов позволяет применение так называемой **обобщенной кривой ползучести**, представляющей зависимость  от относительного времени

,

где ***tр***(***σ***, ***Т***) – время до разрушения образца, определяемое из известных моделей ДП – кривых длительной прочности или модели Ларсона-Миллера.

На рис. 5 в качестве примера приведена обобщенная кривая ползучести для лопаточного сплава ЖС6-У.

**Время до разрушения** ***tр***(***σ***, ***Т***) обычно определяют для заданных значений ***σ*** и ***T*** из модели ДП Ларсона-Миллера, которая имеет вид



где параметр Ларсона-Миллера ***Pл-м*** определяется по формуле

.

0

1

2

3

0

0.2

0.4

0.6

0.8

1

975°С

950°С



900°С

***εc, %***

Рис. 2.2. Обобщенные кривые ползучести сплава ЖС6-У

* + 1. **Модель Нортона для установившейся ползучести**

До настоящего времени не создана модель ползучести, универсальная для всех ее стадий в широком диапазоне параметров ***σi*** и ***Tj*.**

Облегчающим обстоятельством при решении практических задач является установленный факт, что основное время развития ползучести (до =0.8) приходится на установившуюся стадию с примерно постоянной скоростью ползучести

.

По экспериментальным данным она приближенно представляется в виде следующей степенной зависимости, параметры ***B*(*T*)** и ***n*(*T*)** которой зависят от температуры:

.

Эту зависимость обычно называют законом Нортона.

Принято считать, что он справедлив в интервале  [%/час]. При меньших скоростях расхождения между кривой, описываемой уравнением , и экспериментальными данными увеличиваются, что идет в запас прочности. При этом реальные напряжения в детали релаксируют – уменьшаются.

* + 1. **Релаксация напряжений, вызываемая ползучестью**

Если элемент, в котором может происходить ползучесть, связан с упругими элементами, которые стесняют его возможные деформации, то происходит перераспределение напряжений в элементах системы. **Релаксацией напряжений** называется процесс падения со временем напряжения в элементе конструкции (локальном объеме или критической точке), размеры которого поддерживаются постоянными.

Если зафиксировать общую деформацию нагруженного образца, то напряжения, имеющие в начальный момент высокие значения, начнут уменьшаться по мере развития пластической деформации.

В качестве примера можно назвать следующие случаи:

1. скрытая температурная деформация (концентрация напряжений) в локальных зонах диска или лопатки турбины авиационного ГТД при переходе с одного рабочего режима на другой;
2. стержень, зажатый между двумя жесткими плитами;
3. предварительно затянутый болт, соединяющий две жесткие пластины.

Для установившейся стадии ползучести, применяя закон Нортона, можно получить следующую формулу, описывающую релаксацию (уменьшение) напряжения от начального значения ***σ0*** (соответствующего ***t*** = 0):

,

где ;   
***E*** – модуль упругости материала.

Можно также найти время ***t*** релаксации (уменьшения) напряжения от величины ***σ0*** до некоторой заранее заданной величины ***σ*min** (например, до величины, соответствующей минимально допустимому усилию затяжки, при котором возможно раскрытие стыка по фланцу):

.

Все величины в формулах и необходимо выбирать для рабочей температуры ***T***.

* + 1. **Определение параметров модели Нортона**

Параметры ***B(T)*** и ***n(T)*** модели Нортона могут быть приближенно определены по имеющейся экспериментальной информации – обобщенной кривой ползучести  (рис. 2.2). В основе предлагаемого подхода лежит предположение о том, что в диапазоне малых отклонений напряжений ***σ*** параметры модели Нортона зависят только от температуры материала ***Т*** и в случае ее постоянства также остаются неизменными. Тогда в уравнении скорость ползучести будет зависеть только от величины возникающих напряжений ***σ***.

Область адекватности модели Нортона соответствует участку установившейся ползучести; следовательно, при определении параметров ***B(T)*** и ***n(T)*** следует ограничиться областью на обобщенных кривых ползучести (см. рис. 2.2), в которой относительное время лежит в диапазоне .

Таким образом, начинать вычисления скорости ползучести следует с того, что заданному (номинальному) значению напряжений ***σ*** необходимо придать некоторое небольшое приращение **Δ*σ***, равное 5…10%. Далее, для напряжений ***σ*** и  при одинаковой заданной температуре ***T*** вычислить величины времен до разрушения  и , используя модель Ларсона-Миллера , . После этого из обобщенной кривой ползучести (рис. 2.2) на основе формулы построить две кривые ползучести в координатах (***tр***, ***εc***) и получить два отрезка  и , как показано на рис. 2.3.

0

******













***t*,** час





Рис. 2.3. К определению скорости ползучести

На основе уравнения можно определить значения скорости ползучести при напряжениях ***σ*** и ***σ\****



где ,  и ,  – моменты времени *t* и *t\**, соответствующие значениям обобщенного времени . Они определяются по формуле :



Используя формулу , составим систему из двух нелинейных уравнений



Прологарифмировав обе части этих уравнений, получим



откуда



или





* 1. **Задачи работы**

К выполнению предлагаются следующие задачи:

* 1. Построение кривых ползучести материала детали (рис. 2.1) на основании обобщенной кривой ползучести (рис. 2.2) по заданным значениям ***σ0*** и ***T*** в критической точке детали.
  2. Расчетное определение параметров ***B*(*T*)** и ***n*(*T*)** модели установившейся ползучести Нортона.
  3. Построение кривой изменения (релаксации) во времени напряжения ***σ*** от его начального значения ***σ0***.
  4. Построение истинной кривой ползучести с учетом релаксации напряжений
  5. **Исходные данные к работе**
     1. **Объект исследования**

Объектом исследования является сопловая лопатка турбины авиационного ГТД с конвективно-заградительным типом охлаждения. Критическая точка расположена в районе корневого сечения на кромке перфорационного отверстия, которое является концентратором напряжений. Эффективный коэффициент концентрации ***Kσ*** = ***2,5***.

Материал лопатки – сплав ***ЖС-6У***.

Варианты значений температур ***Tj*** и напряжений ***σi*** в критической точке сечения лопатки приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Варианты исходных данных

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант  Данные | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** |
| ***Тi*,** °С | 900 | 900 | 900 | 950 | 950 | 950 | 975 | 975 | 975 |
| ***σi***, МПа | 240 | 260 | 280 | 220 | 240 | 260 | 220 | 240 | 260 |

* + 1. **Свойства материала лопатки**

1. Длительная прочность сплава ЖС-6У описывается следующей моделью Ларсона-Миллера (см. п. 1.1 данной работы)



1. Обобщенные кривые ползучести .

Обобщенные кривые ползучести сплава ЖС-6У для температур ***T***=950°C и ***T***=975°C описываются численными значениями , приведенными в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Значения параметров ползучести сплава ЖС-6У

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Т***, °С |  | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 900 | ***εc***, % | 0,0 | 0,236 | 0,358 | 0,511 | 0,731 | 0,980 | 1,271 | 1,634 | 2,150 |
| 950 | ***εc***, % | 0,0 | 0,200 | 0,314 | 0,429 | 0,614 | 0,786 | 0,986 | 1,243 | 1,523 |
| 975 | ***εc***, % | 0,0 | 0,157 | 0,257 | 0,372 | 0,529 | 0,672 | 0,843 | 1,022 | 1,286 |

1. Модуль упругости материала при температурах 950 и 975°С ***E***=1,3·105 МПа.
   1. **Порядок выполнения работы**

Студент после изучения методических указаний и допуска к проведению работы получает от преподавателя свой вариант нагружения лопатки из таблицы 2.1.

Работа заключается в последовательном выполнении трех описанных выше задач и составлении индивидуальных отчетов каждым студентом.

* + 1. **Задача 1. Построение кривых ползучести  и  для заданных значений *Tj* и *σi***

1. Построить график обобщенной кривой ползучести  для заданной температуры ***T*** и привести его на рисунке, аналогичном рис. 2.2.
2. Для заданных значений ***Tj*, *σi*** и ***Tj*, *σ\**** найти время до разрушения  и , воспользовавшись моделью Ларсона-Миллера .
3. Используя формулу и значения времен до разрушения  и , преобразовать обобщенную кривую ползучести  в две кривые ползучести  и . Их координаты ***t*** и ***t\**** занести в строки 3-4 таблицы 2.3 и изобразить на рисунке, аналогичном рис. 2.3.

Каждую из полученных кривых ползучести  и  привести к линейному виду, т.е. аппроксимировать уравнением прямой лини в диапазоне значений относительного времени от  до .

Выполнить оценку справедливости допущения о линейной скорости роста деформации ползучести в пределах указанного участка.

* + 1. **Задача 2. Определение параметров модели Нортона**

Параметры ***B(T)*** и ***n(T)***модели Нортона для заданных значений ***T***и ***σ*** определяются по методике, изложенной в разделе 1.4 данной работы, на основании данных о кривых ползучести  и  (рис. 2.2 и таблица 2.2), приведенных в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Данные о кривых ползучести

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 |  | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 2 |  | перенести данные из таблицы 2.2 для заданной ***Т*** |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 | ***σ(t)*** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Для этого необходимо:

1. Определить значения скорости установившейся ползучести для этих кривых  и  на участках времени, соответствующих значениям обобщенного времени от =0,2 до 0,8, по формуле .
2. По формулам и для найденных значений  и , а также известным значениям ***σi*** и ***σ\****, определить параметры ***B(T)*** и ***n(T)***модели Нортона.
   * 1. **Задача 3. Определение кривой релаксации напряжений**

По формуле получить данные по изменению (релаксации) начального заданного напряжения ***σ0*** в течение времени.

Результаты расчетов занести в строку 5 таблицы 2.3 до момента времени  и представить в графической форме.

Выполнить анализ полученных результатов в форме короткого заключения.

* + 1. **Задача 4. Построение истинной кривой ползучести, с учетом релаксации напряжений**

На основе уравнения можно записать выражение для изменения деформации с течением времени:

.

Учитывая выражение , получим связь между деформацией и изменяющимися во времени напряжениями:

.

Построить график изменения деформации во времени (до значения ) с учетом релаксации напряжений.

* 1. **Отчет о работе**

Отчет должен содержать:

1. Название работы с указанием заданного варианта состояния лопатки;
2. Последовательные отчеты о выполнении всех этапов с указанием их наименования, с наличием всех рабочих формул и детальных численных результатов расчетов;
3. В частности, в отчет должны быть включены рисунки, аналогичные рис. 2.2 и рис. 2.3, а также табл. 2.3.

Форма отчета – рукописная. В нем возможны ссылки на отдельно распечатанные и приложенные рисунки и таблицы.

* 1. **Вопросы для самоконтроля**

1. Что называют ползучестью?
2. Назовите основные стадии ползучести и дайте им характеристику.
3. Что изображают на обобщенной кривой ползучести?
4. Какую стадию ползучести описывает модель Нортона?
5. Между какими параметрами, характеризующими процесс ползучести, устанавливает связь модель Нортона?
6. Какое допущение лежит в основе определения параметров модели Нортона?
7. В чем заключается релаксация напряжений?
8. Приведите примеры конструкций, в которых возможна релаксация напряжений.

# Расчет НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ диска турбины в области упруго-пластических деформаций

***Цели работы***

Ознакомление с наиболее распространенными методами расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) диска турбины в областях упруго-пластических деформаций.

* 1. **Основные положения**

При конструировании таких ответственных и напряженных элементов ГТД, как диски компрессоров и турбин, рабочие лопатки турбин, высокотемпературные фрагменты валов и др. стремятся обеспечить работу материала в области упругих деформаций. Однако в локальных зонах этих элементов из-за существенных механических нагрузок и температурных градиентов, а также вследствие действия концентраторов напряжений и других факторов возникают пластические (остаточные) деформации. Это явление существенно уменьшает прочностную надежность детали, особенно из-за проявления малоцикловой усталости материала.

Данная лабораторная работа посвящена изучению сходимости и точности двух наиболее распространенных методов расчета упруго-пластического НДС деталей: метода секущих модулей и метода Нейбера. Деталью, на примере которой рассматриваются эти методы, является диск турбины.

* + 1. **Особенности расчета НДС деталей в области упругих деформаций**

Как упругие, так и пластические свойства материала количественно выражаются *диаграммой деформирования* ***σ****-****ε*** (рис. 3.1) или зависимостью относительного удлинения  от условного напряжения , где ***F0*** – площадь поперечного сечения образца до деформации. Для построения такой диаграммы проводят наиболее простые и распространенные испытания материала на растяжение. Чтобы результаты испытаний были сравнимы, применяют геометрически подобные образцы обычно круглого сечения. Образец растягивают на разрывной машине с постоянной скоростью движения захватов и определяют зависимость удлинения расчетной части образца ***Δl*** от нагрузки ***P*** вплоть до разрушения.

В начале нагружения между напряжением и деформацией существует линейная зависимость. Напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между напряжением и деформациями впервые достигает некоторой заданной величины, называют *пределом пропорциональности* ***σпц*** (точка *1* на рис. 3.1). Напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторой заданной величины (обычно порядка ***0,002***%…***0,005***%), называют пределом упругости ***σу*** (точка *2*). Предел упругости часто считают совпадающим с пределом пропорциональности.

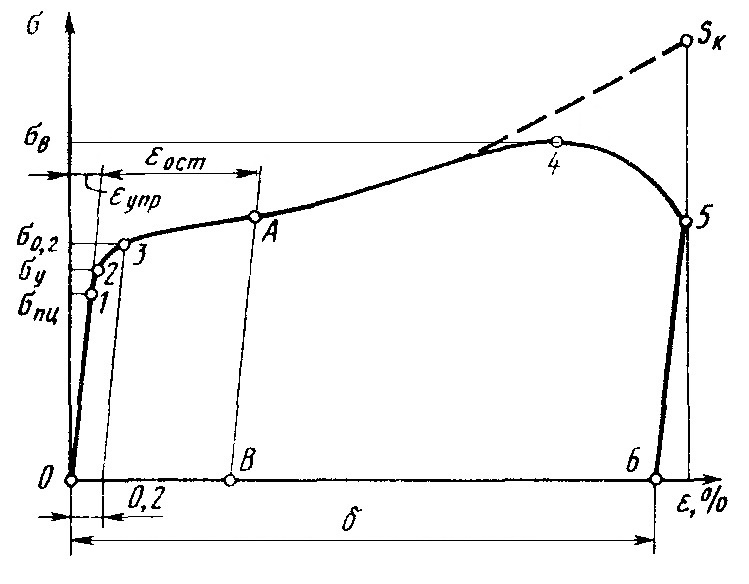


Рис. 3.1. Диаграмма деформирования

При нагружении за пределом упругости остаточные деформации заметно увеличиваются. Многие конструкционные материалы, применяемые для изготовления деталей ГТД, не имеют площадки текучести, при которой деформация увеличивается без нарастания напряжений. Для таких материалов определяют *условный предел текучести* ***σ0,2*** (точка *3*) – напряжение, при котором остаточные деформации достигают некоторой заданной величины (обычно 0,2%).

Если в какой-либо момент (точка *А*) начать разгружать образец, то зависимость между напряжением и деформацией при разгрузке изобразится прямой линией *АВ*, практически параллельной линии нагрузки *01*. Деформация в точке *А* состоит из упругой части ***εупр***, которая устраняется после снятия нагрузки, и остаточной (пластической) ***εост***, которая остается после снятия нагрузки.

Максимальное условное напряжение, которое выдерживает образец, называют *временным сопротивлением*, или *пределом прочности* ***σв*** (точка *4*). Истинное напряжение в момент окончательного разрушения образца называют *истинным пределом прочности* – ***Sк***.

При испытании на растяжение определяют также характеристики пластичности материала: *относительное удлинение* и *относительное сужение* (уменьшение площади поперечного сечения) при разрыве.

Относительное удлинение, численно равное отрезку ***0***–***6***, вычисляют по формуле

,

где ***lк*** – суммарная длина разорвавшихся участков расчетной части образца;

***l0*** – длина расчетной части образца до деформации.

Относительное сужение поперечного сечения

,

где ***F0*** – площадь сечения расчетной части образца до деформации;

***Fк*** – конечная площадь сечения по шейке образца после разрушения.

Пунктиром на рис. 3.1 показано изменение истинных напряжений после образования шейки, а истинный предел прочности находят из выражения



Если вместо экспериментального образца материала рассматривается конкретная двухмерная (плоская) или трехмерная (объемная) деталь, то ее НДС в каждой точке с координатами (***х, у, z***) представляется векторами напряжений  и деформаций , а температурное состояние – температурой ***T***=***T(x, y, z)***. В их составы входят компоненты векторов напряжений и деформаций



.

Методы решения задач упругости и термоупругости для изотропного тела при постоянных значениях модуля упругости ***Е*** и коэффициента Пуассона ***μ*** детально разработаны и изложены в учебниках. Закон Гука устанавливает линейную связь между деформацией ***ε*** и напряжениями ***σ***



и не требует проведения сложных вычислительных операций.

В теории термопластичности, задачей которой является определение напряжений и деформаций в неравномерно нагретом теле при наличии в нем пластических деформаций, рассматриваются более сложные и разнообразные явления, чем в теории термоупругости. Охватить все термопластические свойства конструкционных материалов, проявляющихся в различных условиях работы, в рамках единой теории – задача пока неосуществимая.

В данном случае на помощь могут прийти приближенные численные методы расчета, например метод конечных элементов. Однако использование таких методов при учете физической нелинейности рассматриваемой задачи сопровождается существенным увеличением времени вычислительных процессов.

Альтернативным является подход, при котором осуществляется переход от условного НДС детали к реальной кривой деформирования. В этом случае условное НДС определяют для абсолютно упругого материала с использованием линейного закона Гука , а переход к кривой ***σ****-****ε*** выполняют согласно некоторым частным вариантам теории термопластичности, позволяющим решить задачу наиболее простыми средствами и вместе с тем достаточно полно и правильно описать важнейшие стороны исследуемого явления. Частными теориями термопластичности являются:

* деформационная теория пластичности;
* теория пластического течения или деформационная теория в приращениях;
* теория пластического течения при анизотропном упрочнении;
* теория циклического термопластического деформирования.
  + 1. **Расчет НДС деталей в области упруго-пластических деформаций методом переменных параметров упругости (секущих модулей)**

Наиболее простой и удобной для программной реализации является **деформационная теория пластичности**. Данная теория основана на ряде допущений, полученных при анализе экспериментальных данных. Она сводится к введению так называемого переменного параметра упругости или секущего модуля ***Ес***. Для его определения необходимо использовать исходную кривую деформирования материала ***σ****-****ε***, полученную приизотермическом растяжении (рис. 3.2), а также значение интенсивности напряжений ***σi***. Величина ***σi*** в точке (***х,у,z***) может быть определена по вектору напряжений  в этой точке следующим образом:

.

Однако возникает следующая проблема, препятствующая получению решения в упруго-пластической области: необходимо знать величину секущего модуля ***Ес***(***х,у,z***), а для этого – величину ***σi***(***х,у,z***), которая в соответствии с формулой , зависит от искомого вектора . Таким образом, получается замкнутый неразрешимый круг.

***σ***=***σi***

***σ***

**arctg*E***

**arctg*Eс***

***ε***

***ε***

Рис. 3.2.

Для решения этой проблемы используется метод последовательных приближений, алгоритм которого заключается в выполнении следующих вычислений (рис. 3.3):

* 1. Для заданной температуры ***Т*** в выбранной точке детали построить соответствующую кривую деформирования ***σ****-****ε***.
  2. Задаться в качестве первого приближения значениями секущего модуля ***Ес***(***1***)=***Е*** и ***μ\****=***μ***, соответствующими упругому деформированию (обычно для конструкционных материалов ***μ***=***0,3***).
  3. Любым из доступных методов (конечных разностей или конечных элементов) для исследуемой детали получить упругое решение в виде ;
  4. Определить по формуле первое приближение интенсивности напряжений ***σi***(***1***);
  5. Из треугольника ***0*** ***А1*** ***ε***(***1***) найти величину деформации ***ε***(***1***) по формуле

 .

* 1. Найти значение  на кривой деформирования (точка ***В1***), подставив ***ε***(***1***) в математическую модель кривой деформирования (результат ее аппроксимации). Графически это соответствует точке ***B1*** пересечения вертикального отрезка, опущенного из точки ***А1*** на ось ***ε***, с кривой деформирования ***σ***-***ε***.
  2. Найти второе приближение ***Ес***(***2***) секущего модуля из треугольника ***0*** ***B1*** ***ε***(***1***) по формуле

 .

**arctg*Eс***(***3***)

**arctg*Eс***(***2***)

**arctg*Eс***(***1***)**=*E***

***T=const***

***An***

***A1***

***A2***

***B1***

***B2***

***Bn***

***ε***(***1***)

***ε***(***2***)

0

***σ***, МПа

***ε***

***σ\*i***(***1***)

***σ\*i***(***2***)

***σ\*i***(***n***)

***σi***(***2***)

***σi***(***1***)

***ε***(***n***)

Рис. 3.3. Графическое представление метода секущих модулей:   
точка **Аn** (или **Bn**) – решение для упруго-пластического НДС (**σi**(**n**), **ε**(**n**))

* 1. Во втором приближении задаться найденным значением ***Ес***(***2***) и коэффициентом Пуассона ***μ\****=***0***,***5***, который соответствует упругопластическому деформированию несжимаемого материала.
  2. Как и в пункте 2.1, получить второе упругое решение , далее провести расчет ***Ес***(***3***) по аналогии с п.п. 2.2)…2.5).
  3. В третьем приближении задаться значениями ***Ес***(***3***) и ***μ\****=***0,5***, получить величины ***Ес***(***4***) и так далее до получения точки ***Аn*** ≈ ***Bn*** с координатами ***σ\*i***(***n***), ***ε***(***n***) на кривой деформирования.

При заданных нагрузках и температурах расчет следует продолжать до тех пор, пока во всех расчетных точках разность напряжениями ***σ\*i***(***n***) и ***σi***(***n***) не станет меньше заданной величины.

* + 1. **Приближенный расчет упругопластического НДС деталей методом Нейбера**

Для определения упругопластических деформаций, возникающих в отдельных локальных областях детали, широкое применение получил принцип Нейбера, который был сформулирован следующим образом: «Среднее геометрическое из коэффициента концентрации напряжений и коэффициента концентрации деформаций (для любого закона напряжение–деформация) равно коэффициенту концентрации, соответствующему закону Гука».

Этот принцип удобно выразить соотношением

,

где ***σлин*** – условные упругие напряжения;

***εусл***, ***εу***, ***ε*** – упругая и суммарная деформации соответственно.

Графическая интерпретация принципа Нейбера представлена на рис. 3.4. Принцип Нейбера позволяет с удовлетворительной точностью определить на основе линейного расчета суммарную и упругую деформации в надрезе или в области другого концентратора напряжений, и на основе этого – пластическую деформацию.

В последствие принцип Нейбера был обобщен для других случаев неоднородного напряженного состояния. Обобщенный принцип Нейбера можно записать в виде

,

где ***m*** – показатель, принимающий значения от ***0*** до ***1*** при различных способах нагружения. Значения показателя ***m*** можно определить методом математического моделирования в упругопластической постановке с последующим сравнением с результатами линейного расчета. При этом установлены следующие значения этого параметра:

* ***m*** = ***1*** для напряжений силового происхождения, равномерно распределенных по сечению;
* ***m*** ≤ ***0,66*** для напряжений силового происхождения, неравномерно распределенных по сечению (например, изгиб);
* ***m*** ≤ ***0,5*** для надрезов, находящихся под влиянием силовой или деформационной нагрузки (первоначальная формула Нейбера);
* ***m*** ≤ ***0,1*** для напряжений деформационного происхождения, в том числе температурных напряжений;
* ***m*** ≤ ***0*** для напряжений деформационного происхождения с их равномерным распределением по сечению.

Для указанных значения показателя степени ***m*** приведены их предельные значения, которые достигаются при развитой пластической деформации. Для малой пластической деформации значения показателя ***m*** принимаются более низкими. Поскольку при малом напряжении упругая деформация приближается к линейно рассчитанному значению деформации, погрешность расчета за счет уменьшения показателя ***m*** является несущественной.

Принцип Нейбера можно использовать при решении ряда прикладных задач: статическое нагружение; циклическое нагружение; расчет приспособляемости; расчет деформации ползучести. Важным фактором, который ограничивает применение принципа Нейбера (включая и обобщенный), является то, что принцип действителен лишь в местах локальных экстремумов напряженности, например, в вершине надрезов, в наиболее напряженной точке балки, в месте пика температурного напряжения.

***σi***

***σлин***

**arctg*E***

***ε***

***εу***

***А***

***ε\*i***

***σ\*i***

***0***

Рис. 3.4. Графическая интерпретация принципа Нейбера

При практической реализации принципа Нейбера используют исходную кривую деформирования ***σ***-***ε*** и значение интенсивности напряжений ***σi***, рассчитанное по формуле в линейной постановке. Переход от условно упругого состояния к реальным упругопластическим деформациям и напряжениям заключается в следующем (рис. 3.4):

1. Выполняют упругий расчет вектора напряжений .
2. Определяют значение ***σi*** по формуле .
3. Если конструкция имеет концентрацию напряжений, не учитываемых расчетной моделью (например, отверстия в диске не могут быть в полной мере учтены при использовании плоской осесимметричной расчетной модели), то определяют значение условного упругого эквивалентного напряжения ***σлин*** с учетом концентрации напряжений

 ,

где ***Кσ*** – коэффициент концентрации напряжений.

1. Вычисляют соответствующее ***σлин*** значение условной упругой деформации ***εу***

 .

1. Через точку ***А***(***εу***, ***σлин***) проводят гиперболу Нейбера согласно формуле



где ***σ*** и ***ε*** – текущие значения точек гиперболы Нейбера.

1. Точка с координатами (***ε\****, ***σ\****), соответствующая пересечению гиперболы Нейбера с кривой деформирования ***σ***-***ε***, является искомым решением ***ε\**** = ***ε\*i*** и ***σ\**** = ***σ\*i***, определяющим НДС детали в области упругопластических деформаций.

Этот метод в силу своей простоты нашел широкое применение, когда область с упругопластическими деформациями возникает естественным образом, без участия концентраторов напряжений.

* 1. **Задачи лабораторной работы**

Получить практические навыкирасчета НДС диска турбины в областях упруго-пластических деформаций двумя методами:

1. методом переменных параметров упругости (секущих модулей), предлагаемого на основе деформационной теории пластичности;
2. приближенным методом, использующим гиперболу Нейбера.
   1. **Объект исследования**

Объектом исследования является диск турбины высокого давления двухконтурного ТРД с большой степенью двухконтурности (прототип – двигатель Д-36).

Материал диска – жаропрочный сплав на никелевой основе.

Геометрия, а также распределение физических свойства материала в сечении диска приведены в файле входных данных ***Prop.dat*** программы ***Calk\_pro.exe***.

Частота вращения турбины высокого давления – ***n*** = ***16000*** об/мин.

Внутренний радиус ступицы – ***R0*** = ***0,055*** м.

Наружный радиус обода – ***Rк*** = ***0,23*** м.

Температура ступицы – ***Т0*** = ***600*** ºС.

Температура обода – ***Тк*** =***700*** ºС.

Контурная нагрузка от лопаточного венца – ***σрл*** = ***60*** МПа.

Упругий расчет нормальных напряжений ***σr*** и ***σθ***, возникающих в сечениях диска, выполняется в плоской осесимметричной постановке с помощью программы ***Disk112.exe*** кафедры 203.

Для этого случая формула для вычисления эквивалентных напряжений преобразуется к виду

 .

* 1. **Порядок выполнения работы**

Бригада из двух студентов выполняет три основных задачи в указанной последовательности.

* + 1. **Задача 1. Расчет исходного условного упругого НДС диска**

Необходимо с помощью программы ***Calk\_pro.exe*** рассчитать основные исходные данные для упругого расчета и занести их в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Исходные данные для расчета упругих напряжений в диске

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| NN | ***R***, м | ***b***, м | ***Т***, ºС | ***Е***, МПа | ***α·10-5***, ºС-1 | ***σдл***, МПа |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0,055 | 0,090 |  |  |  |  |
| 2 | 0,056 | 0,092 |  |  |  |  |
| 3 | 0,063 | 0,092 |  |  |  |  |
| 4 | 0,072 | 0,091 |  |  |  |  |
| 5 | 0,088 | 0,077 |  |  |  |  |
| 6 | 0,100 | 0,046 |  |  |  |  |
| 7 | 0,132 | 0,034 |  |  |  |  |
| 8 | 0,165 | 0,018 |  |  |  |  |
| 9 | 0,199 | 0,026 |  |  |  |  |
| 10 | 0,230 | 0,026 |  |  |  |  |

Далее с помощью программы ***Disk112.exe*** рассчитать величины ***σr n***, ***σθ n*** и ***σэ n***. Эквивалентные напряжения для всех расчетных сечений занести в строку 1 таблицы 4.2. Строку 2 данной таблицы заполнить значениями пределов текучести ***σТ.n***, соответствующим температуре материала в расчетных сечениях.

Затем следует сравнить полученное значение ***σэ.n*** в каждом расчетном сечении со значением предела текучести ***σТ.n*** при температурах ***Тn*** в сечениях (***n***=1,2…10) и определить, в каких сечениях имеют место пластические деформации (то есть ***σэ n*** > ***σТ***. ***n***).

Таблица 4.2. Распределение напряжений по радиусу диска

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | №№ | № сечения | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Упругий расчет | ***σэ n*** | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***σT n*** | 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Окончательные результаты по методу секущих модулей | ***σэ***(***k***) ***n*** | 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***εэ***(***k***) ***n*** | 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Результаты по методу гиперболы Нейбера | ***σ\*э n*** | 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***ε\*э n*** | 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

* + 1. **Задача 2. Расчет упругопластического НДС диска   
       методом переменных параметров упругости**

Получить решение методом последовательных приближений для всех сечений, в которых происходит пластическая деформация (***σэ n*** > ***σТ n***).

Порядок вычислений приведен в разделе 1.2 данной работы. При этом приближения для всех сечений диска необходимо выполнять синхронизировано (одновременно), т.е. при повторе линейного расчета (с помощью программы ***Disk112.exe***) следует переопределить значения секущих модулей ***Ес n*** и коэффициентов Пуассона ***μ\**** сразу для всех сечений с пластической деформаций.

Вычисления вести в формате рабочей таблицы 4.3, последовательно занося в нее получаемые результаты.

Значения ***σэ(k)n*** и ***εэ(k)n***, принадлежащие кривой деформирования (***σэ***-***ε***) при ***T*** = ***Tn***, находить с помощью программы ***Sigeps.exe***, задав значение температуры ***Tn*** рассматриваемого ***n***-го сечения.

Решение о прекращении итерационного процесса приближений для ***n***-го сечения следует принять по величине ***δ***(***k***)***n***

 .

Таблица 4.3. Результаты расчетов методом секущих модулей

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номера «***n***» особых сечений | Номер «***k***» приближе­ний | ***Ес***(***k***) | ***μ***(***k***) | ***σэ***(***k***) | ***εэ***(***k***) | ***σ\*э***(***k***) |  |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** |
|  | ***k***=1 |  | 0,3 |  |  |  |  |
| ***k***=2 |  | 0,5 |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |
|  | ***k***=1 |  | 0,3 |  |  |  |  |
| ***k***=2 |  | 0,5 |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |
| … | … |  |  |  |  |  |  |

Значения эквивалентных напряжений и деформаций, полученные для последнего приближения для всех 10 сечений занести в строки 3 и 4 таблицы 4.2. Сравнить их со значениями напряжений, соответствующими исходному условному (упругому) напряженному состоянию

* + 1. **Задача 3. Расчет упругопластического НДС диска   
       методом гиперболы Нейбера**

Данную задачу необходимо выполнить для всех определенных ранее сечений диска, для которых ***σэ n*** > ***σТ n***.

Исходными данными являются результаты условного упругого расчета диска ***σэ***(***1***) и ***εэ***(***1***), которые приведены в таблице 4.3 в качестве 1-го приближения (***k***=***1***). Тогда гиперболу Нейбера проводят из точки ***А*** с координатами (***εэ***(***k***), ***σэ***(***k***)). Для этого задаться значениями деформации в диапазоне от ***εэ***(***1***) до (***εэ***(***1***) + ***Δε***) и определить соответствующие им напряжения согласно формуле

.

Гиперболу следует проводить до пересечения ее с соответствующими кривыми деформирования ***σ***-***ε***. Данные для построения кривых деформирования для выбранного материала и соответствующих температур следует получить, воспользовавшись программой ***Sigeps.exe.***

Результаты расчетов координат точек (***ε\*э***,.***σ\*э***) пересечения гиперболы с кривой деформирования занести в строки 5 и 6 таблицы 4.2.

Определение точек пересечения – решений упругопластической задачи – следует представить в графической форме.

Выполнить оценку погрешности данного метода путем сравнения полученных значений ***ε\*э*** с результатами ***ε\*э***(***k***) расчетов по более точному методу переменных параметров упругости:



* 1. **Отчет о работе**

В отчете по лабораторной работе должны быть приведены:

* 1. Название, цель и основные формулы работы.
  2. Исходные данные по диску турбины, включая таблицу 4.1.
  3. Результаты решения задачи 1 в форме таблицы 4.2 с идентификацией особых сечений диска.
  4. Результаты решения задачи 2. в частности:

1. Таблица 4.3.
2. Рисунок типа рис. 3.3 для заданных исходных данных (для одного из особых сечений).
3. Вывод из анализа исходных и конечных распределений ***σэ*** по сечениям диска.
   1. Результаты решения задачи 3.
4. Рисунок типа рис. 3.4 для заданных исходных данных (для одного из особых сечений, желательно, того же, что и в пп. 4, b).
5. Оценки точности метода гиперболы Нейбера по формуле .
   1. **Вопросы для самоконтроля**
6. Что изображено на диаграмме деформирования? Как ее строят?
7. Что называют пределом упругости?
8. Дайте определение, что такое ***σ0,2***?
9. Какая связь между временным и истинным пределами прочности?
10. В чем заключается сложность определения НДС при упругопластическом деформировании материала?
11. Объясните алгоритм выполнения расчета НДС методом переменных параметров упругости.
12. В чем заключается принцип Нейбера?
13. Для каких случаев применим принцип Нейбера?
14. Назовите диапазон изменения показателя ***m*** гиперболы Нейбера.

# АНАЛИЗ ресурса рабочей лопатки турбины

***Цель работы***

Целью настоящей работы является получение навыков выполнения оценок повреждений ***ПДП*** и ***ПМЦУ*** рабочей лопатки турбины за один обобщенный полетный цикл по критериям длительной прочности и малоцикловой усталости соответственно, в том числе с применением кривых безотказности.

* 1. **Основные теоретические положения**

Большинство деталей машин работает определенными циклами (пуск, рабочие режимы, остановки), вследствие чего напряженно-деформированное состояние деталей изменяется циклически. За время эксплуатации общее число циклов может изменяться от 10…100 для стационарных установок до 104…105 и более для транспортных машин, грузоподъемных устройств и других механизмов.

* + 1. **Циклическое деформирование**

Кривая деформирования при растяжении-сжатии показана на рис. 4.2. Предел текучести при растяжении обозначен ***σТ+***, при сжатии ***σТ–***. Для большинства конструктивных металлических сплавов (углеродистых и легированных сталей, титановых и алюминиевых сплавов и др.) пределы текучести при растяжении и сжатии приблизительно одинаковы:



Процесс деформирования «растяжение – сжатие» при циклическом изменении внешних напряжений от ***σ*** до -***σ***, при условии, что ***σ*** > ***σТ***, изображен на рис. 4.1,а. При первом нагружении точка, изображающая состояние материала в плоскости (***σ***, ***ε***), движется по кривой ***ОАВ***. Далее, напряжения уменьшаются и точка продолжает движение по участку ***ВВ1А1***. После достижения минимального напряжения в точке ***А1*** нагружение повторяется. На рис. 4.1,б показан цикл деформаций, сопровождающий цикл изменения внешней нагрузки.

Размах упругопластических деформаций

 ,

где ***εmax***, ***εmin*** – наибольшая и наименьшая пластические деформации в процессе циклического нагружения элемента конструкции.

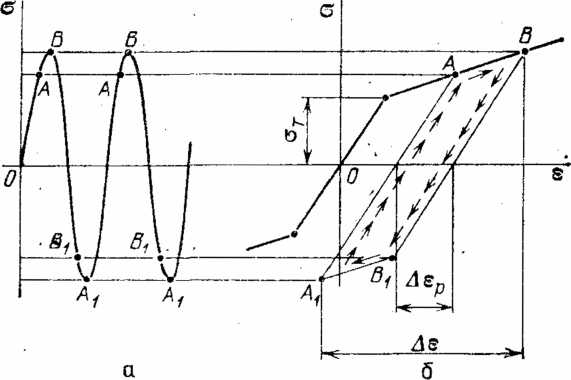


Рис. 4.1. Циклическое деформирование: а – изменение действующих напряжений   
во времени; б – цикл деформаций

* + 1. **Изотропное и анизотропное упрочнения   
       при пластических деформациях**

Пластическая деформация приводит к повышению «мгновенного» предела текучести. Если в точке ***В*** (см. рис. 4.2) снизить нагрузку до нуля, а затем опять произвести нагружение, то переход к пластическому деформированию начнется при ***σ*** ≥ ***σ***(***εp***), и процесс нагружения пройдет по начальной кривой деформирования.



Рис. 4.2. Кривая деформирования при растяжении и сжатии (**σТ+** – предел текучести при растяжении; **σТ–** – предел текучести при сжатии)

Предел текучести при повторном нагружении называется мгновенным пределом текучести. В первом приближении можно считать, что значение мгновенного предела текучести зависит от значения пластической деформации в данный момент нагружения.

В наиболее простой модели поведения материала (в модели *изотропного упрочнения*) предполагается, что кривые деформиро­вания при повторном нагружении (кривые ***О1ВС*** и ***О1В1А1*** рис. 4.3) зависят только от величины достигнутой пластической деформации и не зависят от ее знака.

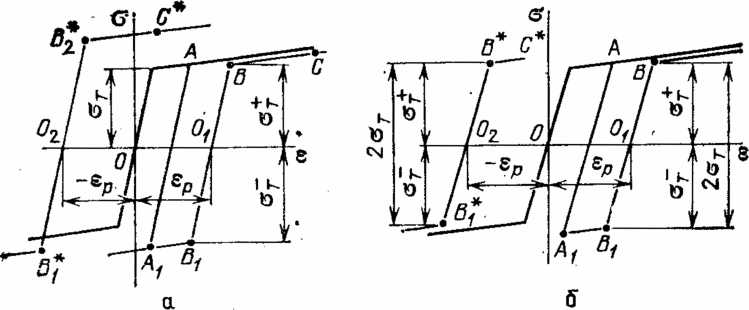


Рис. 4.3. Изотропное (а) и анизотропное (б) упрочнения при пластических деформациях

Кривые деформирования после предварительной пластической деформации ***εp***(кривая ***А1B1О1С****)* или после -***εp*** представляют собой одинаковые кривые, но «сдвинутые» по оси абсцисс.

В модели изотропного упрочнения мгновенные пределы текучести на растяжение и сжатие одинаковы не только при начальном, но и при повторных деформированиях (рис. 4.3,а)*.* Экспериментально установлено, что у многих конструкционных материалов наблюдается понижение мгновенного предела текучести при изменении знака деформирования. Такой эффект, называемый *эффектом Баушингера*, связан с анизотропным упрочнением материала (т. е. упрочнением, зависящим от направления нагружения).

После разгрузки в точке ***В*** мгновенный предел текучести понижается:

***σТ–*** < ***σТ+***.

При изменении знака пластической деформации мгновенный предел текучести на сжатие будет меньше, чем при растяжении.

Простая модель анизотропного упрочнения показана на рис. 4.4, б. Предполагается, что в любой момент нагружения выполняется условие

,

которое носит название *принцип Мазинга*.

Кривые деформирования в различные моменты деформирования имеют участки упрочнения, лежащие на линиях упрочнения при первоначальном деформировании.

* + 1. **Явление малоцикловой усталости**

*Малоцикловой усталостью* называются разрушения при повторных упругопластических деформациях. Обычно разрушения малоцикловой усталости происходят при числе циклов повторения нагрузки ***N*** < ***105***.

Малоцикловая усталость имеет много общего с обычной усталостью, но отличается от нее наличием макропластических деформаций в зоне излома. Как и при обычной (многоцикловой) усталости, разрушение начинается в местах концентрации напряжений в результате развития первоначально образовавшейся трещины. Однако механизм малоциклового разрушения значительно отличается от механизма усталостного разрушения, так как пластические деформации возникают в значительно больших объемах материала.

В частности, различие сказывается в том, что сопротивление материалов малоцикловой усталости существенно зависит от их пластичности, тогда как подобная зависимость для обычной усталости проявляется слабо.

В машиностроении малоцикловая усталость часто определяет ресурс (долговечность) изделий в связи с повторением циклов «запуск – работа – останов». Характерный пример – диски авиационных двигателей, испытывающие (***5***…***10***)***·103*** выходов на максимальные частоты вращения, при которых напряжения приближаются к пределу текучести материала.

* + 1. **Характеристики нагруженности при малоцикловой усталости**

При обычной усталости в качестве характеристики нагруженности используются переменные напряжения цикла (амплитуда переменных напряжений ***σа***). Переменные деформации, возникающие при действии переменных напряжений, при упругом деформировании однозначно определяются соотношением

,

где ***Е*** – модуль упругости, ***εа*** – амплитуда переменных деформаций.

При малоцикловой усталости, протекающей в упругопластической области при процессах нагружения и разгрузки, зависимость



имеет значительно более сложный характер, а для материалов с отсутствующим или очень малым упрочнением практически не является однозначной. На рис. 4.4 показаны два цикла деформаций с переменным напряжением

 ,

где ***σТ*** – предел текучести материала.

При отсутствии упрочнения, что свойственно малоуглеродистым сталям при ***εp*** < ***2***%, цикл переменных напряжений не определяет реальных условий деформирования. Условию может соответствовать цикл ***АВВ1А1*** или ***АСС1А1***, в зависимости от деформаций на границах упругопластической области.

Для материала с пластическим упрочнением (см. рис. 4.3,а)небольшие изменения амплитуды переменных напряжений (от ***σа1*** до ***σа2***) приводят к значительным изменениям амплитуды пере­менных деформаций. Указанные соотношения обосновывают целе­сообразность использования при анализе малоцикловой усталости переменных деформаций в качестве характеристик нагруженности. Для пластически упрочняющихся материалов возможно описание малоцикловой усталости с помощью переменных напряжений.

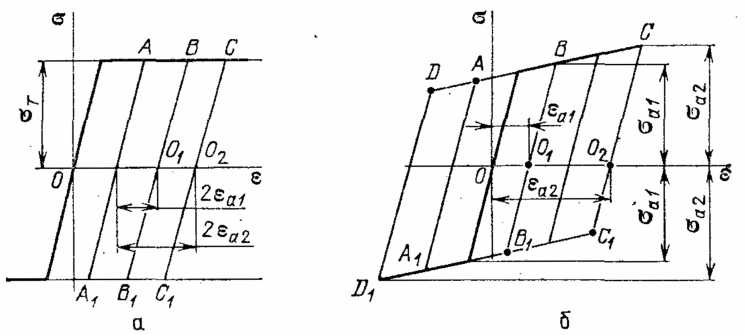


Рис. 4.4. Циклы напряжений и деформаций на диаграммах деформирования:   
а – материал, который не упрочняется; б – материал с незначительным упрочнением

При экспериментальном определении малоцикловой прочности используются режимы «жесткого» и «мягкого» нагружения. При жестком нагружении задается амплитуда переменных деформаций ***εа*** или размах деформаций

.

Жесткое нагружение встречается в элементах конструкций при «принудительной» деформации (например, циклический нагрев стержня при жесткой заделке его концов). Жесткое нагружение характерно для работы материала в зонах концентрации напряжений, где приближенно можно считать, что деформация задается смещением границ упругой области.

При испытаниях в условиях жесткого нагружения измеряется деформация образца. При мягком нагружении происходит циклическое изменение внешнего усилия, действующего на образец.

* + 1. **Условия нагружения при малоцикловой усталости**

При испытаниях с постоянной амплитудой переменных деформаций (жесткое нагружение) установлена следующая зависимость:

 ,

где ***εа p*** – амплитуда пластических деформаций;

***Np*** – среднее чис­ло циклов до малоциклового разрушения;

***С***, ***т*** — параметры материала.

Условие представляет модель малоциклового разрушения, предложенную Коффином. Он определил величину ***С***, используя уравнение для случая однократного (статического) разрушения, принимая условно ***N*** = **1**/**4** (в первой четверти цикла проис­ходит нагружение до максимального значения) и полагая ***т*** *=* ***2****,* ***εа p*** = ***εк***/***2***. Тогда

 ,

где  – истинная деформация в момент разрушения;

***ψ*** – коэффициент относительного поперечного сужения материала.

В этом случае условие малоциклового разрушения имеет вид



Из последнего соотношения следует, что малоцикловая прочность зависит от пластичности материала. Чем больше относительное сужение в шейке при разрыве образца, тем выше прочность при повторных пластических деформациях.

Условие не включает упругую деформацию цикла и пригодно для случаев, когда пластическая часть переменной деформации существенно превышает упругую. При таких условиях число циклов ***Nр*** до разрушения обычно меньше ***103***. В общем случае условие малоцикловой прочности должно учитывать и обычную усталость в области больших переменных напряжений.

В практических расчетах часто используется экспериментально установленная формула Мэнсона, связывающая амплитуду полныхдеформаций цикла (пластических и упругих) с числом циклов до разрушения ***Nр***:

,

где ***σв***, ***Е*** *–* предел временной прочности и модуль упругости материала соответственно.

Первое слагаемое в правой части уравнения выражает сопротивление материала повторным пластическим деформациям, второе – переменным упругим деформациям. При малом числе циклов до разрушения основное значение имеет первое слагаемое, при ***Np*** > ***103*** – второе.

Недостатком формулы Мэнсона, получившей широкое распространение, является приближенный учет сопротивления повторным упругим деформациям.

Используя закономерности усталости при высоких напряжениях

,

где ***σ–1*** – предел выносливости для базового числа циклов ***N0*** (точки перелома); ***т*** – показатель кривой усталости (***m*** = ***6***…***20***),

можно найти амплитуду переменных деформаций:

.

Условие разрушения при малоцикловой усталости можно записать в виде модифицированного уравнения Мэнсона

.

* + 1. **Влияние постоянного напряжения цикла**

Постоянные напряжения оказывают влияние на малоцикловую прочность, причем главным образом на сопротивление повторным упругим деформациям. Учитывая значения предела выносливости при действии постоянных напряжений по формуле

,

получим из следующее условие разрушения при наличии постоянных напряжений:

.

Для формулы Мэнсона учет соотношения приводит к равенству

.

Средние напряжения растяжения понижают прочность при малоцикловом нагружении, средние напряжения сжатия – повышают. Часто в практических расчетах это повышение при назначении запаса прочности не учитывается.

* + 1. **Модели разрушения по критерию долговечности**

Определяющими факторами,которые приводят к выработке ресурса деталями авиационных ГТД, являются:

* длительные статические нагружения при повышенных температурах;
* повторно-статические или циклические нагружения с упругопластическими деформациями.

Количественные характеристики нагружения деталей указанными факторами вытекают из обобщенного полетного цикла (ОПЦ), который задается для каждого конкретного ГТД, устанавливаемого на конкретном летательном аппарате.

Процесс выработки ресурсов деталей принято называть их повреждаемостью, а меры выработки ресурса на отдельных участках ОПЦ и за один ОПЦ в целом – повреждениями детали ***ПДП*** и ***ПМЦУ*** по критериям длительной прочности (ДП) и малоцикловой усталости (МЦУ) соответственно.

В настоящее время, как правило, прогнозирование расходования ресурса рассматриваемой деталью выполняют раздельно по критериям ДП и МЦУ. Результаты представляют в форме текущих повреждений ***ПДП***(***N***) и ***ПМЦУ***(***N***) в зависимости от наработки в циклах нагружения ***N***. Текущие повреждения изменяются в пределах от ***0*** (при ***N*** = ***0***) до ***1*** (при ***N*** = ***Nр***), где ***Nр*** – разрушающее количество ОПЦ или долговечности детали по ДП или МЦУ.

Исходя из принципа линейного суммирования повреждений,при последовательной ***N*** = ***0***, ***1***, ***2***, ***3***, … реализации ОПЦ двигателя значения текущих повреждений деталей определяется следующим образом:



**Повреждение детали по критерию длительной прочности за один ОПЦ**

Для расчета выработки ресурса детали по ДП за один ОПЦ, в котором имеются ***i*** = ***1***, ***2***, …, ***k*** различных установившихся режимов, осуществляется путем линейного суммирования повреждений на каждом ***i***-м режиме ОПЦ:

 ,

где ***ti*** – время работы на ***i***-м режиме;

***tp i*** – время до разрушения, соответствующее параметрам ***σi*** и ***Тi*** – напряжению и температуре в критической точке детали на ***i***-м режиме.

Величину ***tp i*** определяют по моделям, описывающим длительную прочность материалов, например по модели Ларсона-Миллера:



где (***Pл***–***м***)***I*** = ***Ti***(**lg*tр i*** + ***C***), а коэффициенты ***a0***, ***a1***, ***a2***, ***a3*** экспериментально определены для материала детали.

**Повреждение детали по критерию малоцикловой усталости за один ОПЦ**

Для расчета выработки ресурса детали по МЦУ за один ОПЦ, в котором имеются различные циклы нагружения, обычно используется формула

 ,

где ***ПМЦУ ОПЦ*** – повреждение детали по МЦУ за ОПЦ;

***Nj*** – количество циклов одного ***j***-го вида с параметрами нагружения ***Δεj***, ***Tj*** и др., возникающих в течение одного ОПЦ;

***Nр.j*** – количество основных циклов и ***j***-го вида до разрушения с параметрами нагружения ***Δεj***, ***Tj*** и др.

Количество ***Nр.j*** циклов ***j***-го вида до разрушения можно определить приближенно как решение универсального уравнения Мэнсона

,

где ***Δεj*** – размах деформаций ***j***-го цикла нагружения детали.

Задавая значения ***Δε*** и ***σm***, а также значения параметров ***ψj***, ***σв j***, ***Ej***, соответствующих температур ***Тj*** в критической точке, можно определить количество ***Nр.j*** циклов до разрушения.

Величину размаха деформаций ***Δεj*** в критической точке детали для ***j***-го цикла нагружения обычно определяют по формуле

,

где ***σmax j*** и ***σmin j*** – максимальное и минимальное напряжение в ***j***-м цикле нагружения, а ***Е***(***Т***(***σmax j***)) и ***Е***(***Т***(***σmin j***)) – соответствующие им значения модуля упругости материала.

Обычно уравнение Мэнсона решается относительно ***Nр.j*** методом последовательных приближений.

* + 1. **Запасы долговечности и прочности детали**

Согласно модели разрушения лопатки имеют вид:

* по критерию ДП

;

* по критерию МЦУ

,

где ***ПДП Σ*** и ***ПМЦУ Σ*** – накопленные повреждения;

***Nр*** – количество реализованных ОПЦ на момент разрушения.

Величины ***ПДП.Σ*** относят к некоторому эквивалентному установившемуся режиму, на котором время работы равно ***tэкв***, а время до разрушения – ***tр.экв****.* Обычно в качестве такого режима выбирают максимальный режим работы двигателя.

Тогда



где  – запас долговечности детали по критерию ДП.

Из формул и можно установить связь между текущим запасом долговечности ***КДПt***(***N***) и количеством ОПЦ

.

Известно также, что, исходя из модели «кривые длительной прочности», можно установить связь между запасом долговечности ***КДПt*** и прочности 

 ,

где ***m1*** – показатель степени в модели ДП материала детали.

Тогда из следует, что

 .

Величину ***ПМЦУ.Σ*** также относят к некоторому количеству эквивалентных циклов ***Nэкв***, число которых до разрушения по критерию МЦУ равно***Nр экв***.

Выполнив преобразования, аналогичные вышеприведенным, можно получить следующие зависимости для определения запасов долговечности ***КМЦУN*** и прочности ***КМЦУΔε*** по критерию МЦУ

;

,

где ***m2*** – показатель степени в модели МЦУ материала детали типа .

* + 1. **Показатели безотказности работы и ресурс лопатки**

Приведенные выше зависимости запасов прочности ***КДПσ***(***N***), ***КМЦУΔε*** и долговечности ***КДПt***(***N***), ***КМЦУN*** по критериям ДП и МЦУ, определяемые формулами , и , соответственно, являются детерминированными показателями безотказности детали по наработке.

Наработка по малоцикловой усталости определяется текущим числом ОПЦ – ***N***, а по длительной прочности – в часах ОПЦ ***tΣ*** = ***N***·***tОПЦ***, где ***tОПЦ*** – длительность ОПЦ. То есть, и для длительной прочности наработка может выражаться числом ОПЦ – ***N*** (при известном ***tОПЦ***).

Для оценок ресурсов детали по критериям ДП и МЦУ при различных запасах прочности и долговечности необходимо на графики кривых безотказности работы данной детали нанести уровни нормированных значений этих запасов, как показано на рис. 4.5. Точки пересечения указанных уровней с кривыми безотказности отвечают величинам соответствующих ресурсов ***RДП σ***, ***RДП t***, ***RМЦУ Δε*** и ***RМЦУ N***.

0

1

[n]

Запас

прочности

или

долговечности

Ресурс

лопатки

N, количество ОПЦ

*tΣ =N·tОПЦ,* часы ОПЦ

нормированный запас

Отказ с

вероятностью 50%

Рис. 4.5. К вопросу определения ресурсов лопатки по кривым ее безотказной работы

* 1. **Задачи работы**

К выполнению предлагаются следующие задачи:

1. Расчет повреждения лопатки турбины ***ΠДП***по критерию длительной прочности за один обобщенный полетный цикл.
2. Расчет повреждения лопатки ***ПМЦУ*** по критерию малоцикловой усталости за один обобщенный полетный цикл.
3. Построение детерминированных кривых безотказности лопатки – зависимостей изменения запасов ее прочности и долговечности от наработки.
4. Анализ взаимосвязи ресурсов лопатки по критериям длительной прочности и малоцикловой усталости.
   1. **Исходные данные к работе**

Объектом исследований является рабочая лопатка первой ступени турбины авиационного ГТД, термонапряженное состояние которой ранее определено студентами при выполнении домашних заданий или курсовых проектов.

О ней необходимо иметь следующую информацию:

* название и назначение авиационного ГТД (двигателя-прототипа);
* материал лопатки и его основные свойства;
* частота вращения ротора турбины ***n*взл** на взлетном (максимальном) режиме;
* напряжение ***σ*взл** и соответствующая ему температура ***Т***(***σ*взл**) в критической точке лопатки на взлетном режиме работы двигателя.

Упрощенный ОПЦ двигателя имеет вид, показанный на рис. 4.6.

малый

газ

крейсерский

взлетный

Режим

***n*max**

***n*крейс**

***n*МГ**

***t*взл**

***t*крейс 1**

**1**/**2*t*взл 2**

**1**/**2*t*взл 3**

***t*крейс 2**

***t*крейс 3**

***t***, мин

Рис. 4.6. Обобщенный полетный цикл двигателя

Продолжительность режимов ОПЦ:

***tвзл*** = ***4*** мин, ***tкрейс 1*** = ***60*** мин, ***tкрейс 2*** = ***tкрейс 3*** = ***26*** мин.

Относительная частота вращения ротора турбины на крейсерском режиме работы двигателя:

.

Набор необходимых данных о прочностных свойства материала рабочей лопатки турбины выбрать из приложения 3.

Показатель степени в модели МЦУ рекомендуется принять равным ***m2*** = ***20***.

В качестве нормированных в отрасли допустимых запасов для рабочих лопаток турбины следует принять:

– по прочности: [***КДПσ***] = [***КМЦУΔε***] = ***1,3***;

– по долговечности: [***КМЦУN***] = ***10,0***.

* 1. **Порядок проведения работы**

Каждый студент согласует с преподавателем данные по термонапряженному состоянию рабочей лопатки и параметры ОПЦ.

Решение задач работы следует проводить в следующей последовательности.

* + 1. **Задача 1. Расчет повреждения лопатки *ΠДП* по ДП за один ОПЦ**
  1. Предполагая равенство температур ***Т*max** ≈ ***T*крейс** на взлетном и крейсерском режимах, рассчитать напряжения на крейсерском режиме по формуле

.

Как показывает практика, повреждения на режимах малого газа пренебрежимо малы по сравнению с повреждениями на режимах работы двигателя, близких к максимальным – отличия в значениях ***ПДПМГ*** и ***ПДП*взл** достигают нескольких порядков. Это дает основание исключить из последующих расчетов низкие режимы работы двигателя.

* 1. По модели Ларсона-Миллера (см. приложение 4) рассчитать значения времени до разрушения ***tp* взл** и ***tp* крейс** на взлетном и крейсерском режимах, используя формулу .
  2. Определить повреждение лопатки ***ПДП ОПЦ*** ко критерию длительной прочности за один ОПЦ согласно формуле

,

где ***Σt*взл** и ***Σt*крейс** – суммарное время работы двигателя за один ОПЦ на режимах взлетном и крейсерском соответственно.

* + 1. **Задача 2. Расчет повреждения лопатки *ПМЦУ ОПЦ* по МЦУ   
       за один ОПЦ**

Из анализа ОПЦ следует, что в нем выделяются один основной цикл (режим 0 – режим взлетный – режим 0) и два подцикла (режим крейсерский – режим взлетный – режим крейсерский).

* 1. Рассчитать размахи деформаций ***Δε1*** и ***Δε2*** для основного цикла и подциклов нагружения соответственно, используя формулу

;

.

* 1. Определить средние напряжения ***σm 1*** и ***σm 2***, соответствующие основному и подциклу нагружения рабочей лопатки турбины, согласно формуле

,

где ***σ*max *j*** и ***σ*min *j*** – максимальное и минимальное напряжения в критической точке рассматриваемой детали в соответствующем цикле ее нагружения.

* 1. Определить количество основных циклов до разрушения ***Nр взл*** и ***Nр крейс*** из уравнения Мэнсона , подставив в него значения ***Δε1***, ***σm 1*** и ***Δε2***, ***σm 2*** соответственно.

Уравнение необходимо решить дважды – для основного цикла (***j*** = ***1***) и подцикла (***j*** = ***2***) нагружения лопатки. Для этого следует вычислить значения коэффициентов ***Аj*** и ***Bj*** уравнения, остающихся постоянными для заданного цикла нагружения:

.

Тогда правая часть уравнения принимает вид

.

Задавая различные возрастающие значения ***NP j*** = 10, 30, 102, 3·102, 103, 3·103, 104, 105, 106 и т.д., рассчитывать значения ***Δεj\**** и величину ***δj*** их несоответствия значению, определенному по формуле :



до достижения изменения знака ***δj***.

Для ***j*** = ***1***, ***2*** найти искомые решения ***NP.j*** как координаты точек, в которых ***δj*** = ***0***, то есть уравнение превращается в тождество. Для этого можно использовать линейную интерполяцию зависимости ***δj***(***Nр j***) между двумя последними значениями (см. рис. 4.7).

Результаты решения уравнения Мэнсона для основного и подциклов нагружения занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Результаты решения уравнения Мэнсона

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **NN** | ***Δεj*** | ***Np j*** | (***Np j***)***–0,6*** | (***Np j***)***–0,12*** | ***Aj*** (***Np j***)***–0,6*** | ***Bj*** (***Np j***)***–0,12*** | ***Δεj\**** | ***δj*** |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |

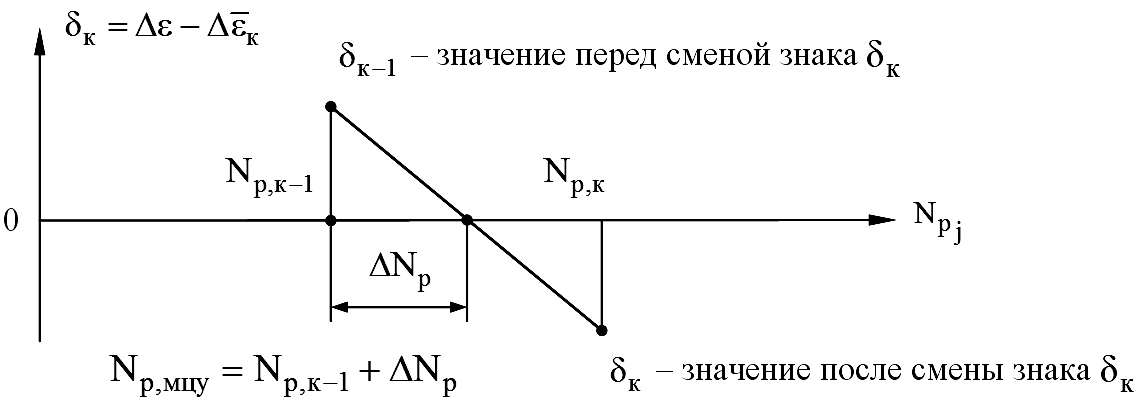


Рис. 4.7. Графическое решение уравнения Мэнсона

* 1. Рассчитать повреждение ПМЦУ ОПЦ по МЦУ для одного ОПЦ по следующей формуле, вытекающей из формулы :

.

* + 1. **Задача 3. Построение детерминированных кривых безотказности лопатки турбины**

1. Вычислить показатель степени ***m1*** модели «кривые длительной прочности», соответствующий условиям нагружения лопатки турбины на взлетном режиме работы двигателя по формуле

.

1. Используя найденный показатель степени ***m1*** и величину нормированного запаса прочности [***КДПσ***], определить значение нормированного запаса долговечности [***КДПt***] по критерию ДП, используя формулу .
2. Для различных значений наработки ***NОПЦ*** в количествах ОПЦ рассчитать коэффициенты запасов долговечности и прочности по критериям ДП и МЦУ

***KДПt***(***N***), ***KДПσ***(***N***), ***KМЦУN***(***N***), ***KnМЦУΔε***(***N***)

по формулам , , и соответственно.

Результаты вычислений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. Результаты определения запасов прочности и долговечности

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№№** | **Наименование коэффициентов запасов** | **расчет по формуле** | **N** | | | | |
| 1 | 10 | 102 | 103 | ......................... |
| 1 | ***KДПt***(***N***) | (4) |  |  |  |  |  |
| 2 | ***KДПσ***(***N***) | (5) |  |  |  |  |  |
| 3 | ***KМЦУN***(***N***) | (7) |  |  |  |  |  |
| 4 | ***KМЦУΔε***(***N***) | (8) |  |  |  |  |  |

1. В соответствии с рис. 4.5 построить рассчитанные зависимости коэффициентов запасов долговечности и прочности лопатки от количества ОПЦ – детерминированные показатели безотказности лопатки по наработке. Каждый из показателей изобразить на отдельном рисунке.
2. Используя нормированные допустимые значения коэффициентов запасов и графики показателей безотказности лопатки, построенные на предыдущем этапе, найти значения ресурсов ***R***. Для этого на графиках текущих запасов долговечности ***KДПt***(***N***) и ***KМЦУN***(***N***) нанести горизонтальную линию [***KДПt***] или [***KМЦУN***] соответственно. Точки пересечения ***KДПt***(***N***) с [***KДПt***], ***KМЦУN***(***N***) с [***KМЦУN***] и дадут значения долговечностей по критериям ДП и МЦУ соответственно (см. рис. 4.5).

Полученные значения ресурсов внести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3. Результаты определения ресурсов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Нормированные запасы | Виды ресурсов | Величины ресурсов | |
| в количествах ОПЦ | в часах ОПЦ |
| [***KДПt***] = … | ***RДПt*** |  |  |
| [***KМЦУN***] = ***10,0*** | ***RМЦУN*** |  | **—** |
| [***KДПσ***] = ***1,3*** | ***RДПσ*** |  |  |
| [***KМЦУΔε***] = ***1,3*** | ***RМЦУΔε*** |  | **—** |

1. Провести анализ полученных оценок ресурсов лопатки турбины и сформулировать соответствующие выводы.
   1. **Отчет по работе**

Отчет должен содержать:

1. Информацию об исследуемой рабочей лопатке турбины.
2. Вид упрощенного ОПЦ.
3. Основные расчетные формулы.
4. Расчеты повреждений ***ΠДП ОПЦ*** и ***ПМЦУ ОПЦ*** по критериям ДП и МЦУ за один ОПЦ.
5. Таблицу 4.1 результатов решения уравнения Мэнсона.
6. Рис. 4.7 для каждого (***j*** = ***1*** и ***j*** = ***1***) из циклов нагружения лопатки.
7. Таблицу 4.2 результатов расчетов показателей безотказности лопатки.
8. Графики зависимостей показателей безотказности лопатки по наработке ***NОПЦ*** (всего 4 рисунка).
9. Таблицу 4.3 результатов расчета ресурсов.
10. Основные выводы по результатам определения ресурсов лопатки.
    1. **Вопросы для самоконтроля**
11. Что называют мгновенным пределом текучести?
12. Какое предположение лежит в основе изотропной модели упрочнения материала?
13. Что такое эффект Баушингера.
14. В чем заключается принцип Мазинга?
15. Что называют малоцикловой усталостью? Приведите пример деталей ГТД, в которых данное явление может проявляться.
16. Какие параметры, характеризующие циклическое нагружение, описывают различные модели усталости?
17. Как влияет асимметрия цикла нагружения на сопротивление повторным деформациям?
18. Дайте определение повреждению детали по критериям ДП и МЦУ.
19. В чем заключается принцип линейного суммирования повреждений?
20. Какая связь между запасами прочности, долговечности и повреждениями?

# Расчетные исследования трещиностойкости рабочей лопатки турбины авиационного ГТД

***Цель работы***

Исследование зависимости циклической трещиностойкости лопатки от параметров циклических нагрузок и значений начального размера трещины ***a0***.

* 1. **Основные положения**

До недавнего времени долговечность деталей авиационных ГТД определялась временем или количеством циклов нагружения до появления микротрещины длиной более 0,8…1 мм. Однако наличие трещины в детали далеко не всегда означает потерю ее работоспособности. Для многих деталей время работы при наличии трещины, которое характеризует так называемую живучесть, может составлять до 30…40% их ресурса.

В связи с этим классические методы расчета деталей на прочность дополняют методами механики разрушения, которые позволяют описать законы развития трещин в условиях действия длительных статических и циклических нагрузок.

Практика показывает, что на рост трещин основное влияние оказывает циклическое нагружение. Поэтому в данной работе изучаются основные закономерности роста трещины в рабочей лопатке турбины под воздействием циклического нагружения. Применительно к показателям нагружения лопатки рассматривается развитие макротрещин, возникших как в процессе эксплуатации в виде микротрещин, так и от начальных технологических дефектов при циклических нагрузках различной природы.

* + 1. **Критический размер трещины**

В качестве характеристики сопротивления материала развитию трещины в механике разрушения используются значения коэффициентов интенсивности напряжений ***K***, являющихся функцией полудлины трещины ***a***, формы трещины, расположения ее на детали и приложенного номинального напряжения ***σ***.

В общем случае ***K*** определяется как

,

где ***М*** – функция, зависящая от формы трещины и расположения ее относительно направления действующих усилий (реализуется условие растяжения, сдвига или среза).

Для условий циклического нагружения с постоянным размахом номинальных напряжений  формула принимает вид

.

В этом случае по мере увеличения числа циклов размах коэффициента интенсивности напряжений возрастает за счет роста длины трещины.

Будем предполагать, что в области корневого сечения лопатки возникает или начально существует поверхностная полукруглая трещина, для которой

,

где *θ* – угловая координата точек границ трещины.

Для точки на поверхности ***θ***=***π***. Поэтому в соответствии с для последующих расчетов принимаем ***М***=4,13.

Зная значения ***М*** и размаха номинальных напряжений ***Δσ*** в детали при циклической нагрузке, можно определить критический размер трещины – полудлину , при котором начинается ее самопроизвольный лавинный рост, т.е. разрушение детали (лопатки). Состояние разрушения соответствует условию

 ,

где  – вязкость разрушения при температуре ***Т*** или предельное значение коэффициента интенсивности напряжений ***K1***, соответствующие такому сочетанию ***Δσ*** и ***a***, при которых начинается лавинный рост трещины.

Вязкость разрушения определяют при температуре 20°С на стандартных образцах, имеющих соотношение размеров (ширины и толщины), при котором реализуется плоское деформированное состояние в зоне распространения трещины.

Величина  при повышенных температурах обычно определяется пересчетом по формуле

,

где  и  – пределы текучести материала при температурах ***Т*** и 20°С соответственно.

Таким образом, исходя из , при условии величину критической полудлины трещины находят по формуле

.

* + 1. **Рост трещины при циклическом нагружении**

В качестве модели роста трещины при циклическом нагружении принимается зависимость скорости роста трещины **d*a*/d*N*** от размаха коэффициента интенсивности напряжений ***ΔK****.* Эта зависимость удовлетворительно описывается степенным уравнением Пэриса

,

где N – количество циклов нагружений.

Постоянные ***С0*** и ***n*** предварительно определяются по результатам специальных исследований на плоских образцах материала лопатки. При решении уравнения используются размерности: ***ΔK1***– [кгс/мм3/2] и **d*a*/d*N*** – [мм/цикл].

Для каждого материала имеются пороговые значения: минимальное ***ΔK*min**, при котором трещина не растет, и критическое ***ΔK*max** = ***ΔK1 кр***, при котором трещина лавинообразно удлиняется.

Для определения числа циклов, в течение которых трещина развивается от размера ***a*** = ***a0*** до критического ***aкр***, в уравнение необходимо подставить значение ***ΔK*** из уравнения . Тогда получим уравнение Пэриса в виде

.

Его решение относительно ***N***имеет вид

.

Решение положим в основу исследований трещиностойкости лопатки, рассматриваемой в настоящей лабораторной работе.

* 1. **Задачи лабораторной работы**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить значения вязкости разрушения материала и критические размеры трещины ***aкр*** при нагружении, соответствующем максимальному (взлетному) режиму работы двигателя. Размеры начальных дефектов ***a0*** и ***a1*** указаны в строках 1 и 2 таблицы 5.4.
2. Вычислить трещиностойкость лопатки на первом этапе развития трещины от исходного технологического дефекта ***a0*** до величины микротрещины ***a1*** (определить количество ОПЦ ***Nкр 1***).
3. Определить продолжительность этапа живучести ***Nкр 2*** развития трещины от микротрещины с полудлиной ***a1*** до макротрещины критических размеров ***aкр***. Результаты вычислений занести в строки 1 и 2 таблицы 5.4.
4. Найти для основного цикла нагружения максимальный размер начальной трещины ***a0***, допускающий выполнение 102, 103, 104 полетных циклов. Заполнить строки 3, 4, 5 таблицы 5.4.
5. Рассчитать трещиностойкость лопатки ***Nкр вибр*** относительно повышенных вибраций на взлетном режиме для двух значений начальных дефектов. Исходя из заданной продолжительности ***t*max** работы двигателя на взлетном режиме, определить количество полетных циклов ***NОПЦ***, соответствующее ***Nкр вибр***. Результаты занести в строки 6 и 7 таблицы 5.4.
   1. **Исходные данные для расчетов**
      1. **Свойства материала лопатки**

Материал лопатки – сплав ЖС-6КП.

Таблица 5.1. Параметры уравнения Пэриса и величина  для сплава ЖС-6КП

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Т*,** °С | ***r*** | ***n*** | ***C0*** | , МПа/мм1/2 |
| 20 | 0 | 3,49 | 1,04·10-9 | 25 |
| 800 | 0 | 3,32 | 5,56·10-9 |  |
| 1000 | 0 | 4,22 | 2,8·10-8 |  |

Таблица 5.2. Зависимость предела текучести сплава ЖС-6КП от температуры

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Т***, ºС | 20 | 800 | 900 | 1000 |
| , МПа | 850 | 800 | 520 | 320 |

* + 1. **Параметры нагружения лопатки**

В настоящей работе объектом исследований является лопатка с вариантами параметров нагружения, приведенными в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры нагружения лопатки в месте расположения трещины на взлетном режиме

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Варианты** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ***Т***, ºС | 800 | | | | | 1000 | | |
| , МПа | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 80 | 90 | 100 |

Будем предполагать, что лопатка подвержена следующим циклическим нагрузкам:

1. Основным отнулевым (*r*=0) полетным циклом (ПЦ), который в целях упрощения расчетов примем в виде «*0 – взлетный режим – 0*»;
2. На максимальном режиме возникают повышенные вибрации с частотой первой формы собственных изгибных колебаний с амплитудой 10 МПа в области критической точки, т.е. с размахом напряжений ***Δσ2*** = 20 МПа.

Собственная частота колебаний ***f***= ***3,9·103*** Гц.

При этом время работы на взлетном режиме за полетный цикл составляет ***t*max** = 4,5мин.

* + 1. **Исходный размер трещины**

Предполагается рассмотреть несколько значений исходного размера полудлины трещины:

1. возникшая в процессе эксплуатации трещина с ***a1*** = 0,5 мм;
2. начальный технологический дефект с условным значением =0.5·10-2 мм.
   1. **Порядок выполнения работы**

Лабораторная работа выполняется студентом для одного из вариантов параметров нагружения лопатки, заданного преподавателем.

Порядок вычислений определяется таблицей 5.4.

Таблица 5.4. Результаты расчетов трещиностойкости лопатки

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | ***Т***, °С |  | ***Δσ***, МПа | ***aкр*** | ***Nкр i*** | ***a0***, мм |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 |  |  |  |  |  | 0,5·10-1 |
| 2 |  |  |  |  |  | 0,5·10-2 |
| 3 |  |  |  |  | 102 |  |
| 4 |  |  |  |  | 103 |  |
| 5 |  |  |  |  | 104 |  |
| 6 |  |  | 10 |  |  | 0,5·10-1 |
| 7 |  |  | 10 |  |  | 0,5·10-2 |

При определении зависимости вязкости разрушения  от температуры необходимо воспользоваться формулой и данными таблицы 5.2.

При определении критических размеров трещины ***aкр*** для различных значений ***a0*** значение параметра ***М*** в формуле принять равным ***М*** = 4,13.

Количество циклов до разрушения определяется по формуле с параметрами ***n*** и ***C0***, которые выбираются исходя из таблицы 5.1 в соответствии с заданным вариантом нагружения лопатки.

Критическое число циклов нагружения лопатки вибронапряжеиями необходимо оценивать с учетом заданной продолжительности максимального режима работы двигателя за один ОПЦ ***t*max**. Количество ***NОПЦ***, за которое полудлина  трещины от вибронапряжений не превышает ***aкр***, определяется по формуле

,

где ***NОПЦ*** и ***Nкр вибр***– количество полетных циклов и виброциклов соответственно до появления трещин критического размера ***aкр***, полученного в задаче 1 (строки 1 и 2 таблицы 5.4).

Сделать общие выводы по итогам исследования.

* 1. **Отчет по работе**

В отчете должны быть приведены:

1. Основные расчетные формулы;
2. Занесенные в таблицу 5.4 значения параметров нагружения лопатки;
3. Все принятые для расчетов значения параметров, определяющих исследуемое явление;
4. Результаты расчетов по всем задачам, а также итоговая таблица 5.4.
   1. **Вопросы для самоконтроля**
5. Что называют коэффициентом интенсивности напряжений?
6. Что является критическим размером трещины?
7. От каких параметров материала зависит критический размер трещины?
8. От каких параметров нагружения зависит критический размер трещины?
9. От каких геометрических параметров зависит критический размер трещины?
10. Что такое вязкость разрушения?
11. Как определить вязкость разрушения для различных температур?
12. Между какими параметрами устанавливает связь уравнение Пэриса?
13. Как определить ресурс детали с трещиной?

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

**Экспериментальные данные по длительной прочности высокотемпературных материалов.**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №№ | Материал | Температура, °С | σ100 | σ500 | σ1000 |
| кг/мм2 | | |
| 1 | ХН77ТЮР  (ЭИ-437Б) | 20 | — | — | — |
| 550 | 80,0 | — | 71,0 |
| 600 | 70,0 | — | 56,0 |
| 700 | 44,0 | — | 31,0 |
| 750 | 32,0 | — | — |
| 800 | 22,0 | — | 11,0 |
| 2 | ЭП718-ИД | 200 | 102,0 | — | — |
| 300 | 99,0 | — | — |
| 500 | 87,3 | — | — |
| 600 | 73,7 | — | — |
| 650 | 49,0 | — | — |
| 700 | 33,4 | — | — |
| 3 | MAR -246 | 760 | 70,0 | — | 62,0 |
| 815 | 53,0 | — | 46,0 |
| 871 | 43,0 | — | 30,0 |
| 982 | 19,0 | — | 13,0 |
| 1038 | 13,4 | — | — |
| 4 | ЭИ-415 | 450 | 52,0 | — | 50,0 |
| 500 | 49,0 | — | 42,0 |
| 550 | 35,0 | — | 32,0 |
| 5 | УДИМЕТ-700 | 815 | 41,0 | — | 30,0 |
| 870 | 29,0 | — | 19,6 |
| 980 | 11,2 | — | — |
| 6 | УАСПАЛОЙ | 650 | 77,0 | — | 60,0 |
| 730 | 50,0 | — | 37,0 |
| 815 | 28,0 | — | 17,0 |
| 870 | 16,0 | — | 12,0 |
| 7 | ЭИ-698 | 200 | 108,0 | — | 104,0 |
| 400 | 110,0 | — | 92,0 |
| 500 | 97,0 | — | 86,0 |
| 600 | 85,0 | — | 69,0 |
| 700 | – | — | 44,0 |
| 8 | ЖС6-КП | 20 | — | — | — |
| 800 | 47,0 | — | 35,0 |
| 900 | 28,0 | — | 14,0 |
| 950 | 19,0 | — | 9,0 |
| 1000 | 10,5 | — | — |
| 1050 | — | — | — |
| 9 | ЖС6У-РК | 900 | 350,0 | — | 250,0 |
| 1000 | 170,0 | — | 100,0 |
| 1100 | — | — | — |
| 10 | ЖС26-ВНК | 900 | 400,0 | 305,0 | 280,0 |
| 1000 | 200,0 | 140,0 | 120,0 |
| 1100 | 90,0 | 45,0 | 55,0 |
| 11 | ЖС32-ВНК  <001> | 900 | 475,0 | 390,0 | 380,0 |
| 1000 | 250,0 | 185,0 | 165,0 |
| 1100 | 125,0 | 85,0 | 75,0 |
| 12 | ЖС32-ВНК  <111> | 900 | — | — | — |
| 1000 | 280,0 | — | 200,0 |
| 1100 | — | — | — |
| 13 | ЖС32М  <001> | 900 | 540,0 | — | 430,0 |
| 1000 | 280,0 | — | 200,0 |
| 1100 | 180,0 | — | 120,0 |
| 14 | ЖС30М-НК  <001> | 900 | 420,0 | — | 320,0 |
| 1000 | 200,0 | — | 165,0 |
| 1100 | 120,0 | — | 80,0 |
| 15 | ЖС36-ВНК  <001> | 900 | 480,0 | — | 360,0 |
| 1000 | 255,0 | — | 165,0 |
| 1100 | 140,0 | — | 90 |
| 16 | ЖС40-НК  <001> | 900 | 440,0 | 350,0 | 315,0 |
| 1000 | 240,0 | 190,0 | 165,0 |
| 1100 | 140,0 | 95,0 | 80,0 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**Построение диаграммы**

1. На панели инструментов *Стандартная* нажимается кнопку *Мастер диаграмм *.

2. Тип диаграммы: *Точечная*

Вид диаграммы: точками (рис. П2.1)

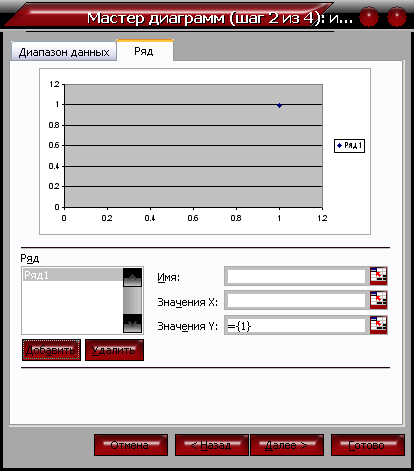
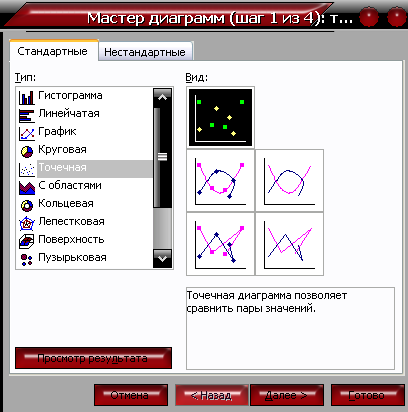
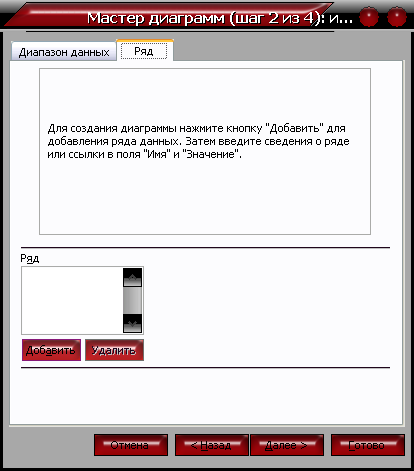
  

Рис .П2.1 Рис. П2.2 Рис. П2.3

Кнопка *Далее*

3. Закладка *Ряд* нажимается кнопка *Добавить* (рис. П2.2)

Мышкой выделяется диапазон *значений X* после установки курсора в соответствующее поле, аналогично заполняется поле *значений Y* (рис. П2.3).

Кнопка *Далее*

4. По желанию настраивается внешний вид диаграммы, заполняя поля меню *Параметры диаграммы*.

Кнопка *Готово.*

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**Аппроксимация данных**

1. На диаграмме нажатием левой кнопки мыши выделяется ряд данных, которые необходимо аппроксимировать.

2. Нажатием правой кнопки на выделенном ряде данных появляется выплывающее меню (рис. П3.1). Выбирают команду *Добавить линию тренда*.

3. На вкладке *Тип* меню *Линия тренда* выбирают *Полиномиальный* тип линии тренда. Степень– *3*. (рис. П3.2)

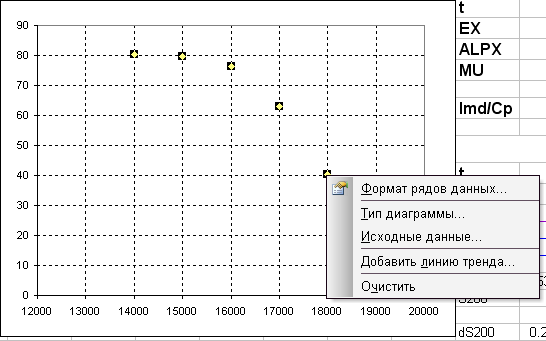
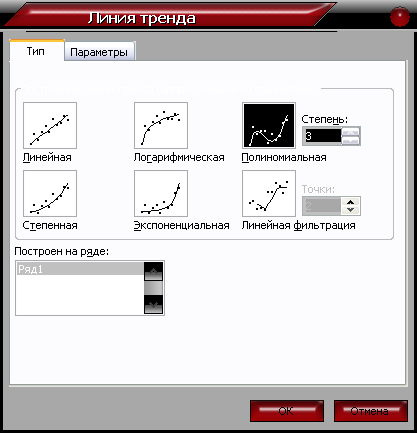
 

Рис. П3.1 Рис. П3.2

1. На вкладке *Параметры* меню *Линия тренда* выбирают пункт *Показывать уравнение на диаграмме*. (рис. П3.3)

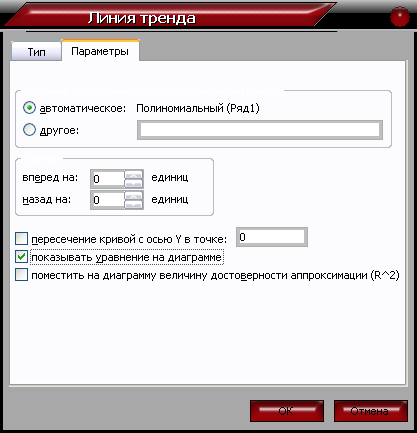
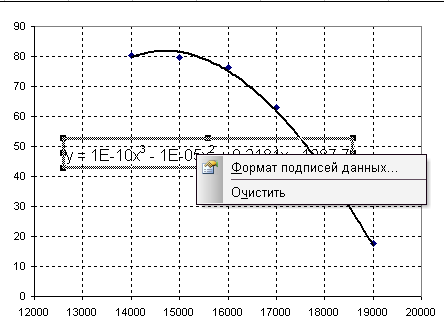
 

Рис. П3.3 Рис. П3.4

Кнопка *OK*

5. Нажатием правой кнопки мыши в области уравнения линии тренда выбрать *Формат подписей данных* для изменения формата числа (рис. П3.4).

6. Закладка *Число* меню *Формат подписей данных* выбрать *Экспоненциальный*, число десятичных знаков – *4* (рис. П3.5).

Кнопка *OK*

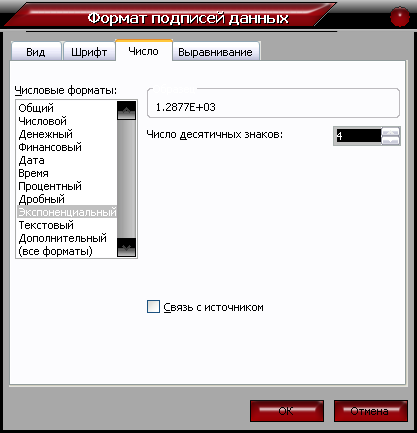


Рис. П3.5

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

**Экспериментальные данные по свойствам материала лопатки**

**Свойства материала ЖС-32**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **T, ºС** | 20 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1150 | 1200 |
| **E, 1011Па** | 1.3734 | 1.2263 | 1.1772 | 1.1282 | 1.0457 | 0.981 | 0.9153 | 0.8858 | 0.8564 |
| **α, 10-51/ºС** | 1.33 | 1.37 | 1.4 | 1.45 | 1.5 | 1.57 | 1.64 | 1.68 | 1.72 |
| **σв·,МПа** | 931.95 | 824.04 | 833.8 | 873.09 | 843.66 | 647.46 | 412.02 | 274.68 | 274.68 |
| **φ,%** | 26.5 | 19 | 18.5 | 15.5 | 23 | 29 | 29.5 | 29.5 | 29.5 |

Модель Ларсона-Миллера для материала ЖС-32

lg σ= -2.0317·10-13(Pл-м)3 + 8.0744·10-9(Pл-м)2 - 9.8401·10-5(Pл-м) + 3.2776

**Свойства материала ЖС-6**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **T, ºС** | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1050 | 1110 |
| **α, 10-51/ºС** | 1.14 | 1.14 | 1.17 | 1.21 | 1.23 | 1.25 | 1.27 | 1.29 | 1.32 | 1.37 | 1.45 | 1.54 | 1.57 |
| **E, 1011Па** | 2.00 | 1.95 | 1.93 | 1.90 | 1.85 | 1.80 | 1.75 | 1.68 | 1.57 | 1.41 | 1.25 | 1.15 | 1.10 |
| **σв·,МПа** | 950 | – | – | – | – | – | – | – | 900 | 770 | 530 | 450 | – |
| **φ,%** | 11 | – | – | – | – | – | – | – | 10 | 6 | 7 | 7 | – |

Модель Ларсона-Миллера для материала ЖС-6

lg σ= 7.4806·10-14(Pл-м)3 - 1.5334·10-8(Pл-м)2 + 5.2522·10-4(Pл-м) - 2.1190

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5**

**Словарь терминов**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Русский** | **Українська** | **English** |
| Безотказность | Безвідмовність | Reliability |
| Время до разрушения | Час до руйнування | Rupture life |
| Деформация остаточная | Залишкова деформація | Permanent deformation |
| Диаграмма деформирования | Діаграма деформування | Deformation curve |
| Долговечность | Довговічність | Durability |
| Живучесть (детали) | Живучість | Survivability |
| Изотропный материал | Ізотропний матеріал | Isotropic material |
| Интенсивность напряжений | Інтенсивність напружень | Stress intensity |
| Испытания кратковременные | Короткочасні випробування | Short-term test |
| Концентратор напряжений | Концентратор напружень | Stress concentrator |
| Коэффициент интенсивности напряжений | Коефіцієнт інтенсивності напружень | Stress intensity factor |
| Кривая ползучести обобщенная | Узагальнена крива повзучості | Generalized creep curve |
| Критерий | Критерій | Criterion |
| Модуль упругости | Модуль пружності | Modulus of elasticity, Young’s modulus |
| Нагружение | Навантаження | Loading |
| Нагруженность | Навантаженість | Stress loading |
| Надрез | Надріз | Notch |
| Напряжение | Напруження | Stress |
| Напряженно-деформированное состояние | Напружено-деформований стан | Stress-deformed state |
| Наработка | Напрацювання | Operating time |
| Натяг | Натяг | Negative allowance |
| Несжимаемый | Нестисливий | Incompressible |
| Отклонение | Відхилення | Deviation |
| Пластическое течение | Пластична плинність | Plastic yielding |
| Пластичность | Пластичність | Plasticity |
| Площадка текучести | Площадка текучості | Elastic range |
| Повреждение | Пошкодження | Damage |
| Повреждаемость | Пошкоджуваність | Damaging |
| Полетный цикл обобщенный | Узагальнений польотний цикл | Generalized flight cycle |
| Ползучесть | Повзучість | Creep |
| Предел временного сопротивления | Границя тимчасового опору | Ultimate stress |
| Предел пропорциональности | Границя пропорційності | Limit of proportionality |
| Предел выносливости | Границя витривалості | Fatigue limit |
| Предел прочности | Границя міцності | Strength limit |
| Предел прочности истинный | Справжня границя міцності | True strength limit |
| Предел текучести | Границя текучості | Yield stress |
| Предел текучести мгновенный | Миттєва границя текучості | Current yield stress |
| Предел текучести условный | Умовна границя текучості | Conventional yield stress |
| Предел упругости | Границя пружності | Elastic limit |
| Приращение | Приріст | Deviation |
| Приспособляемость | Пристосованість | Adaptability |
| Прочность | Міцність | Strength |
| Прочность временная | Тимчасова міцність | Temporal strength |
| Прочность длительная | Тривала міцність | Long-term strength |
| Работоспособность (детали) | Працездатність | Operability |
| Разброс | Розкид | Dispersion |
| Размах деформаций | Розмах деформацій | Amplitude range |
| Разрушение | Руйнування | Fracture |
| Релаксация напряжений | Релаксація напружень | Stress relaxation |
| Ресурс | Ресурс | Lifetime |
| Секущий модуль | Січний модуль | Secant modulus |
| Скорость ползучести | Швидкість повзучості | Creep rate |
| Сплав жаропрочный | Жароміцний сплав | Heat resistant alloy |
| Сталь легированная | Легована сталь | Alloy steel |
| Сталь малоуглеродистая | Маловуглецева сталь | Mild steel |
| Сталь углеродистая | Вуглецева сталь | Carbon steel |
| Статическая прочность | Статична міцність | Static strength |
| Сужение относительное | Відносне звуження | Contraction ratio |
| Текучесть | Текучість | Yield |
| Термопластичность | Термопластичність | Thermoplasticity |
| Трещина | Тріщина | Crack |
| Трещиностойкость | Тріщиностійкість | Crack resistance |
| Удлинение | Подовження | Elongation |
| Удлинение относительное | Відносне подовження | Specific elongation |
| Упрочнение анизотропное | Анізотропне зміцнення | Anisotropic hardening |
| Упрочнение изотропное | Ізотропне зміцнення | Isotropic hardening |
| Упругость | Пружність | Elasticity |
| Усилие затяжки | Зусилля затягування | Pull-force |
| Усталость малоцикловая | Малоциклова втома | Low cycle fatigue |
| Шейка образца | Шийка зразка | Neck of specimen |

**РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОСОБИЯ**

1. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иоселевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Гохфельд Д.А. и др. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник / Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.
3. Термопрочность деталей машин. Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: Учеб. пособие для вузов / Ю.Н. Работнов. – 2-е изд. испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. –712 с.
5. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, подтверждение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
6. Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
7. Колотников М.Е. Предельные состояния деталей и прогнозирование ресурса газотурбинных двигателей в условиях многокомпонентного нагружения / под ред. д.т.н., проф. В.М. Чепкина. – Рыбинск: изд-во РГАТА, 2003. – 136 с.
8. Броек Д. Основы механики разрушения. М., 1980.
9. Ресурсное проектирование АГТД. Руководство для конструкторов. Труды ЦИАМ, 1990.
10. Крикунов Д.В. Оценка прочностного ресурса деталей ГТД. Харьков, ХАИ, 2005.

СОДЕРЖАНИЕ

[Условные обозначения и сокращения 2](#_Toc476849518)

[Введение 5](#_Toc476849519)

[1 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ 6](#_Toc476849520)

[2 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБУСЛОВЛЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ДЕТАЛИ   
С ЖЕСТКИМИ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ 15](#_Toc476849521)

[3 РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСКА ТУРБИНЫ В ОБЛАСТИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ 25](#_Toc476849522)

[4 АНАЛИЗ РЕСУРСА РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ 38](#_Toc476849523)

[5 РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ   
РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ АВИАЦИОННОГО ГТД 57](#_Toc476849524)

[Приложение 1 64](#_Toc476849525)

[Приложение 2 66](#_Toc476849526)

[Приложение 3 67](#_Toc476849527)

[Приложение 4 69](#_Toc476849528)

[Приложение 5 70](#_Toc476849529)

[Рекомендуемые пособия 73](#_Toc476849530)