



Тема: Исследование и выбор критериев длительной прочности дисков турбин на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных

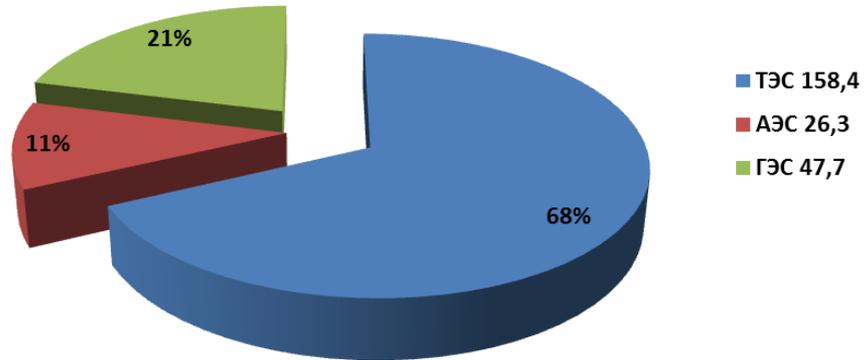
Выполнил: Артамонов К.П.

Руководители: к.ф.-м.н. Ермакова Н.Ю.
к.т.н. Тихомиров С.А.

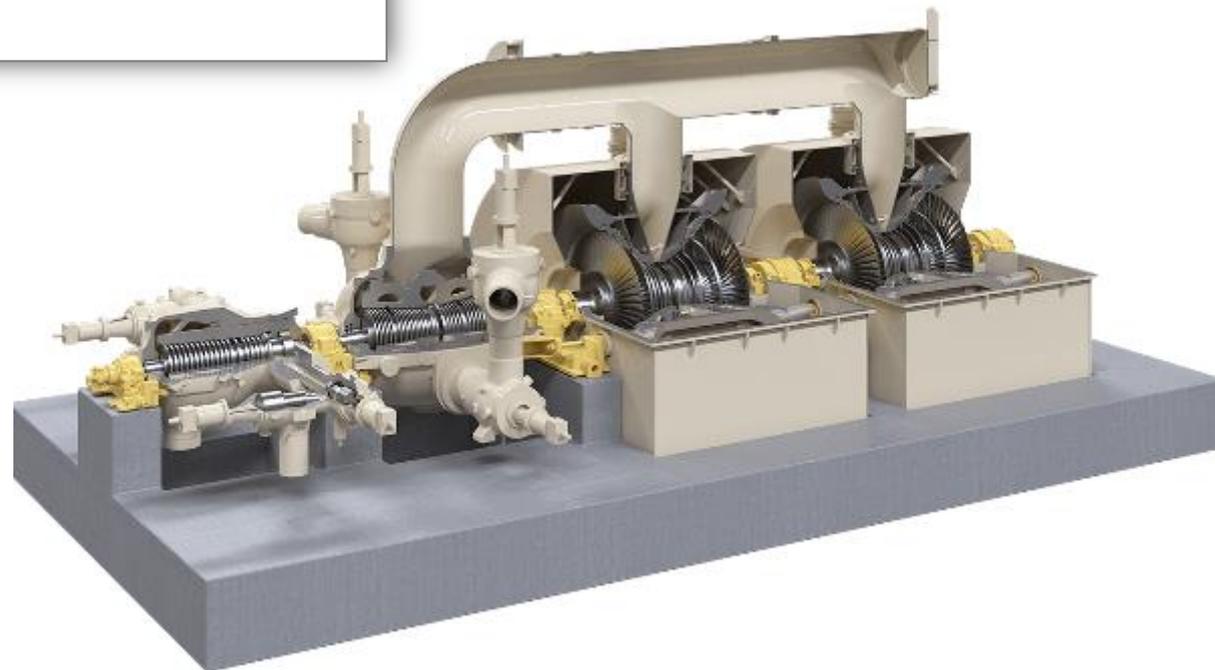
Санкт-Петербург
2016г.

Актуальность

Структура мощностей электростанций РФ,
тыс. МВт.



На тепловых электростанциях (ТЭС) производится около 90% всей мировой электроэнергетики



Актуальность

Каширская
ГРЭС -4



Кинетическая энергия $0,67 \cdot 10^9$ Нм

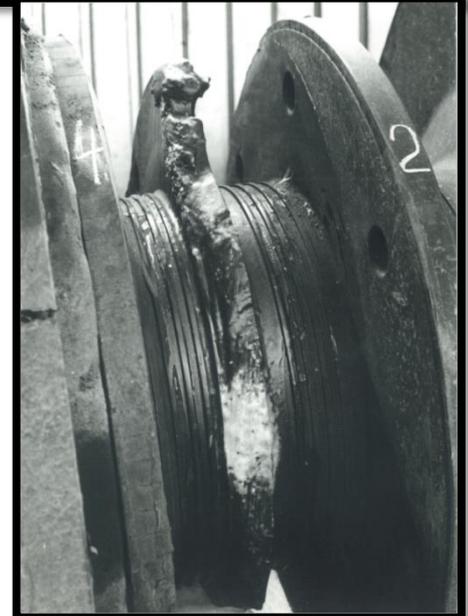
ТЭЦ-20 Мосэнерго



Следствие



Причина



Целью работы является выработка критерия длительной конструкционной прочности на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных

Эксперимент

Задача:

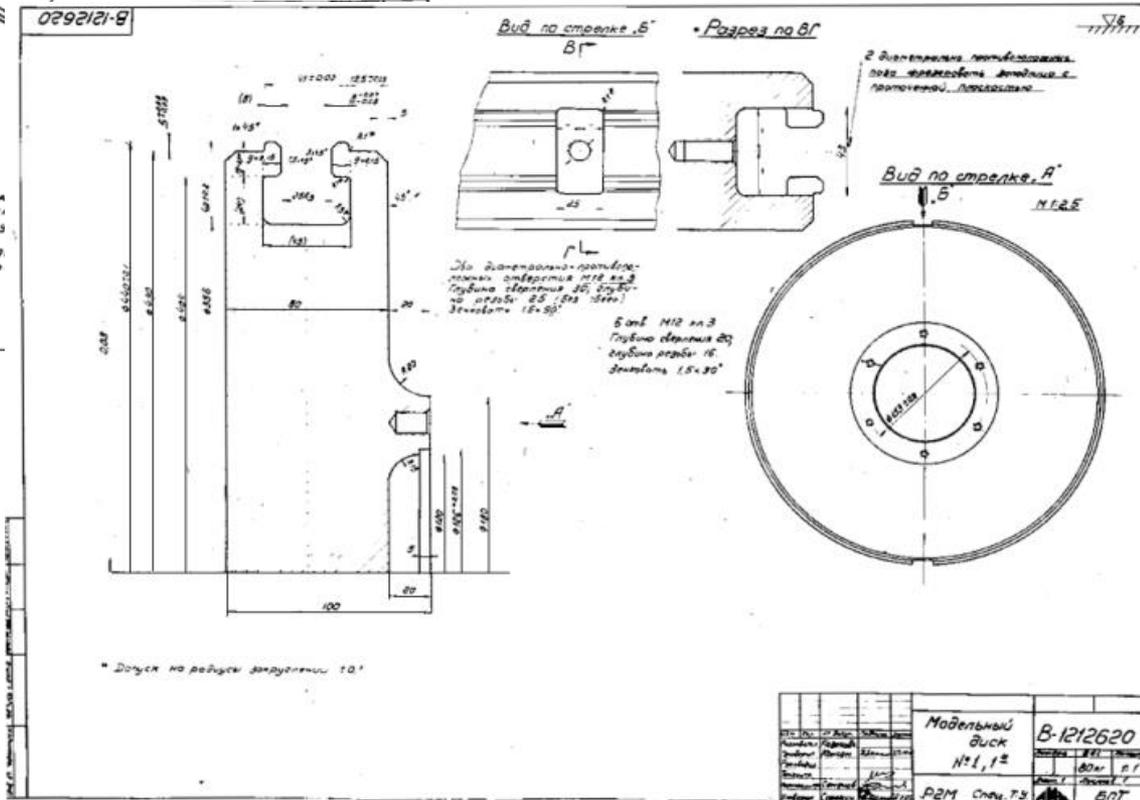
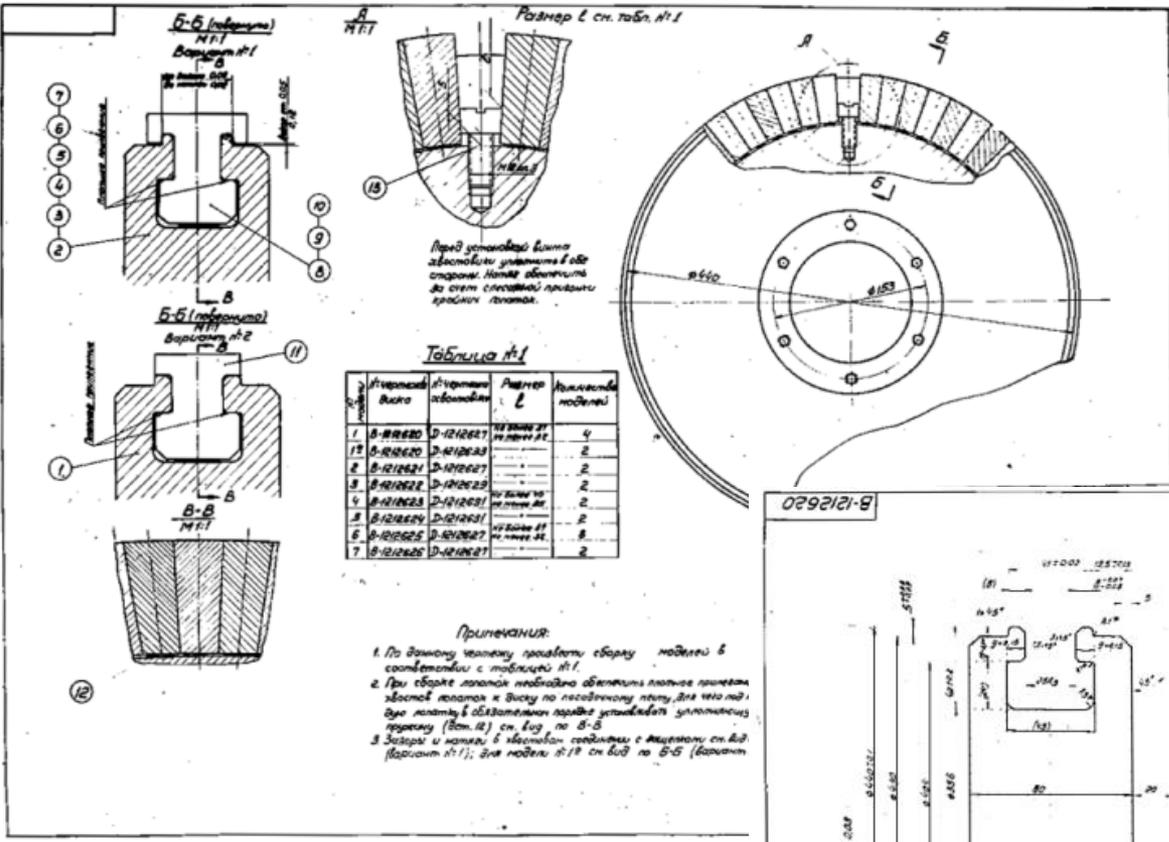
Исследование длительной прочности ободов дисков с Т-образным хвостовым соединением.

Описание:

- Исследования поставлены на моделях из стали Р2М
- Испытания проводились при $T=550-565^{\circ}\text{C}$
- Применялась сталь в искусственно охрупченном состоянии

Описание моделей конструкции модельных дисков

Геометрическое отношение параметров близко к параметрам натуральных ободов.



Сохранение характера распределения напряжений и соотношения главных напряжений

Модельный диск	В-1212620
№1, 12	80 мм. 12
РМ	См. 73
БП	БП

Методика испытаний

- Проводились при постоянном числе оборотов (8750 и 7500 об/мин)

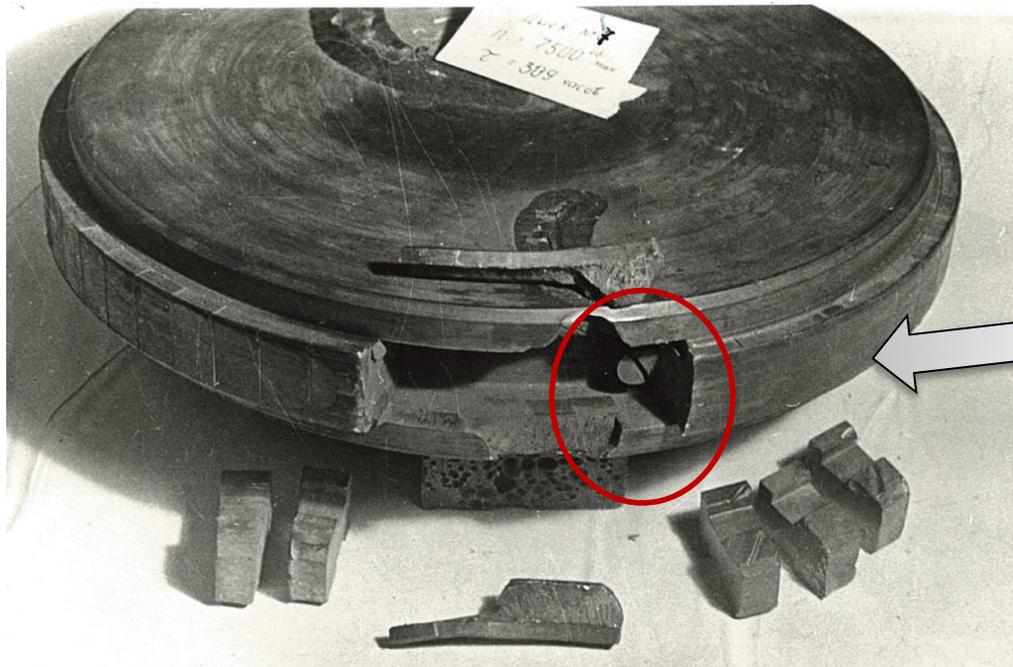
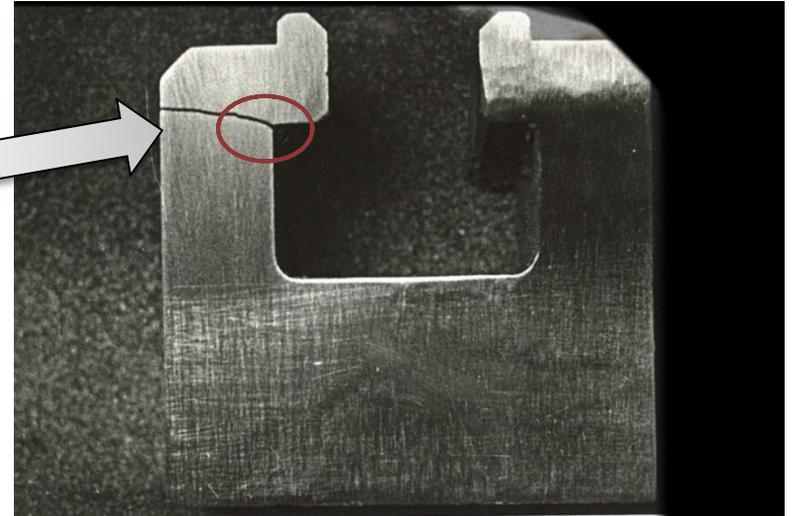
- Постоянная температура по радиусу и толщине диска (550-565°C)

- Периодическая остановка для измерения деформации и осмотра модели после определенного числа часов работы

- После разрушения обода диска фиксировалось число часов его работы при заданном числе оборотов

Результаты испытаний

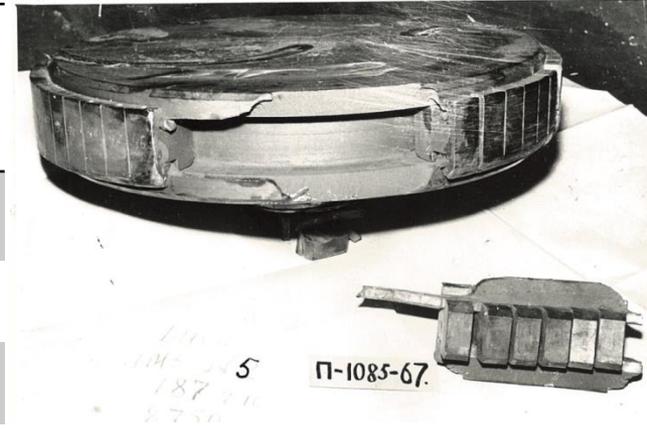
Разрушение всех ободов начиналось в галтели верхнего угла паза



Колодцы не являлись очагами и причиной разрушения

Результаты испытаний

№	Характеристика хвостового соединения	Степень охрупченности материала $\sigma_{0,2}$ кг/мм ²	Температура испытаний °С	Обороты испытаний об/мин	Число часов до разрушения час	Место разрушения
1	С защелками	100	550	10000-12000	20 и 0,2	Вблизи колодцев
2	С защелками	100	550	10500	25	Вблизи колодцев
3	С защелками	100	550	8750	354	Вблизи колодцев
4	С защелками	100	550	8750	397	Вдали от колодцев
5	С защелками	100	565	8750	131	Вдали от колодцев
6	С защелками	100	565	8750	187	Вдали от колодцев
7	Без защелок	100	550	7500	309	Вблизи колодцев
8	Без защелок	100	550	7500	402	Вблизи колодцев
9	Без защелок	80	550	7000	639	На дуге 180 °С
10	Без защелок	80	550	7000	702	Вблизи колодцев



Разрушение диска №5



Разрушение диска №4

Феноменологические модели ползучести

• Теория старения

Зависимость между компонентами напряжения и деформации: $\sigma_i = \Phi_1(\varepsilon_i, t)$

Решение ряда задач по теории упруго-пластических деформаций

• Теория течения

Зависимость между скоростью деформации ползучести и напряжением имеет вид:

$$\dot{\varepsilon}_c = \sigma^n B$$

$$\log \dot{\varepsilon}_c = \log B + n \log \sigma$$



T, °C	B	n
550	$4,25 \cdot 10^{-25}$	7,2186
565	$3,332 \cdot 10^{-18}$	4,7645

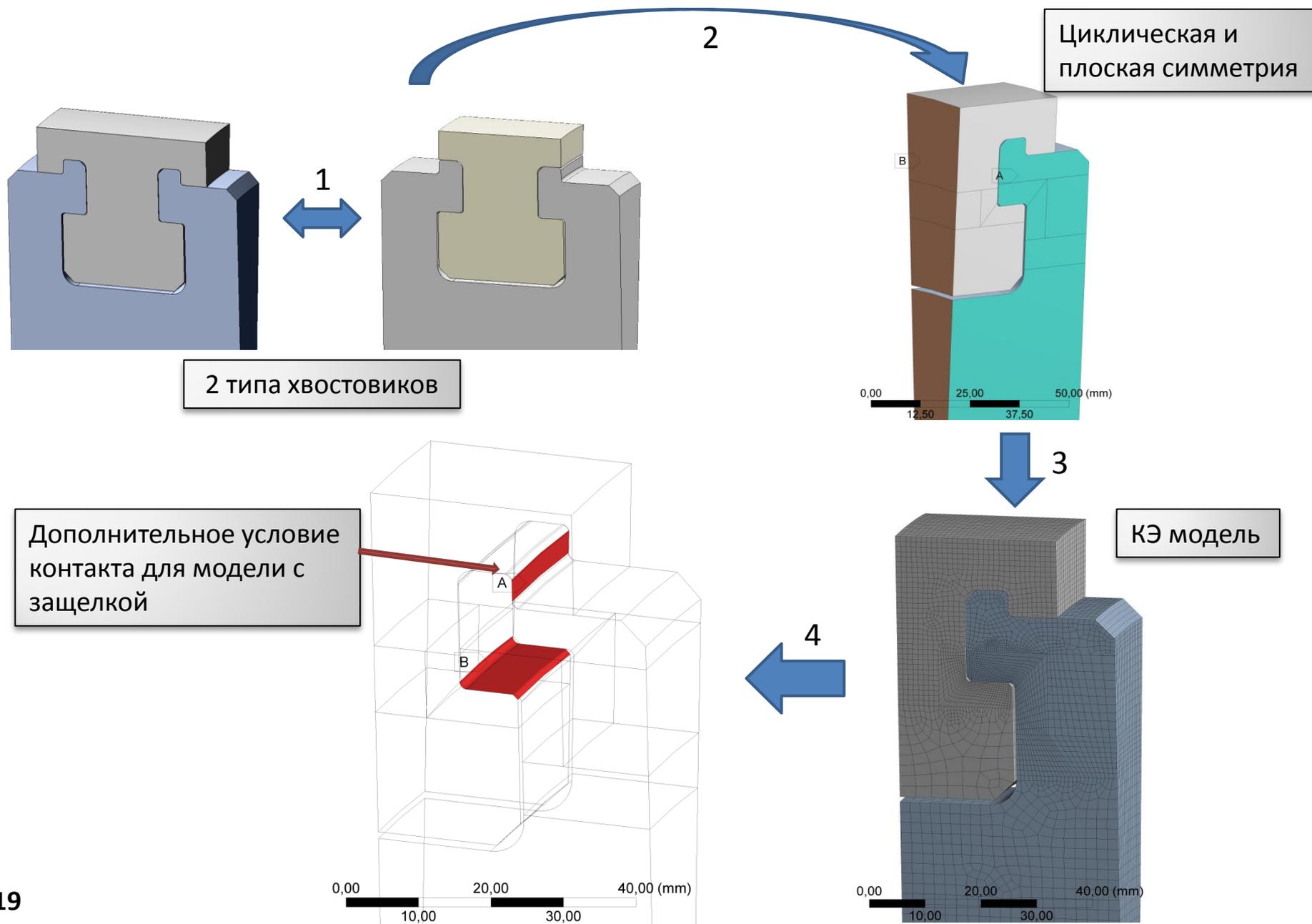
• Теория упрочнения

Соотношение для скорости деформации ползучести:

$$\dot{\varepsilon}_c = B \sigma^n t^m$$

T, C	B	n	m
550	$7,0552 \cdot 10^{-14}$	3,5	-0,47
565	$3,7364 \cdot 10^{-12}$	3	-0,49

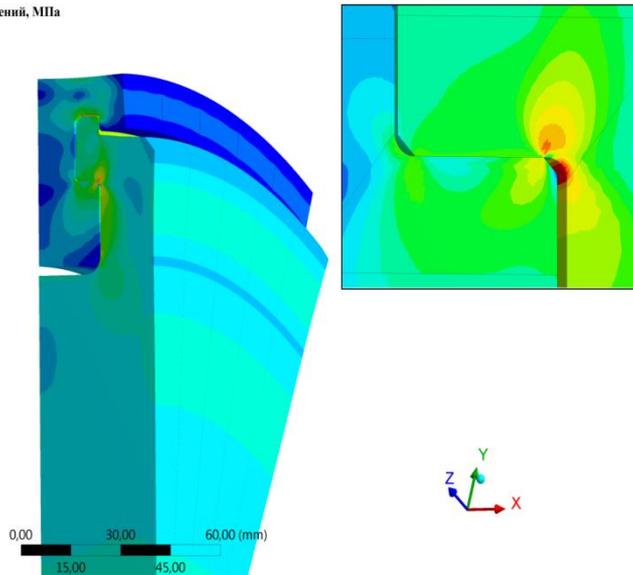
Конечно-элементное моделирование дисков с Т-образными хвостовиками



Напряженно-деформируемое состояние диска с защелкой (8750 об/мин)

Интенсивность напряжений, МПа
Время: 450 часов

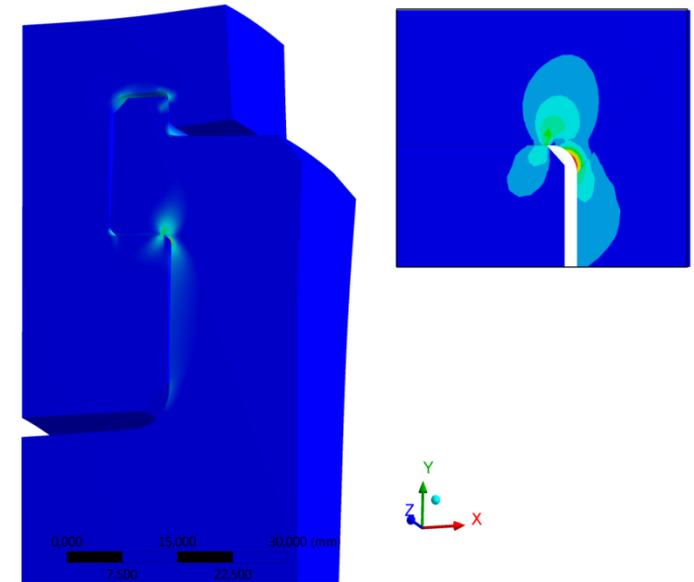
435,58
404,48
373,39
342,3
311,21
280,12
249,02
217,93
186,84
155,75
124,66
93,564
62,472
31,38
0,28842



Интенсивность напряжений, МПа

Деформация ползучести

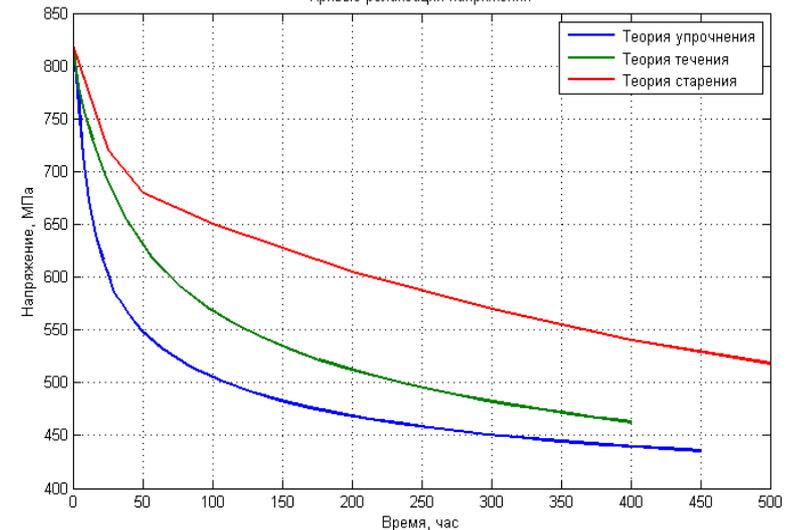
0,0078323
0,0072728
0,0067134
0,0061539
0,0055945
0,005035
0,0044756
0,0039161
0,0033567
0,0027972
0,0022378
0,0016783
0,0011189
0,00055945
2,6328e-14



Деформации ползучести

Основная концентрация напряжений находится в зоне галтели. При проведении эксперимента в этом же месте происходило зарождение трещины

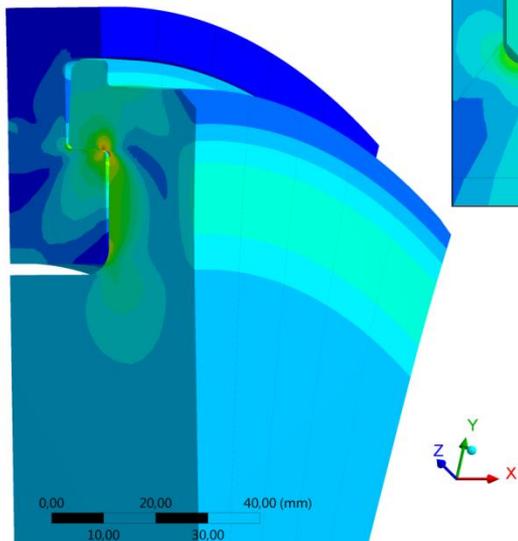
Кривые релаксации напряжения



Напряженно-деформируемое состояние диска без защелки (7500 об/мин)

Интенсивность напряжений, МПа
Время: 450 часов

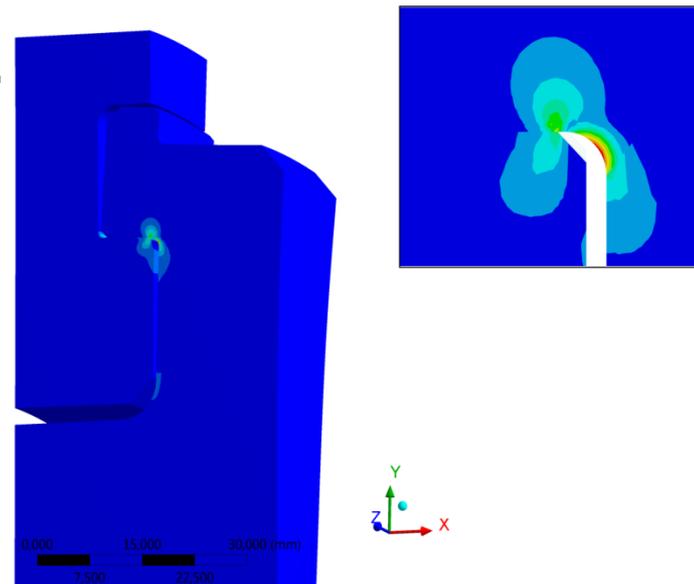
405,38
376,43
347,49
318,55
289,6
260,66
231,72
202,78
173,83
144,89
115,95
87,007
58,064
29,122
0,17931



Интенсивность напряжений, МПа

Деформация ползучести

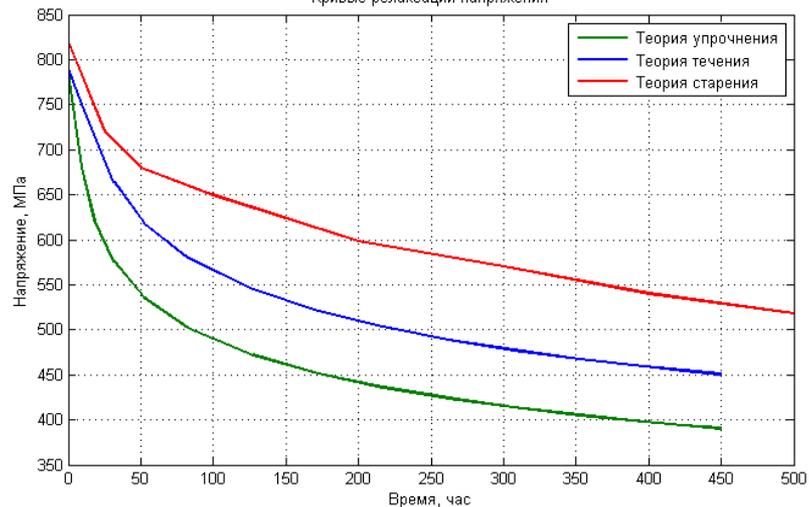
0,0061927
0,0057504
0,005308
0,0048657
0,0044234
0,003981
0,0035387
0,0030964
0,002654
0,0022117
0,0017693
0,001327
0,00088467
0,00044234
9,8598e-15



Деформации ползучести

Основная концентрация напряжений находится в зоне галтели. При проведении эксперимента в этом же месте происходило зарождение трещины

Кривые релаксации напряжения

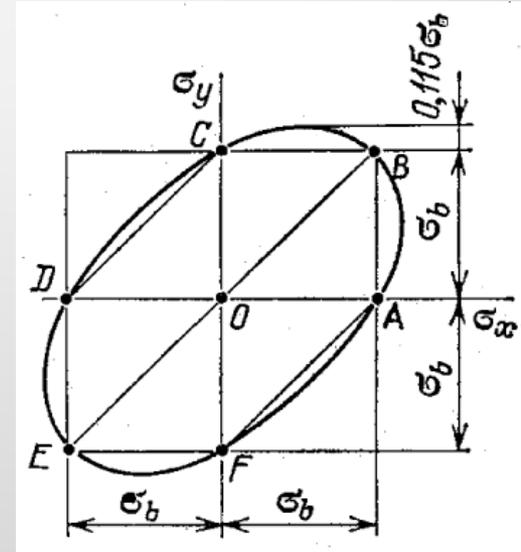


Выбор критерия длительной конструкционной прочности

При сложном напряженном состоянии в условиях ползучести необходимо иметь критерий, позволяющий оценивать прочность с использованием экспериментальных данных



Плоское напряженное состояние



$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y}$$



Результаты расчетов

Расчеты:

$$\sigma_{max} = 1,11\sigma_i$$

При двухосном растяжении $2\tau_{max}$ и σ_{max} совпадают

В качестве критерия длительной прочности в работе принимались:

$$\sigma^{ЭКВ} = 2\tau_{max}$$

$$\sigma^{ЭКВ} = \sigma_i$$

Вычисление параметра повреждаемости

Доля повреждаемости при напряжениях $\sigma_j^{\text{ЭКВ}}$

$$\Pi_j = \frac{t_j}{t_{jp}}$$

Закон линейного суммирования

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \dots + \Pi_j = \frac{t_1}{t_{1p}} + \frac{t_2}{t_{2p}} + \dots + \frac{t_j}{t_{jp}}$$

Момент разрушения

$$\Pi = \sum_{j=1}^i \frac{t_j}{t_{jp}} = 1$$

Закон при непрерывном во времени изменении напряжений

$$\int_0^{t_p^*} \frac{dt}{t_p(\sigma^{\text{ЭКВ}})} = 1$$

Описание кривой длительной прочности

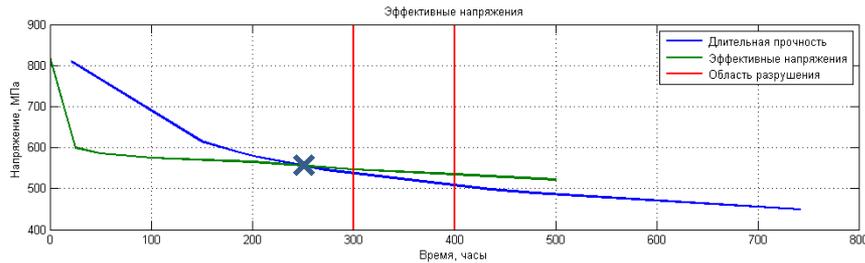
$$t = A\sigma^{-n}$$

Эффективное постоянное напряжение, учитывающее повреждаемость

$$\sigma^{\text{ЭФ}} = \left[\frac{1}{t_p^*} \int_0^{t_p^*} (\sigma^{\text{ЭКВ}})^n dt \right]^{\frac{1}{n}}$$

Анализ критериев длительной прочности

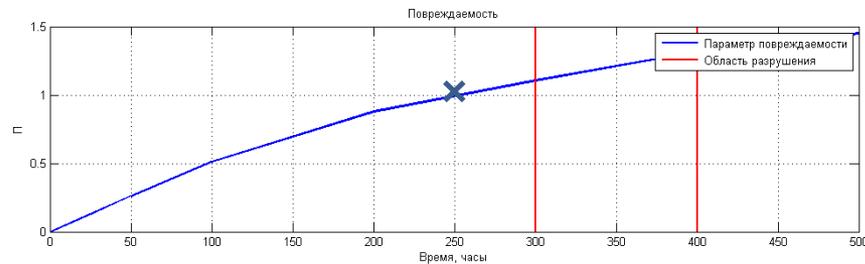
Теория старения



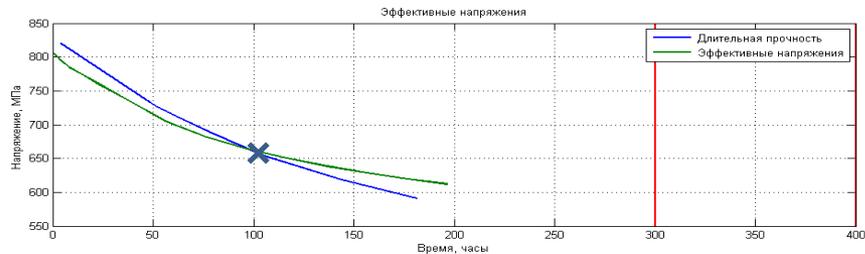
$$\sigma^{\text{ЭКВ}} = \sigma_i$$

Время до разрушения по теории старения при выборе интенсивности напряжений в качестве эквивалентных, составило 250 часов.

наилучшее согласование с экспериментом дал критерий по интенсивности напряжений



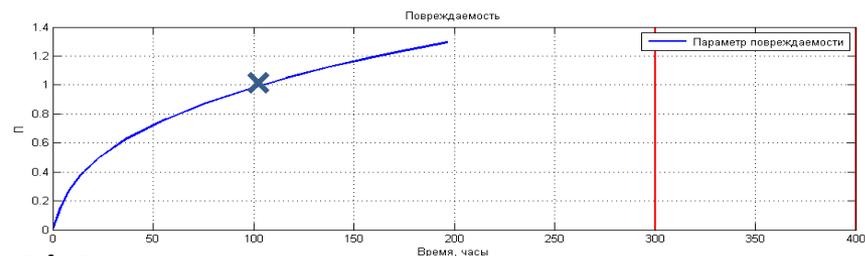
Теория течения



$$\sigma^{\text{ЭКВ}} = 2\tau_{\text{max}}$$

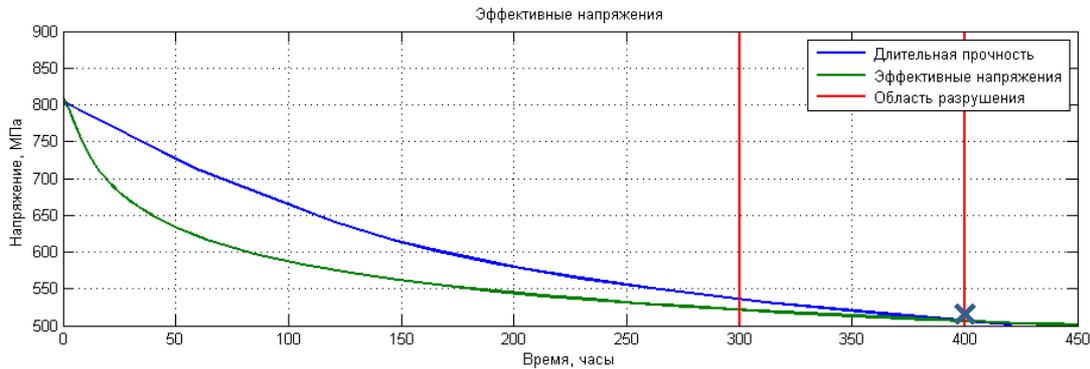
Время до разрушения по теории течения при выборе максимальных касательных напряжений в качестве эквивалентных, составило 105 часов.

при выборе максимальных касательных напряжений в качестве эквивалентных, оценка становится консервативной



Анализ критериев длительной прочности

Теория упрочнения

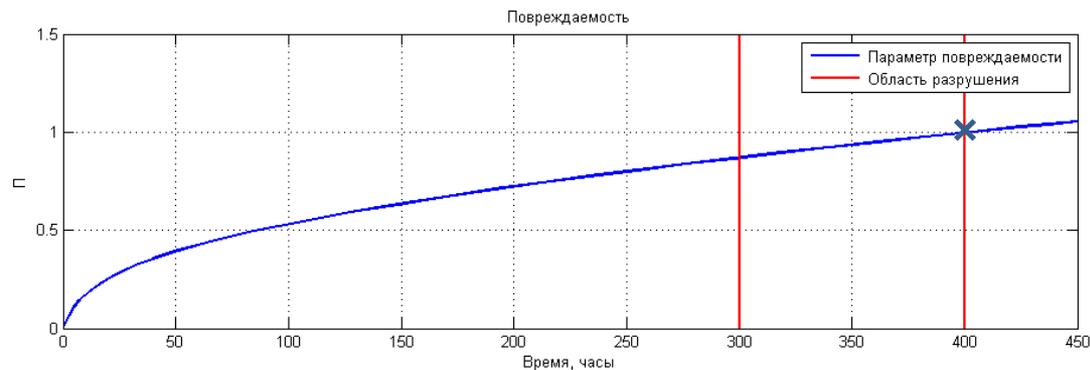


$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2\tau_{\text{max}}$$

Время до разрушения по теории упрочнения при выборе максимальных касательных напряжений в качестве эквивалентных составило 400 часов.

для обеих моделей при выборе максимальных касательных напряжений в качестве эквивалентных дает наилучшее согласование с результатами эксперимента

Интенсивность напряжений дает сильно завышенную оценку времени до разрушения.



Выводы

- Выполнено исследование по выбору критериев длительной конструкционной прочности на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных
- Расчет ползучести выполнен по 3 феноменологическим моделям: старение, течение, упрочнение
- Для оценки времени до разрушения использовались эффективные напряжения

$$\sigma^{\text{эф}} = \left[\frac{1}{t_p^*} \int_0^{t_p^*} (\sigma^{\text{ЭКВ}})^n dt \right]^{\frac{1}{n}}$$

- Для каждой теории исследовались 2 вида эквивалентных напряжений: $2\tau_{max}$ и σ_i
- В качестве критерия разрушения рассматривался комплекс, состоящий из модели ползучести и эквивалентного параметра
- Теория старения. Эквивалентные параметр σ_i показывает хорошее согласие с экспериментом. Критерий по $2\tau_{max}$ дает избыточно консервативную оценку.
- Теория течения. $2\tau_{max}$ — консервативная оценка ресурса. σ_i — слишком оптимистичная оценка значения ресурса, поэтому не может быть рекомендован для практических расчетов.
- Теория упрочнения. $2\tau_{max}$ — наилучшее согласие с результатами эксперимента. σ_i — завышенное значение ресурса, поэтому не может быть рекомендован для практических расчетов.

Спасибо за внимание